

**Bewertung der Schadensanfälligkeit
von Mauerwerkskonstruktionen
gegenüber Hochwassereinwirkungen**

Assessing the flood vulnerability
of external wall constructions

An der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) vorgelegte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Sebastian Golz

geboren am 20.12.1980 in Forst/Lausitz

Erster Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller Technische Universität Dresden
Zweiter Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Robert Jüpner Technische Universität Kaiserslautern
Tag der Verteidigung	18. April 2016

Kurzfassung

Klimatische und gesellschaftliche Veränderungsprozesse sind Herausforderungen, die den gegenwärtig zunehmenden Bedarf an Konzepten und Maßnahmen zur Reduzierung hochwasserinduzierter Risiken insbesondere für die gebaute Umwelt unterstreichen. Eine Handlungsalternative bildet die Implementierung konstruktiver Maßnahmen des hochwasserangepassten Bauens, die zu einer Minderung der Schadensanfälligkeit bestehender Gebäude führen. Derzeit fehlen jedoch Verfahren, um die Effekte derartiger Maßnahmen zu beurteilen.

Die vorliegende Dissertationsschrift beleuchtet in einer Experimentalstudie zunächst das Systemverhalten gefügter Außenwandkonstruktionen bei definierten Hochwasserbeanspruchungen. Zu den Zielen der Experimentalstudie gehören die Analyse der konstruktionsspezifischen Feuchteverteilung bei mehrtägiger, ein- und zweiseitiger Wasserbeanspruchung sowie die Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit. Zu den üblichen Außenwandkonstruktionen, welche durch ihre signifikante räumliche Verbreitung und häufige Ausführung geprägt sind, zählen sowohl ein- als auch mehrschalige Mauerwerkskonstruktionen aus überwiegend mineralischen Baustoffen. Das Versuchsprogramm umfasst acht Schichtenfolgen üblicher Mauerwerkskonstruktionen, die den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen.

Darauf aufbauend steht die Untersuchung der Wirkungszusammenhänge zwischen dem dokumentierten Feuchteverhalten und dessen nachteiligen Folgen im Mittelpunkt. Die anschließende systematische Ermittlung und Beurteilung der Schadensanfälligkeit bestehender Mauerwerkskonstruktionen basiert auf der Nutzwertmethode, welche die nachteiligen Veränderungen der Eigenschaftswerte anhand von insgesamt elf identifizierten Kriterien bewertet.

Auf der Basis der Labor- und Bewertungsergebnisse lassen sich für die untersuchten Baukonstruktionen exemplarische Anpassungsoptionen ableiten, die im Hinblick auf die Minderung zukünftiger Hochwasserschäden eine geeignete Konstruktionslösung darstellen. Anhand des verwendeten methodischen Ansatzes kann somit die Wirkung verschiedener baukonstruktiver Maßnahmen, bezogen auf die Verringerung des Risikos, eingeschätzt werden.

Abstract

The impacts of floods on housing are increasing due to more frequent and severe weather events as well as the ongoing development of settlements in flood-prone areas together with the rising vulnerability of assets at risk. The implementation of structural flood proofing measures on the individual property scale provides a previously untapped potential to reduce flood damage to buildings due to insufficient transparency of their effects respectively a gap of informed knowledge about their expected performance.

An experimental laboratory study examines the system behaviour of selected exterior wall assemblies exposed to a defined flood extend from an engineering perspective. Most common types of exterior wall panels, which are characterised by their significant spatial distribution and frequent implementation, are solid and cavity masonry constructions containing predominantly different mineral building materials. The test program includes the analysis of eight layer sequences of typical composite masonry wall arrangements, which all meet the generally accepted rules of technology, concerning their response under flood conditions. The test assemblies are exposed to water on the external face for 72 hours and to water on both faces for additional 24 hours.

Then, the thesis explores the correlations between the monitored system behaviour of materials/components in relation to the presence of moisture and its detrimental consequences. The determination and evaluation of the vulnerability of existing masonry structures are based on a scoring system (utility analysis), which assesses the adverse changes of property values of eleven identified criteria.

On this basis, alternative recommendations and specifications for examples of customised structural options can be derived that reduce the impacts of future floods on the construction assemblies. The methodological approach serves as a basis for the estimation of the effects of different constructive measures taken to limit flood damage.

Inhalt

1	Einleitung	9
1.1	Herausforderungen	9
1.2	Forschungsfragen	14
1.3	Gliederung der Arbeit	17
2	Stand von Wissenschaft und Praxis	19
2.1	Stand der Forschung	19
2.1.1	Nationale Beiträge	19
2.1.2	Europäische und internationale Beiträge	21
2.1.3	Zusammenfassung der Forschungslage	24
2.2	Stand der nationalen Praxis	26
2.2.1	Management von Hochwasserrisiken	26
2.2.2	Bauvorsorge als Strategie zur Minderung hochwasserinduzierter Schäden an Gebäuden	30
2.2.3	Allgemein anerkannte Regeln der Technik	37
3	Hochwasserangepasste Bauweisen	39
3.1	Überblick	39
3.2	Schadensbilder	40
3.3	Verhalten üblicher Wandbaustoffe bei Hochwassereinwirkung	43
3.3.1	Überblick	43
3.3.2	Natursteine	46
3.3.3	Ziegel und andere keramische Produkte	47
3.3.4	Zement- und kalkgebundene Baustoffe	48
3.3.5	Gipsgebundene Baustoffe	51
3.3.6	Dämmstoffe	51
3.3.7	Holz und Holzwerkstoffe	52
3.3.8	Metalle und Gläser	53
3.4	Verhalten von Wandkonstruktionen bei Überflutung	53
4	Vorgehensweise	61
4.1	Methodisches Gesamtkonzept	61
4.2	Verfahren zur Analyse des Feuchteverhaltens	62
4.2.1	Überblick	62
4.2.2	Numerische Simulationsverfahren	63
4.2.3	Empirische Verfahren	66
4.3	Verfahren zur multikriteriellen Bewertung von Konstruktionslösungen	67
4.3.1	Überblick	67
4.3.2	Nutzwertanalyse	69

4.3.3	Analytisch-hierarchischer Prozess	72
4.3.4	Nutzen-Kosten-Untersuchungen	76
5	Untersuchungsgegenstand	79
5.1	Abgrenzung	79
5.2	Regelquerschnitte üblicher Außenwandkonstruktionen im Wohnungsbau	86
5.2.1	Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln	86
5.2.2	Einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln	88
5.2.3	Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen	90
5.2.4	Einschaliges Mauerwerk aus Planhochlochziegeln mit integrierter Wärmedämmung	92
5.2.5	Einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung	94
5.2.6	Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit außenliegender Wärmedämmung	96
5.2.7	Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade	98
5.2.8	Zweischaliges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung	100
6	Labortechnische Analyse des Feuchteverhaltens	103
6.1	Ziele und Beschreibung des Verfahrens	103
6.2	Abgrenzung der betrachteten Einwirkungen	105
6.3	Versuchsanordnung	107
6.4	Versuchsdurchführung	109
6.5	Gravimetrische Feuchtemessung	112
6.6	Feuchteprofile	115
6.7	Wasserdurchlässigkeit	124
6.8	Interpretation der Versuchsergebnisse	126
7	Beurteilung der Schadensanfälligkeit	147
7.1	Ziele und Beschreibung der Verfahren	147
7.2	Kriterien und Indikatoren	148
7.3	Statisch-konstruktive Kriterien	150
7.3.1	Übersicht	150
7.3.2	Druckfestigkeit	152
7.3.3	Querzugfestigkeit Scherfestigkeit	155
7.3.4	Haftzugfestigkeit Haftscherfestigkeit	161
7.4	Bauphysikalische Kriterien	167

7.4.1	Übersicht	167
7.4.2	Wasseraufnahmeverhalten	169
7.4.3	Wasserdurchlässigkeit	173
7.4.4	Dimensionsstabilität	175
7.4.5	Wärmeleitfähigkeit	177
7.4.6	Trocknungsverhalten	181
7.5	Kriterien der Bauweise	184
7.5.1	Übersicht	184
7.5.2	Erreichbarkeit und Demontierbarkeit	185
7.6	Dauerhaftigkeit	187
7.6.1	Übersicht	187
7.6.2	Mikrobiell induzierte Korrosion	189
7.6.3	Elektrolytische (Metall-)Korrosion	193
7.7	Bestimmung der Gewichtungsfaktoren	194
7.8	Nutzwertanalyse	196
7.9	Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse	205
8	Baukonstruktive Optionen	209
8.1	Optionen für einschaliges Mauerwerk ohne außenliegende Wärmedämmung	209
8.2	Optionen für einschaliges Mauerwerk mit außenliegender Wärmedämmung	212
8.3	Optionen für zweischaliges Mauerwerk mit Kerndämmung	218
9	Zusammenfassung und Ausblick	221
9.1	Beantwortung der Forschungsfragen	221
9.2	Ausblick	226
10	Glossar	233
11	Literatur- und Quellenverzeichnis	241
11.1	Monographien und Aufsätze	241
11.2	Normen und Richtlinien	255
11.3	Produktdatenblätter	257
11.4	Bilder	257
Anlage A1		263
Anlage A2		265
Anlage A3		267
Anlage A4		269

Anlage A5	271
Anlage A6	273
Anlage A7	275
Anlage A8	277

1 Einleitung

1.1 Herausforderungen

„Das Wasser ist ein freundliches Element für den, der damit bekannt ist und es zu behandeln weiß.“

Johann Wolfgang von Goethe¹

„Jede Person, die durch Hochwasser betroffen sein kann, ist im Rahmen des ihr Möglichen und Zumutbaren verpflichtet, geeignete Vorsorgemaßnahmen zum Schutz vor nachteiligen Hochwasserfolgen und zur Schadensminderung zu treffen, insbesondere die Nutzung von Grundstücken den möglichen nachteiligen Folgen für Mensch, Umwelt oder Sachwerte durch Hochwasser anzupassen.“

§ 5 Abs. 2 Wasserhaushaltsgesetz (WHG)²

Die Naturgefahr Hochwasser stellt, aufgrund ihrer erheblichen negativen Konsequenzen, weltweit ein signifikantes Umweltrisiko für die Gesellschaft dar.³ Dieses Risiko⁴ nimmt zukünftig sowohl durch allmähliche Veränderungen der Umwelt als auch durch gesellschaftliche Entwicklungen weiter zu.⁵ Zu den umweltbezogenen Ursachen gehört insbesondere die Verschärfung meteorologisch bedingter Naturgefahren als Folge des anthropogenen Klimawandels.⁶ Das Ausmaß häufigerer und intensiverer Extremwetterereignisse wird auch regional zunehmend deutlich erkennbar. Zu den gesellschaftlichen Ursachen zählt hingegen der weitere Anstieg der Exposition und der Schadensanfälligkeit von Wohn- und Nichtwohngebäuden sowie von verschiedenen

**Phänomen
Hochwasser**

¹ Zitat aus dem 1809 erschienenen Buch „Die Wahlverwandtschaften“ von Johann Wolfgang von Goethe.

² Vergleiche Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 15. November 2014 (BGBl. I S. 1724) geändert worden ist.

³ Vergleiche zum Beispiel WBGU (1999). Der Begriff Hochwasser ist im Glossar erläutert.

⁴ Eine Bestimmung des Begriffs Risiko enthält das Glossar.

⁵ Vergleiche zum Beispiel UN-ISDR (2005)

⁶ Vergleiche zum Beispiel die Sachstandsberichte des Weltklimarats IPCC (2014), das Weißbuch zur Anpassung an den Klimawandel der EU-Kommission KOM (2009) oder die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel Bundesregierung (2008)

Infrastrukturen⁷ in potentiell überflutungsgefährdeten Gebieten, aufgrund einer wachsenden Besiedlungsintensität.⁸ Diese Veränderungen und Entwicklungen unterstreichen den wachsenden Bedarf an Konzepten zur Minderung hochwasserbedingter Risiken insbesondere für die gebaute Umwelt.

Rezeptor

Zu den wesentlichen Rezeptoren innerhalb flutgefährdeter Siedlungsbereiche zählen insbesondere Gebäude⁹ mit ihren vielfältigen Nutzungen, Formen und Baukonstruktionen, deren spezifische Schadensanfälligkeit gegenüber Hochwassereinwirkungen das Risiko nachteiliger Folgen erheblich beeinflusst.¹⁰ Die überflutungsbedingten Sachschäden¹¹ an betroffenen Gebäuden haben eine hohe ökonomische Relevanz, da sie in der Regel einen wesentlichen Anteil der gesamten Schadenskosten bilden, unabhängig von der Erscheinungsform des jeweiligen Hochwassers. Ob die Überflutung durch Oberflächenwasser mit Gewässerbezug, durch Oberflächenwasser infolge räumlich und zeitlich begrenzter Starkregenereignisse, durch Grundhochwasser oder durch Rückstau in Entwässerungssystemen bedingt wird, ist für die ablaufenden Schadensprozesse am Gebäude prinzipiell von

⁷ Lenz (2009) beschreibt in Anlehnung an Jochimsen (1966) Infrastruktur als „die Gesamtheit der materiellen, personellen und institutionellen Grundeinrichtungen, die das Funktionieren einer arbeitsteiligen Wirtschaft garantieren.“ Dazu zählen insbesondere „Verkehrseinrichtungen, Anlagen der Energieerzeugung und Energieverteilung, Wasserversorgung, Entsorgung, Nachrichtenübermittlung und Anlagen des Bildungs-, Kultur-, Gesundheits- und Freizeitbereichs.“

⁸ Vergleiche zum Beispiel Munich Re Group (2009)

⁹ Es sollte darauf hingewiesen werden, dass insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern die Bevölkerung selbst der wichtigste Rezeptor ist.

¹⁰ Vergleiche Sächsische Staatskanzlei (2003)

¹¹ Parker et al. (1987) sowie Smith und Ward (1998) schlugen eine Kategorisierung hochwasserbedingter Schäden vor. Die Autoren differenzieren in einer ersten Gliederungsebene nachteilige Hochwasserfolgen in direkte und indirekte Schäden. Direkte Schäden werden hierbei als unmittelbare Konsequenz physischer Wasserbeanspruchung angesprochen, während indirekte Schäden als Folge direkter Hochwasserschäden häufig räumlich getrennt und zeitlich verzögert auftreten können. In einer zweiten Gliederungsebene unterscheiden Parker et al. (1987) sowie Smith und Ward (1998) tangible und intangible Schäden. Während sich tangible Schäden in Geldeinheiten ausdrücken lassen, sind intangible Schäden monetär nicht erfassbar, sondern allenfalls qualitativ beschreibbar. Sachschäden an betroffenen Gebäuden, das heißt deren nachteilige Veränderungen, werden demnach der Kategorie direkt tangible Hochwasserschäden zugeordnet.

nachrangiger Bedeutung. Weil ein vollständiger technischer Hochwasserschutz für einige überschwemmungsgefährdete Siedlungsbereiche jedoch oftmals weder praktisch umsetzbar noch wirtschaftlich angemessen ist, können objektspezifische, physische Maßnahmen der Risikovorsorge eine Handlungsalternative zur Reduzierung potentieller Schäden an bestehenden Gebäuden darstellen. Diese physischen Maßnahmen der Hochwasserrisikovorsorge umfassen hierbei insbesondere die baukonstruktive Anpassung gefährdeter Gebäude.

Die wirksame Implementierung derartiger Bauvorsorgemaßnahmen im Bestand erfordert jedoch nicht nur die Kenntnis über die standortbezogene Hochwassergefahr, sondern auch über die spezifische Verletzbarkeit eines Gebäudes, das heißt über die Anfälligkeit seiner Baukonstruktion und Gebäudetechnik gegenüber unterschiedlichen Hochwassereinwirkungen¹² und über die zu erwartenden negativen Konsequenzen, um Risiken ermitteln und anschließend bewerten zu können. Während präzise Informationen über die jeweilige Hochwassergefährdung mittlerweile für die Mehrzahl der Flusseinzugsgebiete in Deutschland und auch in Europa in hoher räumlicher Auflösung abrufbar sind, ist die Anfälligkeit verschiedener Baukonstruktionen hingegen bislang oftmals erst ansatzweise bekannt beziehungsweise wird zum Teil kontrovers diskutiert.¹³ Darüber hinaus ist das Potential von Bauvorsorgemaßnahmen im Hinblick auf die Minderung hochwasserinduzierter Schäden an bestehenden

**gesellschaftliche
Herausforderungen**

¹² Zu den potentiellen hochwasserbedingten Einwirkungen auf Gebäude zählen neben der intensiven Wasserbeanspruchung unter anderem hydrostatische Druckkräfte, strömungsinduzierte Lasten, Auftriebskräfte sowie der Anprall von Einzellasten.

¹³ In Umsetzung der EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (EG-HWRM-RL 2007/60/EG) erarbeiteten alle europäischen Mitgliedsstaaten bis zum 22. Dezember 2013 für jedes signifikante Hochwasserrisikogebiet Gefahren- und Risikokarten. Die adressgenaue Gefährdung durch Hochwasser kann derzeit zum Beispiel in den Bundesländern Berlin, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Niedersachsen anhand des öffentlich zugänglichen, webbasierten Zonierungssystems für Überschwemmung, Rückstau und Starkregen (ZÜRS public) abgeschätzt werden. Das Informationsangebot wird gegenwärtig für die genannten Bundesländer vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) zusammen mit den jeweils fachlich verantwortlichen Landesämtern bereitgestellt und ist unter der Internetadresse www.zuers-public.de abrufbar. ZÜRS public soll das Risikobewusstsein schärfen und anhand objektbezogener Gefährdungsanalysen die eigenverantwortliche Hochwasservorsorge fördern.

Gebäuden häufig weitgehend unklar. Aus gesellschaftlicher Perspektive besteht daher ein erkennbares Defizit in der Verfügbarkeit wissenschaftlich fundierter, das heißt evidenzbasierter Informationen über

- die Schadensanfälligkeit üblicher Baukonstruktionen,
- die Wirkung möglicher Bauvorsorgemaßnahmen sowie
- über vertiefend ausgearbeitete baukonstruktive Optionen für die beanspruchungsgerechte Anpassung besonders schadensanfälliger Bauteile beziehungsweise für deren bauliche Instandsetzung nach einem Hochwasserereignis.

wissenschaftliche Herausforderungen

Aus ingenieurwissenschaftlicher Perspektive besteht gegenüber den gesellschaftlichen Herausforderungen ein erheblicher Bedarf, um das Systemverhalten verschiedener Baukonstruktionen bei Hochwasserbeanspruchung dezidiert bestimmen und nach einheitlichen Kriterien bewerten zu können. Hierfür müssen zunächst die jeweils ablaufenden Schadensprozesse infolge erhöhter Wassergehalte in Bauteilen und deren Wirkungszusammenhänge analysiert werden, um die bisher unzureichenden Erkenntnisse mit neuen Forschungsergebnissen zu erweitern. Anschließend werden die konstruktionsspezifische Schadensanfälligkeit mit Hilfe quantitativer Methoden bestimmt und geeignete Optionen zur Schadensminderung abgeleitet. Im Hinblick auf die Robustheit verschiedener Konstruktionslösungen gegenüber Hochwasserbeanspruchungen besteht die Vermutung, dass dieses Ziel im Konflikt mit den normativen Forderungen nach energetisch optimierten Außenwandquerschnitten stehen könnte.

Während eine Vielzahl vorliegender Fachpublikationen ausführlich das Feuchteverhalten¹⁴ sowohl von sortenreinen Baustoffen als auch von unterschiedlichen Verbundbaustoffen beschreiben, sind Baukonstruktionen, die in der Regel aus einer systematisch gefügten Folge mehrerer Baustoffe bestehen, bislang jedoch lediglich sporadisch hinsichtlich ihres Verhaltens bei intensiver Wasserbeanspruchung untersucht worden. Für die Bewertung der Schadensanfälligkeit

¹⁴ Der Feuchtegehalt kapillarporöser Baustoffe ist definiert als masse- beziehungsweise volumenbezogene Feuchtigkeitsmenge im Porengefüge des entsprechenden Baustoffes. Das Feuchteverhalten beschreibt die Veränderung verschiedener charakteristischer Baustoffeigenschaften infolge wechselnder Feuchtegehalte.

einer baukonstruktiven Schichtenfolge sind demnach die Wechselwirkungen zum Teil komplexer Materialverbünde zu berücksichtigen.¹⁵ Das Systemverhalten¹⁶ von Baukonstruktionen kann prinzipiell auf der Grundlage physischer Laboruntersuchungen oder numerischer Simulationsverfahren bestimmt werden, wobei labortechnische Methoden zur systematischen Analyse der Schadensanfälligkeit von Baukonstruktionen bislang nicht einheitlich geregelt und wenig etabliert sind.

Während eines Hochwasserereignisses wird insbesondere die bauliche Hülle exponierter Gebäude temporär sehr intensiv durch verschiedene Wassereinwirkungen beansprucht, welche meist jedoch in der Planungsphase des Gebäudes unberücksichtigt blieben. In der Folge kann eine Vielzahl hochwasserinduzierter Schadensbilder identifiziert werden, welche mindestens einer der folgenden drei Kategorien zuzuordnen sind:

- Feuchtigkeits- und Wasserschäden
- Strukturelle Schäden mit statischer Relevanz
- Kontamination infolge Schadstoffeintrag

Innerhalb des Baugefüges müssen Außenwandkonstruktionen vielfältige Anforderungen erfüllen. Neben der originären Funktion des Gebäudeabschlusses sind es insbesondere statische Erfordernisse sowie funktionelle Anforderungen des Wärme-, Feuchte-, Schall- und Brandschutzes, welche die Stoffauswahl und die Komposition der jeweiligen Schichtenfolge maßgeblich bestimmen. Nicht zuletzt ist die Fassade auch ein bedeutendes gestalterisches Element, welches das Erscheinungsbild, das heißt die Ästhetik und Architektur eines Gebäudes, maßgeblich prägt.

Außenwandkonstruktionen mit ihren vielfältigen Materialfolgen, Anschlusslinien und konstruktiven Detailpunkten erfordern daher eine intensive fachliche Betrachtung, um deren

**Untersuchungs-
gegenstand**

¹⁵ Der Terminus „sortenreine Baustoffe“ meint hier homogene Einkomponenten-Baustoffe wie zum Beispiel Glas, Ziegel oder Reinelemente. Verbundbaustoffe bestehen grundsätzlich aus mehreren Komponenten, die in ihrer Gesamtheit jedoch eine homogene isotrope Matrix bilden (Mueller et al. 2013). Typische Vertreter sind die Baustoffe Beton, Stahlbeton, Kalksandstein, Poren- und Leichtbeton oder Asphalt.

¹⁶ Eine Begriffsbestimmung enthält das Glossar.

Anfälligkeit bei Hochwasserbeanspruchung einschätzen, bewerten und gegebenenfalls geeignete Anpassungsmaßnahmen entwickeln und priorisieren zu können. Zu den üblichen Außenwandkonstruktionen, welche durch ihre signifikante räumliche Verbreitung und häufige Ausführung geprägt sind, zählen sowohl ein- als auch mehrschalige Mauerwerkskonstruktionen aus überwiegend mineralischen Baustoffen.

Die vorliegende Dissertation beleuchtet ausgewählte Mauerwerkkonstruktionen in einer experimentellen Laborstudie hinsichtlich ihres Wasseraufnahme- und Wassertransportverhaltens und bewertet ihre Schadensanfälligkeit gegenüber Hochwassereinwirkungen anhand festgelegter Kriterien. Auf der Basis dieser Ergebnisse werden Entwürfe für ihre beanspruchungsgerechte Anpassung abgeleitet.

1.2 Forschungsfragen

Hauptfrage der Dissertation

Im Hinblick auf die skizzierten Herausforderungen dient das Dissertationsvorhaben der Beantwortung der zentralen Forschungsfrage, welche Strategien und baukonstruktiven Optionen geeignet sind, um die Schadensanfälligkeit üblicher Mauerwerkskonstruktionen gegenüber Hochwassereinwirkungen zu mindern. Diese forschungsleitende Hauptfrage wird durch die folgenden drei abgeleiteten Teilfragen unterteilt:

1. Wie kann das Systemverhalten von Mauerwerkskonstruktionen gegenüber hygrischen Hochwassereinwirkungen labortechnisch untersucht werden?
2. Wie und anhand welcher quantifizierbarer Kriterien kann die Schadensanfälligkeit einer Mauerwerkskonstruktion bewertet werden?
3. Welche Strategien und baukonstruktiven Optionen können für die Anpassung bestehender Außenwandkonstruktionen abgeleitet werden?

Forschungsdesign

Die Beantwortung der Teilfragen, das heißt die Entwicklung von Thesen, basiert überwiegend auf empirischen, das heißt experimentgestützten Untersuchungen zum Feuchteverhalten gefügter Außenwandkonstruktionen und ihrer Bauteilschlüsse sowie auf deren systematischer Auswertung. Diese induktive Vorgehensweise, das heißt die Beobachtung der

Effekte intensiver Wasserbeanspruchung, die Erklärung physikalischer Mechanismen sowie die abschließende Bildung von Hypothesen zur Beantwortung der genannten Forschungsfragen, charakterisiert das grundlegende Forschungsdesign dieser Arbeit.

Das Dissertationsvorhaben orientiert sich an dem zuvor umrissenen, gesellschaftlich relevanten Spannungsfeld und verfolgt den Zweck, durch die Anpassung besonders exponierter und schadensanfälliger Konstruktionen, die letztendlich zu erwartenden Kosten zur Beseitigung von Hochwasserschäden an Gebäuden zu reduzieren. In der nationalen und europäischen Gesetzgebung bildet die eigenverantwortliche Hochwasseranpassung potentiell betroffener Bürger eine wichtige Säule, deren Ziel es ist, die staatliche Hochwasservorsorge wirksam zu ergänzen.¹⁷ Für die Umsetzung dieses politischen Ziels werden der Bund, die Länder oder die Europäische Union mit hoher Wahrscheinlichkeit Förderprogramme auflegen, welche die Implementierung objekt konkreter Bauvorsorgemaßnahmen finanziell unterstützen und somit ökonomische Anreize zum Handeln geben sollen. In diesem Fall würden die öffentlichen Fördermittelgeber jedoch zwingend ein Operationalisierungsinstrument für die Bewertung der Wirksamkeit und Kosteneffizienz konzipierter Vorsorgemaßnahmen benötigen. Hierfür kann diese Arbeit fachliche Impulse liefern. Durch die Umsetzung geeigneter Maßnahmen der Bauvorsorge kann zudem die Versicherbar-

**gesellschaftlicher
Zweck**

¹⁷ Die Verpflichtung zur eigeninitiativen Hochwasseranpassung besteht gemäß § 5 Abs. 2 Wasserhaushaltsgesetz. Vergleiche hierzu auch Abschnitt 2.2.

keit von Gebäuden erreicht werden, die sich in stark hochwassergefährdeten Bereichen befinden (zum Beispiel in den ZÜRS¹⁸ Zonen 3 und 4).¹⁹

**wissenschaftlicher
Zweck**

Aus ingenieurwissenschaftlicher Perspektive ist der Zweck dieser Dissertation die Entwicklung und Beschreibung eines methodischen Ansatzes zur labortechnischen Bestimmung der Schadensanfälligkeit von Außenwandkonstruktionen gegenüber Hochwassereinwirkungen auf der Grundlage von Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Darauf aufbauend erfolgt die Untersuchung und Klassifizierung von Außenwandkonstruktionen im Hinblick auf deren Eignung bei wiederholter Hochwassereinwirkung sowie die Überführung und Integration der Ergebnisse in einen Bauteilkatalog beziehungsweise in konkrete Handlungsempfehlungen. Darüber hinaus dienen die Ergebnisse als Wissensbasis für die Generalisierung und Übertragung von Erkenntnissen für ein nachhaltiges Feuchtmanagement.

Adressaten

Die Forschungsergebnisse sind als konkrete Handlungsempfehlungen vor allem an planende Bauingenieure und Architekten adressiert, darüber hinaus aber auch an Akteure der Immobilien- und Versicherungswirtschaft, an Liegenschaftsverantwortliche oder an wissenschaftlich interessierte Gebäudeeigentümer. Die vorliegende Arbeit kann zudem einen Beitrag leisten zu einer forschungsbasierten Beratung von Fachverbänden, etwa aus der Bau- und Wohnungswirtschaft. Auf der Grundlage der Ergebnisse kann eine Risikobewertung vorgenommen werden.

¹⁸ Das webbasierte Informationsportal ZÜRS public verknüpft Geobasisdaten der Vermessungsverwaltung, Hochwasserdaten der Umweltverwaltung und Risikodaten der Versicherungswirtschaft und ermöglicht somit die Einschätzung des individuellen, das heißt adress- und objektbezogenen Hochwasserrisikos. Die Versicherungswirtschaft wird in diesem Zusammenhang vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) vertreten. Das Zonierungssystem für Hochwasser differenziert insgesamt vier Gefährdungsklassen. Die Gefährdungsklasse 3 entspricht zum Beispiel einer mittleren bis hohen Hochwassergefahr, das heißt die statistische Wahrscheinlichkeit eines Hochwassers an dem jeweiligen Gebäudestandort ist einmal in 10-50 Jahren.

¹⁹ Vergleiche hierzu den webbasierten Informationsdienst des GDV: www.kompass-naturfahrten.de

1.3 Gliederung der Arbeit

Im ersten Kapitel werden die gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Herausforderungen im Zusammenhang mit baukonstruktiven Optionen zur Minderung hochwasserinduzierter Risiken für bestehende Wohngebäude beschrieben und die daraus resultierenden, forschungsleitenden Fragen abgeleitet.

Das folgende Kapitel beschreibt den Paradigmenwechsel im Umgang mit Hochwasserrisiken, welcher die zunehmende Bedeutung objektbezogener Vorsorgemaßnahmen bedingt und den weiterführenden Forschungsbedarf begründet. In das Kapitel ist ein umfassender Überblick über die gegenwärtige nationale und europäische Forschungslage eingebunden.

Im dritten Kapitel werden die allgemeinen Grundlagen und Strategien des hochwasserangepassten Bauens dargestellt, wobei die Beschreibung typischer Schadensbilder sowie des Verhaltens üblicher Baustoffe bei Hochwassereinwirkungen im Mittelpunkt steht.

Das vierte Kapitel beinhaltet einleitend die Erklärung des methodischen Gesamtkonzepts dieser Arbeit. Anschließend werden die verwendeten Methoden zur Analyse und Bewertung des Feuchteverhaltens üblicher Mauerwerkskonstruktionen vorgestellt und das Vorgehen zur Ableitung baukonstruktiver Optionen vertieft erläutert.

Im fünften Kapitel rückt der Untersuchungsgegenstand in den Mittelpunkt. Hierin werden die acht betrachteten Regelquerschnitte üblicher Mauerwerkskonstruktionen detailliert beschrieben und dargestellt.

Das sechste Kapitel bildet eines der Kernelemente dieser Arbeit, in welchem das Feuchteverhalten der Mauerwerkskonstruktionen im Laborexperiment erfasst wird. Nachdem die verwendete Versuchsanordnung und die Versuchsdurchführung intensiv beleuchtet wurden, folgt die Interpretation der Ergebnisse und die Untersuchung ihrer Sensitivität.

Das siebente Kapitel umfasst anschließend die quantitative Bewertung der Schadensanfälligkeit von Mauerwerkskonstruktionen bei Überflutung mit Hilfe der Nutzwertmethode und Elementen des analytisch-hierarchischen Prozesses. Für das Bewertungsverfahren werden eine Zielhierarchie

entwickelt und Kriterien abgeleitet. Aspekte der Wirtschaftlichkeit werden durch die Kopplung einer Effizienzwertmethode berücksichtigt. Der Algorithmus wird anhand der betrachteten Mauerwerkskonstruktionen demonstriert.

Das achte Kapitel befasst sich mit dem Entwurf baukonstruktiver Optionen zur Minderung der Schadensanfälligkeit bestehender Mauerwerkskonstruktionen unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse und im Hinblick auf die gegebene Zielstellung.

Das neunte Kapitel fasst die Erkenntnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf.

2 Stand von Wissenschaft und Praxis

2.1 Stand der Forschung

2.1.1 Nationale Beiträge

Zu den nationalen Beiträgen mit den thematischen Schwerpunkten Schadensbeseitigung nach einem Hochwasserereignis, Bauvorsorge und hochwasserangepasstes Bauen zählen mehrere ähnlich konzipierte Veröffentlichungen des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung²⁰ oder des ehemaligen Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung²¹, welches zum Beispiel in regelmäßigen Zeitabständen seine Hochwasserschutzfibel²² aktualisiert herausgibt. Auch auf der Ebene der Bundesländer existieren vergleichbare, einschlägige Publikationen zu Konzepten und Maßnahmen der Bauvorsorge.²³ Die Publikationen greifen dabei stets auf die grundlegende Darstellung von Gefährdungen, Schutzstrategien und Planungskonzepten zurück. Die Klassifizierung von Baustoffen hinsichtlich ihrer Widerstandsfähigkeit bei Überflutungen beschränkt sich in der Regel auf stark verkürzte und näherungsweise Kategorisierungen. Differenzierte Aussagen über die fachgerechte Planung oder Instandsetzung von Baukonstruktionen mit dem Ziel einer nachhaltig hohen Widerstandsfähigkeit gegenüber Hochwassereinwirkungen liegen derzeit nicht vor, das heißt bautechnische Optionen zur Verbesserung der Resilienz²⁴ relevanter Wohngebäudetypen wurden bisher nicht systematisch untersucht.

Brameshuber und Graubohm (2007) führten im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung Untersuchungen durch, um den „Einfluss einer intensiven und langzeitigen Wassereinwirkung auf die wesentlichen mechanischen Eigenschaften von Mauerwerksbauteilen“ experimentell abzuschätzen und zu beurteilen. Ihre Untersuchungen

²⁰ Vergleiche BBR (2004)

²¹ Zwischen den Jahren 2005 und 2013 war das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) als oberste Bundesbehörde für das Politikfeld Bauwesen verantwortlich. Direkter Vorgänger der Behörde war das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (BMVBW); direkter Nachfolger das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB).

²² Vergleiche BMUB (2015). Die Hochwasserschutzfibel ist die am häufigsten nachgefragte Fachpublikation des Bundes.

²³ Vergleiche zum Beispiel MUF (1998), MURL (1999) und UMBW (2003)

²⁴ Begriffserklärung im Glossar (siehe Abschnitt 10 ab Seite 228)

umfassten unter anderem die Prüfung der Druck- und Längszugfestigkeit verschiedener Mauerwerksziegel sowie die Biegehaftzugfestigkeit von Probekörpern, die aus mehreren Mauerwerksziegeln gefügt sind. Dabei bestimmen die Autoren die Änderungen der jeweils wesentlichen mechanischen Eigenschaften durch Wasserlagerung, vergleichend zu nicht wasserbeanspruchten Probekörpern.

Otto et al. (2009) veröffentlichten einen Forschungsbericht zur „Optimierung von Austrocknungsprozessen hochwassergeschädigter Bauteile unter Berücksichtigung der gängigen Trocknungsverfahren“, um „Sekundärschäden durch die Feuchtemigration in Bauteilen zu vermeiden“. Die Autorengruppe untersuchte auf der Grundlage hygrothermischer Simulationsrechnungen das Trocknungsverhalten ausgewählter Bauteile (i) bei natürlicher Belüftung, (ii) bei Einsatz von Kondensationsluftentfeuchtern und erhöhten Raumlufttemperaturen sowie (iii) bei Einsatz von Infrarotflächenheizungen.

Alfes und Schäfers (2014) betrachteten ausgewählte „bauphysikalische und mechanische Aspekte von Mauerwerk nach Flutkatastrophen“. In ihrem Artikel beschrieben die beiden Autoren verschiedene Methoden zur Trocknung überfluteter Bauteile, wobei insbesondere das Potential der natürlichen Trocknung durch Lüften und Heizen sowie die Möglichkeiten einer beschleunigten Trocknung durch maschinelle Unterstützung beleuchtet wurden. Die Autoren griffen hierfür auf die Befunde von Otto et al. (2009) zurück. In einem weiteren Kapitel widmeten sich die Autoren dem „Einfluss der Wasserbeaufschlagung auf die mechanischen Eigenschaften von Mauersteinen, Mörtel und Mauerwerk“. Ihre Erkenntnisse beziehen sich maßgeblich auf den bereits oben genannten Forschungsbericht von Brameshuber und Graubohm (2007).

Zur Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM (Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden) gehörte eine Broschüre, deren Gegenstand die „Gebäudeertüchtigung im Detail für den Klimawandel“ ist (Weller et al. 2013). Darin beschrieben die Autoren Methoden und Verfahren für die Analyse der Verletzbarkeit von Gebäuden und Baukonstruktionen gegenüber den Umwelteinwirkungen Sommerhitze, Starkregen, Überflutung

und Hagel. Darüber hinaus beinhaltet die Broschüre praxisrelevante Erkenntnisse, das heißt bau- und haustechnische Lösungsansätze, zur konkreten Klimaanpassung von Wohn- und Nichtwohngebäuden.

Golz et al. (2015) bewerten verschiedene objektbezogene Maßnahmen der Bauvorsorge im Hinblick auf ihre Effektivität zur Minderung von Hochwasserschäden an Wohngebäuden. Als Grundlage für diese Bewertung nutzen die Autoren eine vierstufige Erweiterung ihres synthetischen Ansatzes zur Abschätzung hochwasserinduzierter Schäden an Gebäuden. Die Autoren berücksichtigen verschiedene Bauvorsorgemaßnahmen, welche unterschiedlichen Wirkprinzipien zugeordnet werden können. Die Effektivität dieser Bauvorsorgemaßnahmen kann anhand eines veränderten Verlaufes analytisch abgeleiteter Schadensfunktionen beurteilt werden. Der in einem Zeitschriftenbeitrag vorgestellte, erweiterte Ansatz wurde in ein GIS-basiertes Hochwasserschaden-Simulationsmodell integriert und in der Fallstudie Heywood, Greater Manchester (Großbritannien) ausführlich getestet. Mit Hilfe des Hochwasserschaden-Simulationsmodells können die Effekte der objektbezogenen Implementierung von Bauvorsorgemaßnahmen auch für größere räumliche Skalen bestimmt werden.

2.1.2 Europäische und internationale Beiträge

Zu den wichtigen europäischen und internationalen Literaturquellen zählen in diesem Zusammenhang die nachfolgend chronologisch genannten Publikationen. Besonders auffällig ist, dass sich vorrangig britische Forschergruppen intensiv mit der Thematik des hochwasserangepassten Bauens auseinandersetzen.

Gamerith und Höfler (2006) untersuchten in einem österreichischen Forschungsvorhaben „Planungsgrundsätze für den präventiven Hochwasserschutz“. Die Autoren beschrieben sowohl „prinzipielle vorbeugende planerische Maßnahmen für Gebäude“ als auch „Kriterien und Vorgaben für Bausysteme und -konstruktionen“. Zudem entwickelten sie konkrete Vorschläge für die Ausführung von hochwasserangepassten Wand- und Fußbodenkonstruktionen sowohl für neu zu errichtende als auch für bereits bestehende Gebäude. Ihre Erkenntnisse leiteten die Autoren zum Teil aus empirischen Bauteilanalysen in einem Wasserbaulabor ab.

Ein Konsortium mehrerer britischer Forschungseinrichtungen erarbeitete 2007, vor dem Hintergrund zunehmender Hochwasserrisiken in vielen Regionen des Vereinigten Königreichs, einen Leitfaden für den Entwurf neu zu errichtender, hochwasserangepasster Gebäude.²⁵ Der Leitfaden nimmt zunächst Bezug auf drei Prinzipien der Bauvorsorge und beschreibt deren grundlegende Wirkungsweise.²⁶



Bild 1
Bowker et al. (2007) differenzieren Bauvorsorgemaßnahmen in Abhängigkeit von der zu erwartenden Überflutungshöhe (Abbildung verändert)

Darüber hinaus stellt der Leitfaden Werkzeuge zur Entscheidungsunterstützung zur Verfügung. In Abhängigkeit der zu erwartenden Überflutungshöhe und des statistischen Wiederkehrintervalls eines kritischen Hochwasserereignisses können somit planende Akteure geeignete Bauvorsorgemaßnahmen ableiten. Der Leitfaden enthält zudem Empfehlungen für den Entwurf der in Großbritannien dominierenden Außenwand-, Decken- und Fußbodenkonstruktionen. Die Ergebnisse sind in Bowker et al. (2007) veröffentlicht.

Die englische Studie Bowker (2007) greift die Forschungsergebnisse von Bowker et al. (2007) auf und verknüpft die darin formulierten Handlungsempfehlungen mit ökonomischen Aspekten. Die Autorin stellt kalkulierte Investitionskosten für vielfältige Maßnahmen der Bauvorsorge zusammen. Hierfür

²⁵ Zu diesem Konsortium gehörten HR Wallingford Ltd, Leeds Metropolitan University sowie WRc and Waterman Group.

²⁶ Abschnitt 2.2.2 enthält die Beschreibung der Bauvorsorgeprinzipien.

werden jedoch ausschließlich Kostenkennwerte aus Großbritannien verwendet. Zudem beschreibt die Autorin in der Studie die jeweiligen Vor- und Nachteile unterschiedlicher Maßnahmen im Hinblick auf die Präzision und Qualität ihrer Ausführung sowie die erforderlichen baulichen Randbedingungen. Eine Abschätzung des Nutzens bautechnischer Maßnahmen der Hochwasservorsorge im Sinne einer Bestimmung des geldwerten Vorteils wird jedoch nicht geführt. Eine Gegenüberstellung von Nutzen und Kosten ist somit nicht möglich.

Garvin und Kelly (2007) recherchieren charakteristische Schadensbilder an verschiedenen Konstruktionselementen von Gebäuden nach Überflutungsereignissen in einer Vielzahl vorrangig britischer Publikationen²⁷ und leiten daraus so bezeichnete Standardleistungen (englisch: „Flood repair standards for buildings“) für die bauliche Instandsetzung betroffener Konstruktionen ab. Die Empfehlungen der Autoren stützten sich hierbei auf zwei umfangreichen Richtlinien²⁸, welche den Stand der Technik im Hinblick auf die Wiederherstellung hochwassergeschädigter Gebäude in Großbritannien wiedergeben. Die Festlegung standardisierter Instandsetzungsleistungen folgt dem Grundsatz – je nach Hochwasserrisiko – die Schadensanfälligkeit der jeweiligen Baukonstruktion dauerhaft zu reduzieren und somit die Schäden bei zukünftigen Ereignissen zu mindern.

Der Aufsatz von Escarameia et al. (2007) entwickelt Empfehlungen für die Verwendung bestimmter Baustoffe für neu zu errichtende Wandkonstruktionen, um die negativen Auswirkungen von Hochwasser zu minimieren. Um diese Empfehlungen wissenschaftlich zu untermauern, führten die Autoren Laboruntersuchungen an 13 verschiedenen Wandkonstruktionen durch und ermittelten die jeweilige Leckage- und Trocknungsrate. Anhand dieser beiden zeitabhängigen Variablen wurden die Wandbaustoffe vergleichend bewertet. Darauf aufbauend leiten die Autoren, unter Berücksichtigung britischer Normen und Vorschriften für das Bauwesen, resiliente Wandkonstruktionen ab.

²⁷ Vergleiche zum Beispiel BRE 1991, Scottish Office (1996), BRE 1997, CIRIA 2004, CIRIA 2005

²⁸ Zu den beiden wesentlichen Richtlinien in Großbritannien zählen in diesem Zusammenhang CIRIA 2005 und BRE 2006.

In Escarameia et al. (2013) berichten die Autoren über die Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Technologien für den kosteneffizienten Hochwasserschutz der gebauten Umwelt“²⁹, welches durch das 7. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union gefördert wurde. Viele Leitlinien zum objektbezogenen Hochwasserschutz anerkennen die positiven Effekte von resilienten Materialien im Hinblick auf eine wirksame Schadensminderung. Die Autoren kritisieren jedoch, dass die Mehrzahl der verwendeten Klassifikationssysteme lediglich qualitative Merkmale berücksichtigen und dass die zugrundeliegenden Algorithmen weitgehend intransparent sind. Diese Defizite resultieren aus der sehr begrenzt verfügbaren Datenmenge über die Leistungsfähigkeit von Materialien, aus ungeeigneten beziehungsweise zu wenig erprobten methodischen Standards für die Prüfung hochwasserbeanspruchter Materialien sowie aus fehlenden Nutzen-Kosten-Untersuchungen. Ein wesentliches Forschungsziel zur Überwindung dieser Hindernisse und zur Verbesserung der Akzeptanz resilienter Materialien war die Erarbeitung von Vorschlägen für den Entwurf einer neuen europäischen Norm für hochwasserbeständige Gebäude und Materialien.

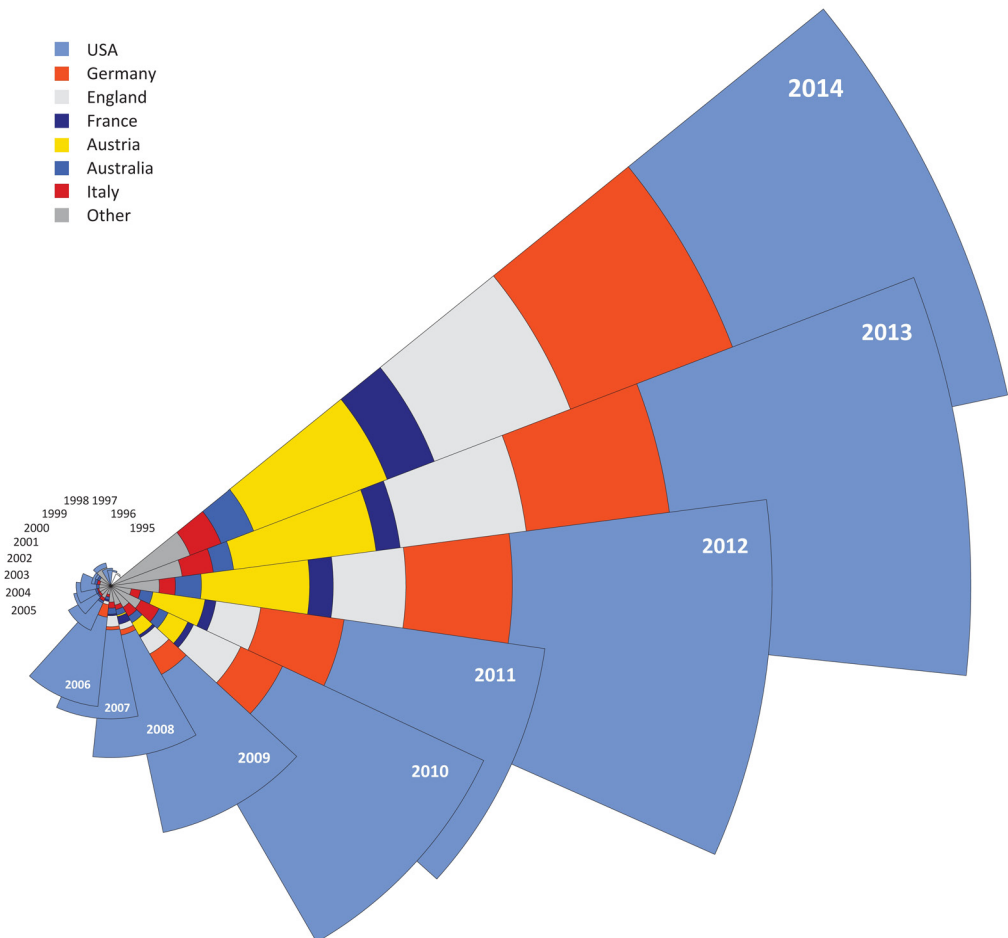
2.1.3 Zusammenfassung der Forschungslage

Das Potential bauvorsorgender Maßnahmen im Hinblick auf die Reduzierung von Hochwasserrisiken ist in der Literatur grundsätzlich unstrittig. Insbesondere aus diesem Grund nimmt die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Thematik zu. Das Ergebnis einer durchgeführten bibliometrischen Analyse wissenschaftlicher Fachpublikationen belegt unter anderem, dass die Häufigkeit von Zitierungen im Themenfeld „Schadensanfälligkeit von Gebäuden gegenüber Hochwasser“ zwischen 1995 und 2014 überproportional zunimmt (siehe Coxcomb-Diagramm in Bild 2).³⁰ Besonders häufig werden Autoren aus den USA sowie aus Deutschland und England zitiert. Die Literaturrecherche bestätigt jedoch auch Defizite in der Verfügbarkeit belastbarer Daten, um die

²⁹ Der englischsprachige Titel lautet: „Technologies for the cost-effective Flood Protection of the Built Environment“ (FloodProBE).

³⁰ Die drei englischsprachigen Schlagworte für die im Dezember 2014 durchgeführten bibliometrischen Analysen lauteten: „flood“, „vulnerability“ und „building“. Die Schlagworte sind konjunktiv verknüpft. Für die bibliometrische Analyse wurde das Web of Science des Institute of Scientific Information (ISI) genutzt.

Schadensanfälligkeit üblicher Außenwandkonstruktionen bewerten zu können. Mit zunehmender fachlicher Vertiefung, nimmt die Anzahl fundierter Quellen stetig ab, die Lösungsansätze auf baukonstruktiver Ebene anbieten.



Die Möglichkeiten baulicher Maßnahmen werden zwar thematisiert, allerdings fehlen quantitative Untersuchungen konkreter Effekte. In vielen Publikation werden baukonstruktive Optionen zur Minderung hochwasserinduzierter Schäden an Gebäuden nicht oder lediglich verkürzt dargestellt. Festzustellen ist demnach, dass eine systematische Beschreibung praxisgerechter, baukonstruktiver Optionen fehlt, insbesondere die Ausführung von Bauteilanschlüssen, wie etwa an Fenster- und Fassadensysteme, bleiben weitgehend unbeleuchtet.

Bild 2
Häufigkeit von Zitierungen im Themenfeld Schadensanfälligkeit von Gebäuden gegenüber Hochwasser zwischen 1995 und 2014 als Ergebnis einer bibliometrischen Analyse im Dezember 2014

Schlagworte:
+ flood
+ vulnerability
+ building

2.2 Stand der nationalen Praxis

2.2.1 Management von Hochwasserrisiken

Traditioneller Hochwasserschutz

Unter dem Druck wirtschaftlichen Wachstums genehmigten viele Städte und Kommunen in den zurückliegenden Dekaden bauliche Entwicklungen innerhalb der natürlichen Retentionsflächen von Flüssen, hier vor allem die Neuerschließung von Siedlungs-, Gewerbe- und Infrastrukturf lächen. Um diese Flächen vor Hochwassergefahren zu schützen, wurden der Ausbau und die Eindeichung von Flussläufen stetig vorangetrieben.³¹ Der Hochwasserschutz als hoheitliche Aufgabe von Bund, Ländern und Kommunen wurde bis in die 1980iger Jahre vorrangig durch bautechnische Anlagen sichergestellt.

Hochwasserschutz Paradigmenwechsel

Nach den Hochwasserereignissen 1993 und 1995 am Rhein und an dessen Nebenflüssen wurde jedoch begonnen, die bisherigen Strategien des Hochwasserschutzes in Frage zu stellen.³² Die Ereignisse offenbarten nicht nur Unzulänglichkeiten und Schwachstellen in der Hochwasservorsorge und bei der Organisation der Hochwasserabwehr, sie offenbarten vielmehr die Grenzen des traditionell vorherrschenden Sicherheitsdenkens in Bezug auf die Leistungsfähigkeit des technischen Hochwasserschutzes.³³ Daraus erwuchs die Erkenntnis, dass die Erreichung eines einheitlichen Sicherheitsniveaus in vielen Siedlungsgebieten weder technisch möglich noch wirtschaftlich angemessen ist.³⁴

Als Reaktion auf die Hochwasserereignisse im Einzugsgebiet des Rheins verabschiedete die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)³⁵ im Jahr 1995 ihre wegweisen-

³¹ Vergleiche Grünewald et al. (2003)

³² Vergleiche zum Beispiel Patt und Jüpner (2013, S. 11 ff.)

³³ Vergleiche Grünewald (2005)

³⁴ Das Sicherheitsniveau ist in Deutschland in der Regel auf ein 100-jährliches Hochwasser ausgerichtet (bundesrechtliches Bemessungshochwasser).

³⁵ Die LAWA ist ein Arbeitsgremium der Umweltministerkonferenz (UMK), welches sich aus den obersten Behörden für Wasserwirtschaft und Wasserrecht, als Vertreter der Länder, sowie dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), als Vertreter des Bundes, zusammensetzt.

den „Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz“³⁶. Darin werden drei wesentliche Handlungsfelder für einen nachhaltigen Hochwasserschutz beschrieben³⁷:

- Verbesserung des natürlichen Rückhalts³⁸
- Ausbau des technischen Hochwasserschutzes³⁹
- Stärkung der Hochwasservorsorge⁴⁰

Die LAWA-Leitlinien mündeten 1996 in der 6. Novelle des Wasserhaushaltsgesetzes⁴¹ (WHG), in dem der Bundesgesetzgeber erstmals die eigenverantwortliche Hochwasservorsorge jedes Einzelnen gesetzlich verankerte⁴². Unter dem Eindruck des verheerenden Elbe-Hochwassers 2002 wurde der nationale Gesetzgeber erneut aktiv und fügte 2005 neue Maßgaben⁴³ für einen vorbeugenden Hochwasserschutz unter anderem in das Wasserhaushaltsgesetz ein, die von den Bundesländern anschließend, unter Beachtung regionaler Aspekte, in Landesrecht umgesetzt wurden.

³⁶ Vergleiche LAWA (1995)

³⁷ Vergleiche auch StMUGV (2005)

³⁸ Der natürliche Wasserrückhalt kann zum Beispiel durch die Freihaltung von Überschwemmungsflächen, Auen oder die Aufforstung von Mischwäldern erhöht werden.

³⁹ Dem technischen Hochwasserschutz werden vorrangig die Errichtung und das Management bautechnischer Anlagen zugeordnet, wie etwa Talsperren, Deiche, Polder oder Rückhaltebecken.

⁴⁰ Das Handlungsfeld der Hochwasservorsorge berücksichtigt hierbei erstmals den zunehmenden gesellschaftlichen Einfluss auf die Entstehung von Schadensereignissen. Die Hochwasservorsorge soll der Entwicklung des Schadenpotentials in der Gesellschaft entgegenwirken beziehungsweise die Bewältigung der Schadensereignisse erleichtern (Wagner 2008). Nach LAWA (1995) zählen zu den Elementen der Hochwasservorsorge die Flächen-, Bau-, Risiko, Verhaltens- und Informationsvorsorge.

⁴¹ Vergleiche Wasserhaushaltsgesetz (WHG) 1996

⁴² In § 5 Abs. 2 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) ist die Eigenvorsorge als gesetzliche Pflicht definiert. Die Eigenvorsorge stellt somit einen wesentlichen Baustein neben den übrigen Maßnahmen der Hochwasservorsorge und des Hochwasserschutzes dar.

⁴³ Im Mai 2005 erließ der Bundesgesetzgeber das „Gesetz zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes“. Dieses Artikelgesetz nimmt Änderungen im Wasserhaushaltsgesetz, im Baugesetzbuch, im Raumordnungsgesetz, im Bundeswasserstraßengesetz, im Gesetz über den Deutschen Wetterdienst, im Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung und im Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz vor (siehe Merz et al. 2011).

Das Europäische Parlament und der Rat verabschiedeten im Oktober 2007 die „Richtlinie über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken“⁴⁴ mit dem Ziel, durch deren europaweite Anwendung das Risiko negativer Auswirkungen von Hochwasserereignissen dauerhaft zu reduzieren. Damit wurde der Paradigmenwechsel vom traditionellen Ansatz der defensiven Gefahrenabwehr zur systematischen Analyse und Bewertung komplexer Risikosituationen und zur Abwägung interdisziplinärer Handlungsoptionen endgültig vollzogen.⁴⁵ Eine Vielzahl von Publikationen beschreibt und diskutiert ausführlich diese gesamteuropäische Strategie eines integrierten Managementprozesses.⁴⁶ Im Verlauf mehrerer nationaler und europäischer Forschungsvorhaben⁴⁷ wurden, durch Einbindung unterschiedlicher Fachdisziplinen und verschiedener Akteure⁴⁸, verbesserte Instrumente des integrierten Hochwasserrisikomanagements entwickelt und implementiert. Mit der Einführung der EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie rückt die eigenverantwortliche Hochwasservorsorge noch stärker in den Vordergrund.⁴⁹

Strategien der Hochwasservorsorge

Das Hochwasserrisikomanagement greift die drei bereits 1995 in den LAWA-Leitlinien formulierten Handlungsfelder eines nachhaltigen Hochwasserschutzes (i) Vermeidung, (ii) Schutz und (iii) Vorsorge erneut auf und bedient sich einer Vielzahl interdisziplinärer Maßnahmen, um die nachteiligen

⁴⁴ Die europäische Richtlinie über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (EG-HWRM-RL 2007/60/EG) bildet die einheitliche Grundlage für ein integriertes Hochwasserrisikomanagement in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union. Die EG-HWRM-Richtlinie schreibt vor, flusseinzugsgebietsweise das Hochwasserrisiko zu bewerten und bei Betroffenheit Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten zu erstellen. Darauf aufbauend fordert die Richtlinie die Erarbeitung von Hochwasserrisikomanagementplänen.

⁴⁵ Vergleiche Heinrichs und Grunenberg (2007)

⁴⁶ Vergleiche Jüpner und Müller (2009), Merz et al. (2011)

⁴⁷ Auf nationaler Ebene sei insbesondere die BMBF-Förderaktivität "Risikomanagement extremer Hochwasserereignisse" (RIMAX) benannt, welche wissenschaftliche Methoden und Werkzeuge des Hochwasserrisikomanagements entwickelte und verknüpfte (Merz et al. 2011).

⁴⁸ Eingebunden sind etwa Experten der Stadt- und Regionalplanung, des Wasserbaus, des Bauingenieurwesens, der Versicherungswirtschaft und der jeweiligen Kommunen.

⁴⁹ Die EG-HWRM-RL wurde mit dem Gesetz zur Neuregelung des Wasserrechts vom 31.07.2009 in nationales Recht umgesetzt. Das neue Wasserhaushaltsgesetz (WHG) trat am 01.03.2010 in Kraft.

Folgen von Hochwasserereignissen zu mindern. In mehreren Publikationen werden vier grundsätzliche Strategien der Hochwasservorsorge differenziert und erläutert:⁵⁰

- Flächenvorsorge⁵¹
- Risikovorsorge⁵²
- Verhaltensvorsorge⁵³
- Bauvorsorge

Grundsätzlich ist keine dieser vier genannten Vorsorgestrategien als isoliertes Konzept aufzufassen. Vielmehr stellen diese Vorsorgestrategien Komponenten eines integralen Risikomanagements dar, welches von verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen und gesellschaftlichen Akteuren getragen wird. Innerhalb dieses Dissertationsvorhabens werden jedoch insbesondere die Aspekte der Bauvorsorge intensiv beleuchtet.

Der Bundesgesetzgeber ordnet in seinem Wasserhaushaltsgesetz⁵⁴ an, dass bei Neubauvorhaben in festgesetzten Überschwemmungsgebieten eine „hochwasserangepasste Ausführung“ sicherzustellen ist. Diese angepasste Ausführung gewährleistet, dass beim Eintritt des Bemessungshochwassers geringere bauliche Schäden an Gebäuden zu erwarten sind. Allerdings bleibt rechtlich ungeklärt, wie eine „hochwasserangepasste Ausführung“ im Detail aussieht.

⁵⁰ Vergleiche IKSR (2002), Grünewald et al. (2003), Suda und Rudolf-Miklau (2012)

⁵¹ Nach Suda und Rudolf-Miklau (2012) umfasst die Flächenvorsorge vorrangig die „aktive Bereitstellung und Bewirtschaftung von Flächen, von denen eine Schutzwirkung ausgeht (zum Beispiel Retentionsflächen, Schutzwald).“ Die Autoren argumentieren, dass die Freihaltung gefährdeter Gebiete die wirksamste Maßnahme zur Begrenzung des Schadenrisikos darstellt.

⁵² Die Risikovorsorge hat nach Suda und Rudolf-Miklau (2012) das Ziel „das Schadensausmaß und die Schadenslast für extreme Katastropheneignisse, denen mit anderen Schutzmaßnahmen nicht zur Gänze vorgebeugt werden kann, zu begrenzen oder auf alle Betroffenen auszugleichen zu verteilen. Wichtigste Elemente der Risikovorsorge sind Maßnahmen der Sicherheitsplanung, der Vorbereitung auf Ereignisse (Katastrophenmanagement) sowie die finanzielle Vorsorge.“

⁵³ Die Wirksamkeit der Verhaltensvorsorge hängt nach Suda und Rudolf-Miklau (2012) wesentlich von der „Entwicklung eines Gefahrenbewusstseins“ sowie „vom Erkennen der eigenen Handlungsmöglichkeiten“ von den Betroffenen ab.

⁵⁴ Vergleiche § 78 Abs. 3 Nr. 4 Wasserhaushaltsgesetz (WHG)

Das Bundeskabinett beschloss im Dezember 2008 die „Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel“⁵⁵. Es initiierte damit einen Prozess, in dem die Risiken des Klimawandels systematisch identifiziert, Handlungserfordernisse benannt und mögliche Anpassungsmaßnahmen konzipiert werden. Aufgrund der zukünftig erwarteten Häufung extremer Wetterereignisse und deren Folgen erlangt die Bauvorsorge einen „besonders hohen Stellenwert“. In der Anpassungsstrategie heißt es weiter, dass „die Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit von Baustoffen gegenüber extremen Witterungsereignissen in Zukunft vermutlich stärker bei Entscheidungen für oder gegen bestimmte Konstruktionen und Materialien berücksichtigt werden muss“.

Die LAWA hat in ihren „Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwasserrisikomanagementplänen“ im Jahr 2010 den „Handlungsbereich Bauvorsorge“ definiert, der die Teilbereiche „Hochwasserangepasstes Planen, Bauen und Sanieren“ sowie „Hochwasserangepasste Lagerung wassergefährdender Stoffe“ enthält.⁵⁶

2.2.2 Bauvorsorge als Strategie zur Minderung hochwasserinduzierter Schäden an Gebäuden

Neben dem übergeordneten Gebot Menschenleben vor Hochwassergefahren zu schützen, steht die Minderung hochwasserinduzierter Schäden an Gebäuden und Infrastrukturanlagen im Mittelpunkt des gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Interesses. Zu diesem Zweck entwickelten zahlreiche Städte und Gemeinden Konzepte zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes in denen nicht-strukturelle Maßnahmen⁵⁷, und hier vor allem die der

⁵⁵ Vergleiche Bundesregierung (2008)

⁵⁶ Vergleiche zum Beispiel Patt und Jüpner (2013)

⁵⁷ Hierunter wird ein breites Spektrum an Maßnahmen zusammengefasst, welches nicht dem technischen Hochwasserschutz zugeordnet werden kann, wie etwa Planungsinstrumente, Warnsysteme und Versicherungen. Darüber hinaus zählen Aspekte der Bauvorsorge ebenfalls zu den nicht-strukturellen Maßnahmen (Petry 2002, Kreibich et al. 2005).

Bauvorsorge, eine bedeutende Komponente bilden⁵⁸. Bisherige Publikationen über Maßnahmen der Bauvorsorge können im Wesentlichen differenziert werden in:

- Ereignisanalysen abgelaufener Überflutungen einschließlich der aufgetretenen Schäden, bei unterschiedlich intensiver Betrachtung bautechnischer Zusammenhänge⁵⁹
- vertiefende bautechnische Untersuchungen einzelner Fallbeispiele von überfluteten Gebäuden⁶⁰
- konzeptionelle Beschreibungen von bau- und haustechnischen sowie nutzungsspezifischen Maßnahmen der Bauvorsorge, welche grundsätzlich zur Verringerung von Hochwasserschäden beitragen⁶¹
- Leitlinien für die Beseitigung hochwasserinduzierter Schäden an Gebäuden⁶²

In der nationalen und europäischen Fachliteratur besteht grundsätzlich Einigkeit darüber, dass Maßnahmen der Bauvorsorge prinzipiell geeignet sind, um potentielle Hochwasserschäden an der Baukonstruktion von Gebäuden, an deren haustechnischer Ausstattung sowie an deren Inventar zu mindern. Dies gilt insbesondere für Gebäudestandorte, die durch häufig wiederkehrende Hochwasserereignisse gefährdet sind.⁶³ Dennoch setzen sich derartige Vorsorgemaßnahmen bislang lediglich zögerlich in der Praxis durch.

Ursächlich sind hierfür zum einen das weitgehend unklare Potential von Bauvorsorgemaßnahmen zur Schadensminderung und zum anderen die fehlenden baukonstruktiven Empfehlungen für die Umsetzung konkreter Maßnahmen an neu

⁵⁸ Ein Beispiel für die Integration baulicher Vorsorgemaßnahmen in ein ganzheitliches Konzept zur Verbesserung des vorbeugenden Hochwasserschutzes ist der „Plan Hochwasservorsorge Dresden“ (LH DD 2011). Darin bilden Maßnahmen der Bauvorsorge und des Objektschutzes eine wichtige Komponente, insbesondere in Gebieten in denen, trotz Implementierung anderer Hochwasserschutzmaßnahmen, ein Risiko der Überflutung verbleibt.

⁵⁹ Vergleiche zum Beispiel BfG (2002), LfULG (2004), Müller (2007), LfULG (2014)

⁶⁰ Zum Beispiel bautechnische Stellungnahmen über Hochwasserschäden an Einzelobjekten für den Versicherer.

⁶¹ Vergleiche CIRIA (2001), Grünewald et al. (2003), Bowker et al. (2007)

⁶² Vergleiche BRE (1997a), BRE (1997b), BRE (1997c), FEMA (1998), Garvin et al. (2005), BRE (2006)

⁶³ Vergleiche zum Beispiel LAWA (1995), IKS (2002), Kreibich et al. (2005), Zevenbergen et al. (2007)

zu errichtenden beziehungsweise bereits bestehenden Gebäuden.

Wirkprinzipien der Bauvorsorge

Alle Maßnahmen der Bauvorsorge können im Wesentlichen einem der drei folgenden, grundlegenden Wirkprinzipien zugeordnet werden, deren Bezeichnung in der deutschsprachigen Fachliteratur jedoch variiert (siehe Bild 3):

- Abschirmen / Ausweichen⁶⁴
- Widerstehen / Abdichten⁶⁵
- Nachgeben / Anpassen⁶⁶

1. Wirkprinzip: Abschirmen / Ausweichen

Unter dem Wirkprinzip Abschirmen / Ausweichen werden alle Maßnahmen subsumiert, mit denen das Hochwasser im Ereignisfall von der Gebäudehülle ferngehalten wird. Die Bandbreite derartiger Maßnahmen umfasst zum einen mobile⁶⁷ oder permanente Barriersysteme im Außenbereich, mit deren Hilfe sowohl Einzelgebäude als auch Quartiere oder Stadtteile abgeschirmt werden können. Zum anderen reichen die Maßnahmen, vorrangig relevant für Neubauvorhaben, von einer erhöhten Anordnung von Gebäuden beziehungsweise von Gebäudeteilen⁶⁸ über den Verzicht einer

⁶⁴ Der Bericht der IKSR (2002) oder Merz et al. (2011) nutzen den Begriff Abschirmen für Maßnahmen, die den Zweck verfolgen, Hochwasser von Gebäuden fernzuhalten. In anderen Publikationen wie zum Beispiel Grünewald et al. (2003) oder Naumann et al. (2015) wird für dieses Wirkprinzip hingegen der Begriff Ausweichen verwendet.

⁶⁵ Die Studie Grünewald et al. (2003) und DWA (2016) greifen auf den Begriff Widerstehen zurück, während zum Beispiel IKSR (2002) den Terminus Abdichten gebrauchen.

⁶⁶ Einige Publikationen, zum Beispiel Grünewald et al. (2003) und Merz et al. (2011) greifen auf den Begriff Nachgeben zurück. Zunehmend häufiger wird in diesem Kontext jedoch der Begriff Anpassen zum Beispiel von BMUB (2015) oder DWA (2016) verwendet.

⁶⁷ Zu den mobilen Hochwasserschutzsystemen zählen sowohl (i) planmäßige Systeme, welche anhand der zu erwarteten Einwirkungen an ihrem bestimmungsgemäßen Einsatzort bemessen sind, als auch (ii) operative Systeme (sog. Sandsackersatzsysteme), welche vorrangig für die Hochwasserabwehr im Ereignisfall eingesetzt werden (Mueller 2010).

⁶⁸ Grundsätzlich sollten Neubauvorhaben ausschließlich außerhalb festgesetzter Überschwemmungsgebiete umgesetzt werden. Stehen diesem Grundsatz belastbare Argumente entgegen, können Aufschüttungen oder Aufständungen (Stützen, Stelzen) das für die Überflutung eines Gebäudes erforderliche Höhenniveau anheben. Ein Beispiel für die planvolle Errichtung einzelner oder mehrerer Wohngebäude auf künstlichen Geländeerhöhungen (so bezeichnete Warften) zum Schutz vor Hochwasser sind die Halligen im Nordfriesischen Wattenmeer.

Unterkellerung bis hin zur planvollen Verlagerung hochwertiger Nutzungsbereiche aus potentiell hochwassergefährdeten Geschossen (vertikales Ausweichen). Grundsätzlich sollten Neubauvorhaben jedoch ausschließlich außerhalb festgesetzter Überschwemmungsgebiete umgesetzt werden (horizontales Ausweichen). In seltenen Fällen werden diesem Wirkprinzip auch amphibische Gebäude zugeordnet, welche derart konstruiert und ausgestattet sind, dass sie ihre Höhenlage bei Hochwasserereignissen verändern und auf der ansteigenden Wasseroberfläche schwimmen können. In der englischsprachigen Literatur wird für das skizzierte Wirkprinzip häufig der Begriff „Avoidance“ verwendet.

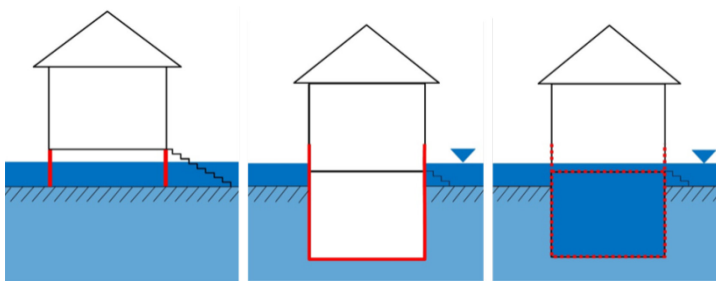


Bild 3

Wirkprinzipien der Bauvorsorge

Abschirmen / Ausweichen
Widerstehen / Abdichten
Nachgeben / Anpassen

Quelle: IÖR

Das Prinzip Widerstehen / Abdichten umfasst sämtliche Maßnahmen, die den Eintritt von Oberflächen- oder Grundhochwasser in das Gebäude bis zu einer zuvor festgelegten Überflutungshöhe zeitlich stark verzögern oder vollständig verhindern sollen. Zu diesen Maßnahmen zählt zunächst die systematische Planung und Ausführung wasserdichter Wandenkonstruktionen, welche der vergleichsweise intensiven Beanspruchung durch Hochwasser oder Grundhochwasser widerstehen. Ergänzt werden die Maßnahmen durch die Verwendung geeigneter Barriersysteme für den temporär wasserdichten Verschluss von Gebäudeöffnungen⁶⁹ und Wanddurchdringungen⁷⁰ sowie durch Rückstausicherungen

**2. Wirkprinzip:
Widerstehen / Abdichten**

⁶⁹ Mehrere Hersteller bieten eine Vielzahl temporärer Barriersysteme auf dem Markt an, welche den Eintritt von Flutwasser durch Fenster, Türen oder Lichtschächte in das Gebäude bis zu einer festgelegten Überflutungshöhe verzögern beziehungsweise verhindern sollen. Die zuverlässige Verwendung derartiger Systeme hängt jedoch maßgeblich von den jeweiligen baukonstruktiven Randbedingungen an dem gefährdeten Gebäude ab, so dass die Möglichkeit ihrer zielgerichteten Verwendung zuvor geprüft werden muss.

⁷⁰ Besondere Sorgfalt bei der Planung und Ausführung erfordern vor allem die Abdichtung von Bewegungsfugen (DIN 18195-8) sowie von Durchdringungen, Übergängen und Abschlüssen (DIN 18195-9), da sie häufig lokale Schwachstellen im Abdichtungssystem darstellen.

in Entwässerungssystemen. Alle Maßnahmen setzen voraus, zuvor den zu erwartenden maximalen Hochwasserstand am Gebäude festzulegen, um alle durch drückendes Wasser von außen beanspruchten Bauteile abgrenzen und in das Abdichtungskonzept einbeziehen zu können. Die planmäßige Abdichtung von Gebäuden erfordert jedoch die gesonderte fachliche Betrachtung der Auftriebssicherheit⁷¹ sowie die Berücksichtigung hydrostatischer Druckkräfte, die infolge kritischer Wasserstandsdifferenzen zwischen der Außen- und der nicht gefluteten Innenseite auf die Gebäudehülle einwirken und zu deren statischem Versagen führen können. Eine übliche Empfehlung ist daher, den Wassereintritt in das Gebäude bei Überflutungshöhen größer als 90 cm zuzulassen⁷², um strukturelle Schäden am Baukörper weitgehend zu vermeiden. Differenzierte rechnerische Nachweise sind jedoch in kaum einer Publikation geführt, die Empfehlung basiert lediglich auf Durchschnittswerten. Einige Literaturstellen verwenden für dieses Wirkprinzip auch den Begriff der Resistenz als Synonym für Widerstehen. Die englischsprachige Literatur überschreibt diese Maßnahmen mit dem Begriff „Dry flood proofing“ beziehungsweise „Resistance“.

**3. Wirkprinzip:
Nachgeben / Anpassen
Konzept der Resilienz**

Das Prinzip Nachgeben / Anpassen verfolgt das Ziel, nicht „gegen das Wasser zu arbeiten“, sondern eine planmäßige Überflutung von Gebäuden oder Gebäudeteilen zuzulassen. Dem Wirkprinzip werden grundsätzlich alle Maßnahmen zugeordnet, welche die negativen Folgen, wie etwa den Umfang hochwasserinduzierter Schäden an der Baukonstruktion, der Gebäudetechnik sowie dem Inventar, mindern, sollte Wasser in das Gebäude eindringen. In mehreren Lite-

⁷¹ Bei nicht geflutetem Gebäudevolumen können infolge des Sohlwasserdrucks kritische Auftriebskräfte auftreten, welche das Eigengewicht des Gebäudes übersteigen. Die resultierende vertikal gerichtete Kraft führt in diesen Fällen zum Aufschwimmen des Gebäudes. Diese Lageveränderung kann den Verlust der Standsicherheit des Bauwerks zur Folge haben. Darüber hinaus müssen alle Bauteile, wie etwa Gründungskonstruktionen oder Außenwände, entsprechend der zu erwartenden hydrostatischen Druckkräfte nach den einschlägigen Fachnormen bemessen werden. Zudem ist das Risiko des hydraulischen Grundbruchs, durch das kontinuierliche Abpumpen zuströmenden Grundwassers in das Gebäude, zu überprüfen.

⁷² Vergleiche zum Beispiel FEMA (1998), Kelman und Spence (2004)

raturquellen wird in diesem Kontext das Konzept der Resilienz⁷³ als Strategie zur Anpassung eingeführt, um mit Hochwassergefahren umzugehen. Die Ergebnisse einer europaweiten Untersuchung von White et al. (2013) belegen, dass die verantwortlichen Akteure im Hochwasserrisikomanagement das Konzept der Resilienz zunehmend als einen integralen Bestandteil eines Risikomanagementprozesses anerkennen. Da das Konzept der Resilienz jedoch themenübergreifend in unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen verwendet wird, ist dessen Verständnis zum Teil mehrdeutig und nicht klar bestimmt⁷⁴.

In Bezug auf die gebaute Umwelt definieren Naumann et al. (2010) und Lawson (2011) Resilienz als „die Fähigkeit eines Gebäudes, sich schnell von den nachteiligen Folgen eines Hochwasserereignisses zu erholen.“ Anders formuliert, ist die Resilienz eines Gebäudes ein Maß dafür, wie schnell und vor allem mit welchem erforderlichen Aufwand sich seine planmäßige Nutzung nach einem Hochwasserereignis wiederherstellen lässt. Zu den Maßnahmen dieses Wirkprinzips gehören primär die Anpassung besonders schadensrelevanter Bauteile, wie etwa Wand-, Decken- und Fußbodenkonstruktionen, um notwendige Leistungen für die Schadensbeseitigung nach einem Hochwasserereignis signifikant zu reduzieren (englisch: flood resilient buildings). Während des Entwurfsprozesses geeigneter Baukonstruktionen, welcher auf qualitativen, labortechnischen oder numerischen Analysen und Bewertungen vielfältiger Schadensprozesse basiert, werden nicht nur wasserbeständige oder wasserunempfindliche Baustoffe berücksichtigt, sondern auch deren Wechselwirkungen, welche sich aus ihrer zielgerichteten Integration in Schichtenfolgen unterschiedlicher Konstruktionselemente ergeben. Darüber hinaus sind die erforderlichen Methoden und Techniken ihres Fügens und Verbindens in die Fachplanung einzubeziehen, um zukünftig nachteilige Folgen zu mindern. Wichtige bautechnische Parameter sind in diesem Zusammenhang etwa der Wassereindringwiderstand, der Wasserdampfdiffusionswiderstand und die Porosität, welche maßgeblich das Trocknungsverhalten eines Baustoffes mitbestimmen. Das Prinzip Nachgeben / Anpassen, das heißt die hochwasserangepasste Bauweise, wird in

⁷³ Begriffsbestimmung im Glossar (siehe Abschnitt 10 ab Seite 228)

⁷⁴ Brand und Jax (2007) veröffentlichten eine Übersicht zehn verschiedener Definitionen von Resilienz.

überflutungsgefährdeten Siedlungsbereichen zunehmend planvoll angewendet, um die physische Vulnerabilität⁷⁵ von Gebäuden zu mindern und somit das verbleibende Risiko nachteiliger Folgen auf ein tolerierbares Maß zu reduzieren. In der englischsprachigen Fachliteratur wird das Wirkprinzip durch den Terminus „Wet flood proofing“ geprägt.

Tabelle 1

Qualitative Zuordnung der unterschiedlichen Hochwasserparameter und der Wirkprinzipien der Bauvorsorge nach Zevenbergen et al. (2007) (modifiziert)

 grau geeignet
 weiß weniger geeignet

	Wirkprinzipien der Bauvorsorge		
	Abschirmen / Ausweichen	Widerstehen / Abdichten	Nachgeben / Anpassen
häufige Überflutungsereignisse			
seltene Überflutungsereignisse			
große Überflutungshöhe			
geringe Überflutungshöhe			
hohe Fließgeschwindigkeiten			
niedrige Fließgeschwindigkeiten			

Auswahl Wirkprinzipien

Die Wahl eines der drei Bauvorsorgeprinzipien zur Schadensminderung orientiert sich zum einen

- an dem statistischen Wiederkehrintervall eines Hochwassers mit bestimmter Ereignisstärke, das heißt bestimmter Überflutungstiefe und Fließgeschwindigkeit, und zum anderen
- an den objektspezifischen Rand- und Rahmenbedingungen im Hinblick auf das vorhandene beziehungsweise zu planende baukonstruktive Gefüge und die vorgesehene Nutzung.

Zevenbergen et al. (2007) entwickelten eine kompakte Matrixstruktur, die eine einfache Orientierung bei der Auswahl eines geeigneten Wirkprinzips der Bauvorsorge ermöglicht. Die Matrix in Tabelle 1 enthält eine qualitative Zuordnung der unterschiedlichen Hochwasserparameter und der Wirkprinzipien der Bauvorsorge.

⁷⁵ Begriffsbestimmung im Glossar (siehe Abschnitt 10 ab Seite 228)

2.2.3 Allgemein anerkannte Regeln der Technik

Technische Vorschriften und Normen

Im Kontext des hochwasserangepassten Bauens stehen vom Deutschen Institut für Normung keine einschlägigen Normen und technischen Regelwerke zur Verfügung. Der Lastfall Hochwasser ist bei der Bemessung und Ausführung üblicher Bauteile von Wohngebäuden nicht normativ geregelt.

Orientierung bieten in diesem Zusammenhang jedoch technische Vorschriften, welche die Abdichtung von Gebäuden gegen von außen drückendes Wasser regeln. Für die Ausführung wasserdichter Wannenkonstruktionen (Gründungs-, Wand- und Deckenkonstruktionen), die der Abdichtung gegen drückendes Wasser dienen, können zwei grundsätzliche Ausführungsarten unterschieden werden:

- Schwarze Wannen nach DIN 18195-6:2011-12
Abdichtung gegen von außen drückendes Wasser und aufstauendes Sickerwasser als Ausführung mit Hilfe wasserundurchlässiger Baustoffe, wie etwa Bitumen-, Kunststoff- oder Elastomerbahnen
- Weiße Wannen nach DIN EN 1992-1-1:2011-01
Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, DIN EN 206-1:2001-07 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität sowie nach der DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton

Um das Verhalten einiger Baustoffe bei intensiver Wassereinwirkung einschätzen zu können, bietet zum Beispiel die DIN EN 12087:2013-06 Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Wasseraufnahme bei langzeitigem Eintauchen einen Ansatzpunkt. In dieser Europäischen Norm sind Prüfmethode für das teilweise und vollständige Eintauchen von Wärmedämmstoffen in Wasser geregelt. Das teilweise Eintauchen simuliert die Wasseraufnahme, die sich bei langzeitigem Einwirken von Wasser ergibt. Das vollständige Eintauchen kann zwar nicht direkt mit den Anwendungsbeanspruchungen verglichen werden, es wurde aber als entsprechende Prüfbedingung für bestimmte Produkte bei manchen Anwendungen anerkannt.

Merkblätter und Richtlinien

Neben dem Deutschen Institut für Normung, dessen Empfehlungen der Gesetzgeber zum Teil zur Anwendung verordnet, haben zahlreiche weitere private Vereine, Verbände und Vereinigungen fachspezifische Merkblätter, Richtlinien und Stellungnahmen unter dem Eindruck der zurückliegenden Hochwasserereignisse in Deutschland erarbeitet und veröffentlicht. Aus der nachfolgenden, nicht vollständigen und nicht sortierten Darstellung kann keine Reihenfolge im Sinne einer auf- beziehungsweise absteigenden Priorität abgeleitet werden.

Der Bundesverband Deutscher Fertigbau e.V. argumentiert in einer Stellungnahme 2014, dass für Fertigbauten in Holzbauweise keine Nachteile im Hinblick auf eine wirtschaftliche Instandsetzung nach einem Hochwasserereignis gegenüber Wohngebäuden in Massivbauweise zu erwarten sind. Der Verband bezieht sich in seinen Darlegungen wiederum auf eine Publikation von Klaus Peter Schober von der HFA (Holzforschung Austria) der eine „rasche Sanierung von Holzhausbauten und Fertighäusern nach Hochwasser [für] möglich“ hält.⁷⁶

Der Gesamtverband der Dämmstoffindustrie (GDI) veröffentlichte im Juli 2013 einen fachwissenschaftlichen Artikel über „Das Verhalten von Dämmungen bei Hochwasser“.⁷⁷ Darin werden das Baustoffverhalten bei Überflutung, potentielle Schadensbilder sowie das Trocknungsverhalten üblicher Dämmstoffe beschrieben.

Die Richtlinienreihe 6004 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) thematisiert im Blatt 1 den Schutz der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) vor der Naturgefahr Hochwasser.⁷⁸ Die Richtlinie beschreibt Methoden zur Risikobewertung, hochwasserangepasste TGA-Installationen sowie Maßnahmen während und nach einem Schadenereignis. Die Richtlinienreihe dient jedoch nicht als allgemeine Vorschrift für die Wiederinbetriebnahme gebäudetechnischer Anlagen nach einem Hochwasserereignis.

⁷⁶ Holzhausbauten und Fertighäuser im Hochwasser von Klaus Peter Schober (HFA) in Holzforschung und Holzverwertung 4/02, S. 73

⁷⁷ Vergleiche Holm et al. (2013)

⁷⁸ Vergleiche VDI (2006)

3 Hochwasserangepasste Bauweisen

3.1 Überblick

Im Gegensatz zu den Bauvorsorgestrategien Abschirmen / Ausweichen und Widerstehen / Abdichten, bei denen versucht wird, Flutwasser vom Gebäude fernzuhalten beziehungsweise am Eindringen in das Gebäude zu hindern, strebt die hochwasserangepasste Bauweise von Gebäuden an, die negativen Konsequenzen bei einer nicht zu verhindernden Hochwasserbeanspruchung zu begrenzen.

Hochwasserangepasstes Bauen bildet daher eine zunehmend bedeutende dritte Strategie der Bauvorsorge. Sie dient dem Zweck, potentielle Schäden an der Bausubstanz von Gebäuden bei einem Überflutungsereignis zu mindern, so dass der Umfang der erforderlichen baulichen Maßnahmen zur Schadensbeseitigung reduziert und die schnelle Wiederherstellung der planmäßigen Nutzung des Gebäudes gewährleistet werden kann. Dies kann insbesondere bei gewerblich genutzten Objekten von sehr hoher Bedeutung sein.

Um dieses Ziel zu erreichen, können wasserbeständige beziehungsweise wasserunempfindliche Baustoffe verwendet und zielgerichtet in flutgefährdeten baukonstruktiven Schichtenfolgen, wie etwa Decken-, Fußboden-, Außenwand- oder Innenwandkonstruktionen, integriert werden. Die Konzeption hochwasserangepasster Baukonstruktionen ist jedoch komplex und erfordert daher in der Regel die Einbindung von Fachplanern, die zum Beispiel durch die Ingenieur- und Architektenkammern vertreten werden. Oberhalb der hochwassergefährdeten Gebäudebereiche ist eine ortsübliche Bauweise weiterhin möglich.

Um das breite Spektrum des hochwasserangepassten Bauens zu beleuchten, beinhalten die folgenden drei Abschnitte

- typische Schadensbilder, die nach einem Hochwasserereignis in Gebäuden dokumentiert werden können,
- die feuchtetechnischen Eigenschaften üblicher Wandbaustoffe sowie
- das Verhalten baukonstruktiver Schichtenfolgen unter Hochwasserbeanspruchung.

3.2 Schadensbilder

Alle wesentlichen Schadensbilder an der Bausubstanz von Gebäuden, die infolge von Überflutungsereignissen auftreten können, lassen sich folgenden vier Schadenstypen zuordnen:

- Feuchte- und Wasserschäden
- Salzschäden
- Schäden infolge Kontamination
- strukturelle (konstruktive) Schäden

Feuchte- und Wasserschäden

Feuchte- und Wasserschäden treten bei jedem Hochwasserereignis auf, sobald unangepasste Gebäude und deren Bauteile von anstehendem beziehungsweise eindringendem Flutwasser betroffen sind. Zu den charakteristischen Schadensbildern zählen zum Beispiel sichtbare Durchfeuchtungen und Wasserstandlinien, Salzkristallisationen an Bauteiloberflächen, feuchte- und frostbedingte Form- und Volumenveränderungen sowie abgelöste Beschichtungen. Als weitere mögliche Folgeschäden können unter anderem Festigkeitsverluste, Verringerung der Wärmedämmeigenschaften, Befall durch Mikroorganismen (Pilze, Bakterien), pflanzliche Holzschädlinge oder Korrosionserscheinungen auftreten.

Salzschäden

In unmittelbarer Verbindung mit den Feuchte- und Wasserschäden stehen insbesondere bei Mauerwerkskonstruktionen oftmals auch Schäden durch bauschädliche Salze. Völckner (2003) folgend, kommen Salze in künstlichen Mauersteinen entweder als Eigensalze infolge der Umwandlung von Bindemitteln vor oder sie werden von außen durch den Transport von Feuchtigkeit dem Mauerwerk zugeführt. Als schadensrelevant gilt in diesem Zusammenhang insbesondere der Nachweis leicht wasserlöslicher Salze, wie etwa Sulfate⁷⁹, Chloride⁸⁰, Nitrate⁸¹ und Karbonate⁸². Salze beeinflussen stets das Gefüge und die Eigenschaften kapillarporöser Mauerwerksbaustoffe. Bei der Trocknung kristallisieren zum Beispiel wassergelöste Salze unter Vergrößerung ihres Volumens. Der daraus resultierende Kristallisationsdruck führt zu einer „Zermürbung“ des Baustoffgefüges.

⁷⁹ Zum Beispiel Ettringit, Kalzium-, Magnesium- oder Natriumsulfat

⁸⁰ Zum Beispiel Natrium- oder Kalziumchlorid

⁸¹ Zum Beispiel Kalisalpeter, Kalzium- oder Magnesiumnitrat

⁸² Zum Beispiel Kalium-, Natrium- oder Kalziumkarbonat

Salzablagerungen auf Bauteiloberflächen sind als Ausblühungen sichtbar. Diese Ausblühungen entstehen die in der Regel durch den Kapillartransport leicht löslicher Salze aus dem Bauteilinneren an die Oberfläche und durch die nachfolgende Verdunstung des Wassers sowie durch die Kristallisation des Salzes. Sulfat- und Nitratausblühungen können durch Abmehlungen, Putzablösungen oder Gefügeveränderungen zu optischen Beeinträchtigungen und Substanzschäden führen. Salze beeinflussen darüber hinaus die Gleichgewichtsfeuchte von Baustoffen. Wird bei ausreichendem Salzgehalt und Zunahme der relativen Luftfeuchte diejenige Feuchtemenge in den Poren eines Baustoffes erreicht, die auch für die Bildung einer gesättigten Salzlösung erforderlich ist, steigt die Gleichgewichtsfeuchte des Baustoffes bei vielen Salzarten sprunghaft an. Zudem sinkt in diesem Zusammenhang der Diffusionswiderstand.

Flutwasser kann als Lösungs- und Transportmittel für chemische oder biologische Schadstoffe (zum Beispiel Heizöl) dienen. Konzentrierte Schadstoffe, die im Flutwasser nicht hinreichend verdünnt vorliegen, belasten die Bausubstanz bei direktem Kontakt und führen in vielen Fällen zu erheblichen Kontaminationschäden, die von den Gebäudenutzern häufig durch eine intensive Geruchsbelästigung wahrgenommen werden können. Die nachhaltige Beseitigung von Verunreinigungen und die Wiederherstellung eines hygienisch unkritischen Zustandes sind in der Regel mit einem erhöhten technischen und finanziellen Aufwand verbunden. Der erforderliche Umfang baulicher Maßnahmen kann hierbei bis zum vollständigen Austausch kontaminierter Baukonstruktionen führen.

Kontamination

Eine große Vielfalt möglicher Schadensbilder ist den strukturellen Schäden zuzuordnen. Die Intensität der Schäden an der Bausubstanz steht – neben der Überflutungshöhe – in Zusammenhang mit der einwirkenden Fließgeschwindigkeit und kann bis zur Gefährdung der Standsicherheit des Gebäudes beziehungsweise von Gebäudeteilen führen. Zur Systematisierung struktureller Schäden ist eine Untergliederung in die folgenden drei Teilbereiche empfehlenswert:

Strukturelle Schäden

- Gründungsschäden
- Schäden durch hydrostatischen Druck oder Auftrieb
- sonstige hochwasserbedingte Überlastungen von Bauteilen

Gründungsschäden

Gründungsschäden an bestehenden Gebäuden treten im Hochwasserfall vor allem dann auf, wenn Gründungsabschnitte durch Erosion und Kolkung unterspült werden. Zu den Gründungsschäden zählen weiterhin Setzungen von Gebäuden oder Gebäudeteilen, die durch Verformungen des stark durchfeuchteten Baugrundes hervorgerufen werden. Typische Schadensbilder sind zum Beispiel Risse in Wandkonstruktionen oder Verformungen und Schiefstellungen von Gebäudeteilen.

Strukturelle Schäden

Strukturelle Schäden durch hydrostatische Druckkräfte oder statischen Auftrieb betreffen vorwiegend Gebäude oder Gebäudeteile, bei denen während eines Hochwasserereignisses größere nicht geflutete Bauwerksvolumina von Grund- oder Oberflächenwasser umschlossen werden. Für den Fall, dass große Wasserstandsunterschiede zwischen Gebäude und Umgebung zu erwarten sind, sollten statische Nachweise erbracht werden, welche (i) die Standsicherheit der Gebäudehülle belegen und (ii) die resultierenden Auftriebskräfte mit den maßgebenden Gebäudelasten vergleichen. Die Standsicherheit der Gebäudehülle hängt neben der Überflutungshöhe auch von Faktoren wie zum Beispiel der Länge der Wandscheibe zwischen aussteifenden Querwänden oder der Deckenkonstruktion ab. Die Problematik des statischen Auftriebs ist auch auf baukonstruktiver Ebene zu beachten.⁸³ So tritt bei überfluteten Fußbodenkonstruktionen nicht selten ein Schadensmechanismus auf, bei dem die Auftriebskraft überfluteter Wärmedämmstoffe die Auflast der darüber liegenden Schichtenfolge und des Inventars übersteigt. In der Folge schwimmt die gesamte Fußbodenkonstruktion auf, was in vielen Fällen zu deren Zerstörung führt.

Sonstige hochwasserbedingte Überlastungen

Zu sonstigen hochwasserbedingten Überlastungen von Bauteilen zählen insbesondere Anprallschäden durch Treibgut oder Schäden durch stark erhöhte Eigenlasten durchfeuchteter Baustoffe.⁸⁴

⁸³ Überflutete Bauteilschichten erzeugen statische Auftriebskräfte. Der Betrag der vertikal nach oben gerichteten Auftriebskraft ist proportional zu dem von der Bauteilschicht verdrängten Volumen des Wassers. Für die Schadensprognose maßgebend ist der Quotient aus der resultierenden Auftriebskraft und der ihr entgegen gerichteten Gewichtskraft der Bauteilschicht. Bei einem Quotienten größer als eins besteht die Gefahr des Aufschwimmens. Zwischen der Überflutungshöhe und dem statischen Auftrieb besteht kein Wirkungszusammenhang.

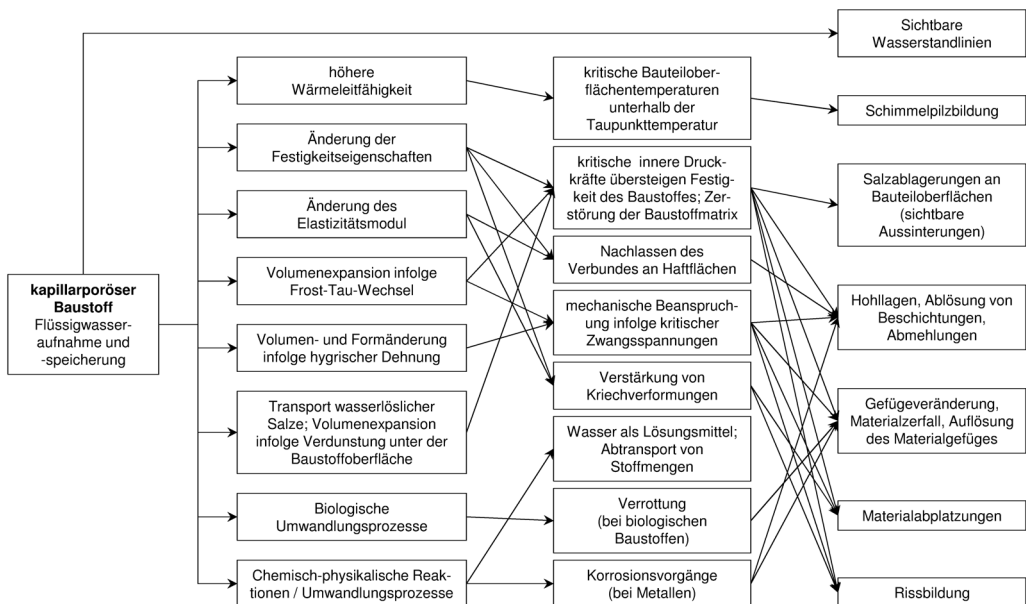
⁸⁴ Vergleiche zum Beispiel Naumann und Rubin (2008)

3.3 Verhalten üblicher Wandbaustoffe bei Hochwassereinwirkung

3.3.1 Überblick

Baustoffe werden bei Überflutung temporär sehr intensiv durch drückendes Wasser beansprucht, so dass ihre Feuchtegehalte sehr stark zunehmen können. Die Eigenschaften der verwendeten Baustoffe bestimmen im Überflutungsfall wesentlich deren jeweilige Schadensanfälligkeit.

In Abhängigkeit der Rohstoffzusammensetzung, des Herstellungs- und Verarbeitungsprozesses sowie des Verwendungszwecks im Gebäude verfügen typische Baustoffe jeweils über spezifische Eigenschaften insbesondere hinsichtlich ihrer Dichte, ihres Hohlraumanteils (Porosität) oder ihrer Festigkeit.



Mit dem Feuchtegehalt korreliert eine Vielzahl von Materialeigenschaften, wie zum Beispiel Festigkeit, Verformungsverhalten, Dimensions- beziehungsweise Volumenstabilität oder Wärmeleitfähigkeit.⁸⁵ Bild 4 zeigt ausgewählte Wirkungsketten, das heißt wesentliche Schadensprozesse, mit denen die Zusammenhänge zwischen dem erhöhten Was-

Bild 4

Ausgewählte Wirkungsketten, das heißt wesentliche Schadensprozesse, mit denen die Zusammenhänge zwischen dem erhöhten Wassergehalt kapillarporöser Baustoffe und den sich daraus ergebenden möglichen negativen Folgen abgebildet werden.

⁸⁵ Vergleiche zum Beispiel Breit und Adams (2013, S. 242)

sergehalt kapillarporöser Baustoffe und den sich daraus ergebenden möglichen negativen Folgen abgebildet werden. Die Schadensprozesse beziehen Bezüge zwischen einzelnen Prozessen mit ein, weshalb auch Mehrfach-, Wechsel- und kumulative Wirkungen erhöhter Feuchtegehalte identifizierbar sind.

Tabelle 2

Kapillare Leitfähigkeit verschiedener Porenarten in Abhängigkeit des Porenradius nach Maier (2012).

Porenart	Porenradius r in [m]	Kapillareigenschaften
Mikroporen	$< 10^{-7}$	keine kapillare Leitfähigkeit
Kapillarporen	$10^{-7} - 10^{-4}$	kapillare Leitfähigkeit
Makroporen	$> 10^{-4}$	kapillarbrechend

Das Wasseraufnahme-, Wassertransport-, Wasserspeicher- sowie Wasserabgabevermögen⁸⁶ üblicher Baustoffe wird dabei wesentlich von den charakteristischen Merkmalen Porenvolumen⁸⁷, Porengeometrie, Porenradius und Porengrößenverteilung bestimmt.⁸⁸ So ist zum Beispiel die kapillare Wasseraufnahme nur dann möglich, wenn die im Baustoffgefüge vorhandenen Poren zugänglich sind und einen bestimmten Radius nicht über- oder unterschreiten (vergleiche Tabelle 2). Größere Makroporen (Luftporen) füllen sich hingegen nur bei lang anhaltender Wasserbeanspruchung beziehungsweise wenn die Wasseraufnahme unter Druck erfolgt, das heißt erzwungen wird. Kleinere Mikroporen sind lediglich für Wasserdampf durchlässig, so dass die kapillare Wasseraufnahme nicht möglich ist. Aus diesem Grund bedingt eine Überflutung bei verschiedenen Baustoffen unterschiedliche Feuchtegehalte.

⁸⁶ Die grundlegende Beschreibung der Speicher- und Transportmechanismen kapillarporöser Baustoffe und deren Abhängigkeit vom Wassergehalt geht auf einen Artikel von Rose (1963) zurück.

⁸⁷ Das Porenvolumen ist der Anteil aller Poren am Gesamtvolumen des Baustoffs. Das scheinbare Porenvolumen gibt an, welcher Porenraum auf kapillarem Weg zu erreichen ist. Das Porenvolumen und das scheinbare Porenvolumen werden auch durch die Begriffe Wasserkapazität und Sättigungsfeuchte beschrieben. Die Wasserkapazität ϕ_k (m^3/m^3) entspricht dem Feuchtigkeitsgehalt, der sich bei kapillarer Wasseraufnahme einstellt. Der kapillar füllbare Porenraum, bezogen auf das Volumen der Probe, ist in der Regel kleiner als die tatsächliche Porosität. Die Sättigungsfeuchte beschreibt ϕ_s (m^3/m^3) den Feuchtegehalt, der sich einstellt, wenn alle Poren und Kapillaren gefüllt sind.

⁸⁸ Vergleiche zum Beispiel Maier (2012)

Die spezifische kapillare Leistungsfähigkeit zählt zu den bedeutendsten Baustoffparametern für die Einschätzung des Verhaltens bei Hochwasserbeanspruchung. Die kapillare Leistungsfähigkeit definiert Maier (2012) als Produkt aus der maximalen kapillaren Steighöhe und der Sauggeschwindigkeit.⁸⁹ Feinporige Baustoffe nehmen Wasser zwar langsamer in ihr Gefüge auf, aufgrund der Kapillarstruktur (kleine Kapillarradien) erreicht es aber eine größere Steighöhe. Umgekehrte Rückschlüsse zieht Maier (2012) für grobporige Baustoffe. Die kapillare Steighöhe und die Sauggeschwindigkeit sind mathematisch bestimmbar.⁹⁰

Ein weiterer materialspezifischer Parameter für die Beschreibung der kapillaren Wasseraufnahme ist der Wasseraufnahmekoeffizient A_W . Er gibt die beim Eintauchen eines Baustoffes in Wasser aufgesaugte Wassermenge, bezogen auf die Saugfläche an.⁹¹

Baustoff	ρ in [kg/m ³]	Φ in [V.-%]	ψ_f in [V.-%]
Vollziegel	1.610	40	21
Hochlochziegel	930	52	24
Kalksandstein	1.750	34	25
Beton	1.950	26	22
Porenbeton	610	69	39
Granit	2.620 – 2.850	0,4 – 1,5	0,4 – 1,4
Quarzsandstein	2.640 – 2.720	0,5 – 25	0,5 – 24
Marmor	2.700 – 2.900	0,5 – 2,0	0,4 – 1,8

Tabelle 3

Rohdichte ρ , Porosität Φ und freie Wassersättigung ψ_f für ausgewählte Wandbaustoffe.

Im folgenden Abschnitt werden die jeweiligen feuchtetechnischen Eigenschaften verschiedener Baustoffklassen, wie etwa Natursteine, Ziegel und andere keramische Produkte, zement-, kalk- und gipsgebundene Baustoffe, Dämmstoffe, Holz und Holzwerkstoffe sowie Metalle und Gläser, differenziert dargestellt.

⁸⁹ Die Gleichungen für die Bestimmung der kapillaren Steighöhe enthält zum Beispiel Hohmann et al. (2004, S. 154 ff.).

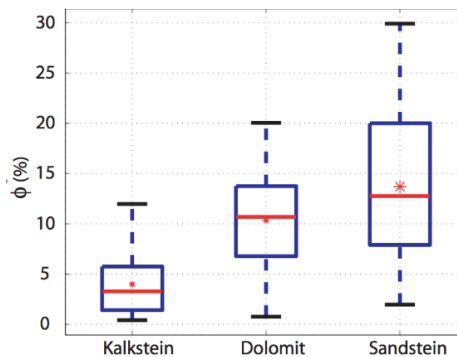
⁹⁰ Vergleiche zum Beispiel Krus (1995)

⁹¹ Eine präzisere Definition des Wasseraufnahmekoeffizienten enthält Abschnitt 7.4.2 auf Seite 132.

3.3.2 Natursteine

Die feuchtetechnischen Eigenschaften der im Hochbau früher sehr häufig verwendeten Natursteine werden wesentlich durch ihren Entstehungsprozess (Genese) bestimmt. So verfügen zum Beispiel Sedimentgesteine, wie etwa Ton, Sand-, Kalk- oder Dolomitstein, häufig über ein poriges, kapillaraktives Gefüge, welches Wasser aufnehmen, speichern und weiterleiten kann. Die Porositätseigenschaften der Sedimentgesteine sind jedoch sehr heterogen und in Abhängigkeit der Gesteinsart von sehr unterschiedlichen Variationsbreiten geprägt.⁹² Während einige Sandsteinarten über Porenraumanteile zwischen 2 und 30 V.-% verfügen, streuen die Hohlraumanteile üblicher Kalksteine lediglich zwischen 1 und 12 V.-% (siehe hierfür Bild 5).

Bild 5
Porosität ϕ (in V.-%) der Hauptsedimentgesteinstypen Kalkstein, Dolomit und Sandstein nach Koch et al. (2006).



Die möglichen negativen Folgen erhöhter Feuchtegehalte werden zudem vom Mineralbestand bestimmt. Quellfähige Bestandteile, wie zum Beispiel Tonminerale, oder lösliche Mineralbestandteile, wie etwa kalkhaltige Mineralien, Eisen- oder Manganoxide, erhöhen die Schadensanfälligkeit. Viele magmatische Gesteine (Magmatite) mit hoher Festigkeit und Rohdichte ($\rho = 2,5 \text{ kg/m}^3$), wie etwa Basalt, Granit, Porphyr, Syenit oder Diorit, sind hingegen praktisch porenfrei und nehmen Wasser daher lediglich über feine Klüfte, Risse sowie über verwitterte Gesteinspartien in ihr Gefüge auf. Die Porosität der genannten, bauüblichen Magmatite schwankt in einem eng begrenzten Wertebereich zwischen 0,5 und 5 V.-%. Manche metamorphe Gesteine, wie etwa Tonschiefer, Gneis oder Marmor, sind weitgehend porenarm. Aus diesem Grund ist ihr Wasseraufnahmevermögen baupraktisch ebenfalls als unkritisch zu bewerten.

⁹² Vergleiche Koch et al. (2006)

3.3.3 Ziegel und andere keramische Produkte

Die Bedeutung künstlich erzeugter Ziegel für den Mauerwerksbau stieg mit Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert sprunghaft an.⁹³ Die gesetzlich verankerten bauphysikalischen Anforderungen an Ziegelmauerwerk, etwa im Hinblick auf den Schall- und Wärmeschutz, bedingen oftmals die Verwendung künstlich erzeugter, gebrannter Ziegel mit sehr geringer Rohdichte, die sowohl durch einen hohen Porenanteil in den Ziegelscherben als auch durch einen hohen Anteil an Lochflächen bezogen auf die Lagerfläche, zum Beispiel Hoch- oder Langlöcher, Griffmulden und Mörtelta-schen, erreicht wird. Somit kann ein gut wärmedämmendes und wasserdampfdurchlässiges Gefüge erzielt werden. In der Planungsphase hochwasserangepasster Wandkonstruktionen aus Ziegelmauerwerk ist jedoch zu berücksichtigen, dass die skizzierten bauphysikalischen Anforderungen spezifische Materialeigenschaften bedingen, die im deutlichen Widerspruch zu denen im Überflutungsfall geeigneten Baustoffparametern stehen. Aufgrund des vorhandenen – und zur Einhaltung der Wärmeschutzanforderungen notwendigen – Poren- und Hohlraumvolumens nehmen Mauersteine mit geringer Ziegelroh-dichte im Überflutungsfall vergleichsweise viel Wasser auf, da ihr Porensystem aufgrund der mehrheitlich vorhandenen Kapillarporen sehr saugfähig ist. Mit sinkender Rohdichte reduziert sich zudem in den überwiegenden Fällen jedoch auch die Festigkeit und Frostbeständigkeit der Ziegel.

Grundsätzlich können die feuchtetechnischen Eigenschaften von Ziegeln und anderen keramischen Produkten während des Herstellungsprozesses gesteuert werden. So hat zum Beispiel die Brenntemperatur einen wesentlichen Einfluss auf ihre Dichtigkeit gegenüber Wasser. Mit steigender Brenntemperatur verdichtet sich das Gefüge der keramischen Produkte und der Porenanteil nimmt ab. Diese zunehmend glasartige Struktur kann dann lediglich noch geringe Wassermengen aufnehmen. Zu den keramischen Produkten mit dichtem Gefüge zählen etwa Klinker oder Vollziegel mit

⁹³ Friedrich Hoffmann baute 1859 den ersten Ringofen, der eine industrielle Fertigung von Mauerziegeln ermöglichte. Dieser veränderte Produktionsprozess gewährleistete die massenhafte und preiswerte Herstellung von Mauerziegeln für das Bauwesen mit hoher Qualität und Maßhaltigkeit. Die weitere Erhöhung der Brenntemperatur führte zur Herstellung von Klinkern mit sehr dichtem Gefüge.

hoher Rohdichte, die im Hochbau häufig als Außenschale von mehrschaligem Mauerwerk beziehungsweise als Außenwandbekleidung verwendet werden und insbesondere dem Schlagregenschutz dienen. Weitere keramische Werkstoffe mit Relevanz für das Bauwesen sind Wand- und Bodenfliesen, deren Gefüge ebenfalls sehr dicht und somit praktisch wasserundurchlässig ist.

3.3.4 Zement- und kalkgebundene Baustoffe

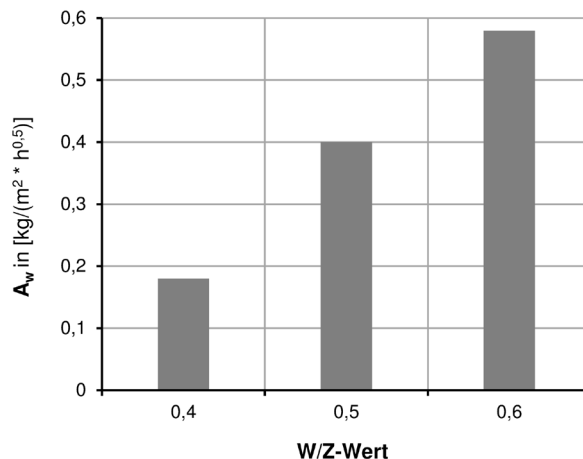
Zu den häufig eingesetzten, mineralisch gebundenen Baustoffen mit den anorganischen Bindemitteln Zement oder Kalk zählen etwa Beton mit normaler oder leichter Gesteinskörnung, Porenbeton, Kalksandsteine, Hüttensteine sowie der überwiegende Teil der Mauer- und Putzmörtelarten.

Überblick

Bild 6

Wasseraufnahmekoeffizient A_w von Beton in Abhängigkeit vom Wasserzementwert (w/z-Wert).

Quelle: in Anlehnung an ETHZ (2002)



Porenstruktur

Diese Baustoffe verfügen in der Regel über eine porige, hydrophile Struktur, welche die Wasseraufnahme, den Wassertransport und die Wasserspeicherung begünstigt. Die Porosität und Porenstruktur dieser Baustoffe, das heißt die Porengröße und deren Verteilung, können jedoch über ihre Rezeptur an die jeweiligen Erfordernisse angepasst werden, so dass sich wasserabweisende beziehungsweise wasserundurchlässige Baustoffe herstellen lassen. Zum Beispiel hat der Wasserzementwert (w/z-Wert) von Beton einen erheblichen Einfluss auf die Porosität des erhärteten Zementsteins und ist somit von hoher Bedeutung für dessen Festigkeit, Dauerhaftigkeit und Wasseraufnahmevermögen (siehe Bild 6). Je geringer der in der Rezeptur eingestellte w/z-Wert ist, desto geringer ist der Anteil des im erhärteten Zementstein vorhandenen Kapillarporenraums und desto geringer ist die Flüssigwasseraufnahme.

WU-Beton

Zu beachten ist, dass es sich bei dem so bezeichneten wasserundurchlässigen Beton nicht um einen Baustoff sondern vielmehr um eine Bauweise handelt, bei der die konstruktiven Betonbauteile neben ihrer lastabtragenden auch die abdichtende Funktion gegenüber drückendem Wasser übernehmen. Erst durch das planmäßige Zusammenwirken

- von Beton mit niedrigem Porenvolumen,
- einer beanspruchungsgerecht geplanten Bewehrungsführung zur Beschränkung von Rissbreiten,
- von besonderen Maßnahmen zur Abdichtung von Fugen und Durchdringungen sowie
- die Gewährleistung bauteilspezifischer Mindestdicken

wird ein Bauteil mit hohem Wassereindringwiderstand erzielt. Die WU-Bauweise wird zum Beispiel zur Herstellung von wasserundurchlässigen Gründungskonstruktionen, so bezeichnete Weiße Wannen, eingesetzt. Ein zweites Beispiel für den Einfluss der Rezeptur auf das Porengefüge des Betons, genauer des Zementsteins, ist die verwendete Zementart. Betone mit Hochofenzement zeigen etwa bei gleicher Nachbehandlung gegenüber Betonen mit Portlandzement ein dichteres Gefüge mit höherem Gel- und geringerem Kapillarporenanteil.⁹⁴

Leichtbeton

Zu der Materialgruppe der zementgebundenen Baustoffe gehören zudem Leichtbetone, deren Trockenrohddichte auf einen Wert zwischen 800 und maximal 2 000 kg/m³ eingestellt ist. Je nach Zusammensetzung beziehungsweise Herstellungsverfahren werden

- gefügedichte und haufwerksporige Leichtbetone,
- Porenleichtbetone sowie
- Porenbetone

differenziert. Für die Herstellung eines gefügedichten Leichtbetons werden leichte Gesteinskörnungen verwendet, die aufgrund ihrer Porosität über geringere Kornrohddichten verfügen. Haufwerksporige Leichtbetone werden hingegen durch das gezielte Auslassen oder Reduzieren einzelner Korngruppen in der Sieblinie der Gesteinskörnung hergestellt, so dass nach dem Verdichten des Leichtbetons definierte Hohlräume (Haufwerksporen) in der Baustoffmatrix

⁹⁴ Vergleiche Stark und Wicht (2013, S. 21).

verbleiben. Die Zementleimmenge ist so eingestellt, dass die Gesteinskörnung lediglich umhüllt und punktwiese verkittet wird. Je nach Erfordernis können Gesteinskörnungen mit dichtem oder porigem Gefüge in der Rezeptur berücksichtigt werden. Zu den häufig verwendeten leichten Gesteinskörnungsarten mit porigem Gefüge zählen etwa Blähton oder Bimsstein. Nach Buss (2002, S. 414) nehmen haufwerksporige Baustoffe, bei denen die festen Bestandteile ein dichtes Gefüge aufweisen, kapillar kein Wasser auf. Einen bedeutenden Anwendungsfall haufwerksporiger Leichtbetone bilden insbesondere gering wärmeleitende Hohlblocksteine im Mauerwerksbau.

**Porenleichtbeton /
Schaumbeton**

Porenleichtbeton beziehungsweise Schaumbeton verfügt gegenüber Normalbeton planmäßig über einen erhöhten Luftporengehalt, der durch die Verwendung von Schaumbildner erzeugt wird.

Porenbeton

Porenbeton ist ein Baustoff mit sehr hoher Porosität ϕ (Porenanteil bis zu 90 V.-%), der vielfach als Plansteine beziehungsweise als großformatige Planelemente im Mauerwerksbau oder als bewehrte Wand- und Deckenelemente im Fertigteiltbau eingesetzt wird. Das Porenbetongefüge enthält sowohl Kapillarporen, welche die Wasseraufnahme an der Steinoberfläche begünstigen, als auch abgeschlossene, kugelförmige Makroporen, deren Luftfüllung wiederum ein sehr rasches, weiteres Eindringen von Wasser verzögert. Das komplexe Porensystem des Porenbetons bedingt zwar einerseits, aufgrund der überwiegend vorhandenen Makroporen, den langsameren Wassertransport ins Innere, andererseits wird die Trocknung durchfeuchteter Bauteile gebremst, da der Feuchtetransport zurück zur Baustoffoberfläche ab einem bestimmten Feuchtegehalt ausschließlich durch Dampfdiffusion erfolgen kann.

Kalksandstein

Kalksandsteine und kalkgebundene Hüttensteine verhalten sich bei Feuchtebeanspruchung ähnlich wie der Porenbeton. Ihre Kapillaraktivität ist aufgrund der vorliegenden Porengrößenverteilung gering ausgeprägt, so das Wasser nur langsam aufgenommen wird. Da der Baustoff jedoch grundsätzlich über ein hohes Porenvolumen verfügt, stellen sich bei langer Einwirkdauer dennoch sehr hohe Wassergehalte im Baustoff ein.

Mineralisch gebundene Dünnbettmörtel mit hohen Anteilen organischer Zusätze, die vorrangig der besseren Verarbeitbarkeit des Mörtels dienen, können bei intensiver Feuchtebeanspruchung ihre Festigkeit deutlich herabsetzen.⁹⁵ Es besteht daher die normative Forderung nach einer Eignungsprüfung, die nachweist, dass der Dünnbettmörtel seine Festigkeit nach Feuchtlagerung um maximal 30 % reduziert.⁹⁶

3.3.5 Gipsgebundene Baustoffe

Zu den im Überflutungsfall schadensanfälligen Baumaterialien gehören gipsgebundene Baustoffe wie Calciumsulfat-Estriche, Gipsputze oder Gipsfaserplatten. Derartige Baumaterialien verfügen grundsätzlich über einen vergleichsweise hohen Wasseraufnahmekoeffizienten und erweisen sich darüber hinaus als besonders feuchteempfindlich. Sie sind damit für intensive Feuchteinwirkungen ungeeignet. So neigen etwa Calciumsulfat-Estriche unter langfristiger Durchfeuchtung zunächst zu irreversiblen Quellverformungen sowie später auch zu Festigkeitsverlusten.

3.3.6 Dämmstoffe

Zu einem Problemfeld in überfluteten Gebäuden zählen zahlreiche Dämmstoffarten, welche sowohl für den Wärme- als auch für den Schallschutz eingesetzt werden. Der primäre Einsatzzweck dieser Dämmstoffe erfordert grundsätzlich eine geringe Wärmeleitfähigkeit, was stets mit einer geringen Rohdichte und einem hohen Hohlraumvolumen einhergeht. Diese im Normalfall unerlässlichen Materialeigenschaften erweisen sich jedoch im Überflutungsfall als problematisch, weil einige Dämmstoffe große Wassermengen aufnehmen, ihre Formstabilität verlieren und nicht beziehungsweise nur mit unwirtschaftlichem Aufwand getrocknet werden können.

Zu den verbreiteten Wärmedämmstoffen, die nach einer Überflutung in der Regel auszutauschen sind, zählen etwa

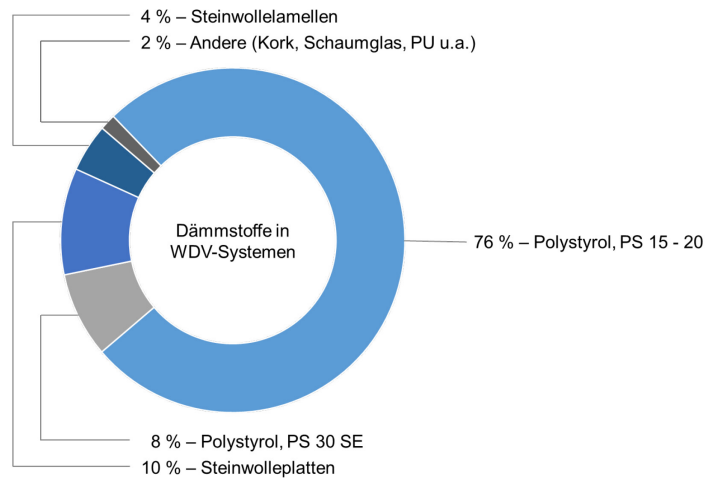
⁹⁵ Vergleiche Wendehorst (2015, S. 441)

⁹⁶ DIN V 18580 fordert im Alter von 28 Tagen eine Mindestdruckfestigkeit nach Feuchtlagerung von 70 % der Mörtelfestigkeit

Mineralfaserdämmstoffe⁹⁷, Holzweichfaserplatten, Zelluloseflocken (Einblasdämmung) oder pflanzliche Faserdämmstoffe.⁹⁸ Schaumkunststoffe wie zum Beispiel Polystyrol-Hartschaumplatten nehmen bei üblicher Feuchtebeanspruchung zwar grundsätzlich lediglich geringe Wassermengen in ihrer Porenstruktur auf, erfahren jedoch unter langfristiger, intensiver Wassereinwirkung auch eine starke Feuchtebelastung.

Bild 7

Verteilung der verwendeten Dämmstoffe in Wärmedämm-Verbundsystemen im Zeitschnitt 1978 bis 2013 aus Fachverband WDVS (2012) zitiert in Sprengard et al. (2013). Insgesamt wurde in dem genannten Zeitraum eine Fläche von etwa 900 Millionen Quadratmeter WDVS ausgeführt.



3.3.7 Holz und Holzwerkstoffe

Einige der im Hochbau verbreiteten Baustoffe weisen spezifische Materialeigenschaften auf, welche im Überflutungsfall besondere Maßnahmen erfordern. Dies gilt etwa für Bauteile aus dem organischen Baustoff Holz, welche im Zusammenhang mit anhaltend hohen Feuchtebelastungen insbesondere durch pflanzliche Holzschädlinge wie den Echten Hauschwamm oder den Weißen Porenschwamm gefährdet sind. Infolge dessen sind solche Bauteile nach einem Flutereignis umgehend freizulegen und auszutrocknen, was stets mit dem umfangreichen Rückbau von Bekleidungen und anderen umgebenden Bauteilen verbunden ist. Weiterhin sind

⁹⁷ Hierzu zählen auf Grund ihrer hohen baupraktischen Relevanz insbesondere Mineralwolle-Putzträgerplatten oder Mineralwolle-Lamellenplatten.

⁹⁸ Infolge hoher Wassergehalte kann sich das Bindemittel (Kunstharz) in Wärmedämmplatten aus Mineralwolle lösen und somit den Faserverbund erheblich schwächen. Dies führt zu einem Verlust der Querkugfestigkeit und Formstabilität der Dämmstoffplatten. Dieser Effekt wird durch erhöhte Temperaturen, etwa durch intensive Sonneneinstrahlung, unterstützt. Vergleiche zum Beispiel Fechner (2008).

Holzbauteile unter Hochwassereinwirkung charakteristischen Quell- und Schwindverformungen ausgesetzt. Aber auch typische Holzwerkstoffe wie Spanplatten, OSB-Platten, Furnierschichtholz-Platten oder Sperrholzplatten erleiden während einer Überflutung irreversible Verformungen und müssen in der Regel ausgetauscht werden.

3.3.8 Metalle und Gläser

Homogene Baumaterialien aus Metall oder Glas, darunter auch geschäumtes Glas mit geschlossenen Zellen, sind aufgrund ihrer Materialstruktur nicht quellfähig und undurchlässig für Wassermoleküle, das heißt sie nehmen kein Wasser in ihr Gefüge auf. Aus diesem Grund zeigen sie auch keine Quell- oder Schwindverformungen. Im baupraktischen Einsatz treten Metalle und Gläser in der Regel in komplexeren Bauprodukten auf, woraus trotz ihrer grundlegenden Robustheit wiederum spezifische Instandsetzungsmaßnahmen resultieren, wie etwa die Reinigung, die Prüfung und gegebenenfalls Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit und des Korrosionsschutzes.

3.4 Verhalten von Wandkonstruktionen bei Überflutung

Bei der Planung hochwasserangepasster Bauteile⁹⁹ sind jedoch nicht nur die spezifischen Eigenschaften der Baustoffe zu berücksichtigen, sondern auch ihre Integration in die stets mehrschichtigen, mitunter auch mehrschaligen Schichtenfolgen¹⁰⁰ typischer Baukonstruktionen. Hierbei werden verschiedene Baustoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften so kombiniert, dass jeder eine spezifische Funktion, wie etwa Lastabtragung, Wärme- oder Wetterschutz, optimal erfüllen

Überblick

⁹⁹ Der Terminus Bauteil beschreibt in diesem Kontext den gesamten Wandaufbau mit seinen vielfältigen Schichtenfolgen. Die systematisch gefügten Schichten werden als Komponenten des jeweiligen Wandaufbaus bezeichnet. Jäger et al. (2013) verwenden anstelle des Begriffs Bauteil den Begriff Baugruppe.

¹⁰⁰ Nach Jäger et al. (2013) wird als Schicht eine Ebene im Wandaufbau bezeichnet, die sich durch ihr Material von den angrenzenden Ebenen unterscheidet.

kann. Die verschiedenen Materialien sind in der Regel, insbesondere im Mauerwerksbau, fest und unlösbar miteinander verbunden.¹⁰¹

Ziel

Das Ziel ist die Begrenzung kritischer Wasseransammlungen in den Bauteilen durch eine sinnvoll abgestimmte Materialwahl, beanspruchungsgerecht komponierte Schichtenfolgen und planmäßig festgelegte Schichtstärken. Während der Planungsphase sollte folglich immer das Verhalten des gesamten Bauteils unter Hochwassereinwirkung berücksichtigt werden, da die Optimierung einzelner Schichten nur dann sinnvoll ist, wenn dadurch die Robustheit der gesamten Materialfolge erhöht wird.

Beanspruchung

Wandkonstruktionen werden durch Hochwasser zeitweise sehr intensiv beansprucht, sofern nicht Abdichtungs- oder Barriersysteme den direkten Wasserkontakt verhindern. Die Bauvorsorgestrategie der hochwasserangepassten Bauweise berücksichtigt den Lastfall, dass Flutwasser beidseitig sowohl auf Außen- als auch auf Innenwandkonstruktionen einwirkt.

Die Mehrzahl der traditionellen sowie die Gesamtheit der modernen Wandkonstruktionen sind, aufgrund der vielfältigen Nutzungsanforderungen hinsichtlich des Wärme-, Feuchte- und Schallschutzes, mindestens mehrschichtig, mitunter sogar mehrschalig ausgeführt. Während bei einschaligen Wandkonstruktionen im Überflutungsfall zunächst die jeweils außen liegenden Schichten beansprucht werden, gelangt bei mehrschaligen Wandkonstruktionen Flutwasser weitgehend ungehindert hinter die äußere Konstruktionschale, so dass die innere Schale ebenfalls unmittelbar durch anstehendes Wasser beansprucht wird. Alle Hohlräume oder Luftschichten in der Materialfolge von Außen- und Innenwandkonstruktionen, welche ein Hinterlaufen oder Ansammeln von Wasser begünstigen, sollten demnach vermieden werden.

¹⁰¹ Zu den typischen Materialkombinationen im Mauerwerksbau zählen zum Beispiel Stein-Mörtel-Stein oder Rohbaukonstruktion-Putz. Vergleiche zum Beispiel Jäger et al. (2013).

Werden die Wandkonstruktionen durch anstehendes Hochwasser beansprucht, nehmen zunächst die äußeren Konstruktionsschichten Wasser in ihr frei zugängliches Kapillarsystem auf, bis der freie Wassergehalt u_f erreicht ist. Mit zunehmender Überflutungsdauer beziehungsweise unter Druckeinwirkung steigt der Feuchtegehalt in betroffenen Konstruktionsschichten weiter an, bis alle Poren vollständig wassergesättigt sind. Aufgrund verschiedener Transportvorgänge gelangt das Wasser in Abhängigkeit von der material-spezifischen kapillaren Leitfähigkeit, der ausgeführten Schichtdicke und der Einwirkungsdauer im Bauteilinneren von einer Materialschicht zur nächsten. Neben dem horizontalen Wassertransport ist zudem der vertikale Aufstieg der Feuchtigkeit in der Konstruktion zu beachten, die bis zu 50 cm über den Wasserstand am Gebäude hinaus ansteigen kann. Um hohe Wassergehalte in Außen- und Innenwandkonstruktionen zu vermeiden, sollte das kapillare Wasseraufnahmevermögen insbesondere der äußeren Konstruktionsschicht möglichst gering sein. Anzustreben ist, dass diese außen angeordneten Baustoffe wasserundurchlässig ausgeführt werden. Im Hinblick auf die genannten Kriterien zur Bewertung der Verletzbarkeit üblicher Baustoffe beziehungsweise typischer Baukonstruktionen erweisen sich besonders einschalige Wandkonstruktionen als ideal geeignet, die vorrangig aus Baustoffen mit sehr geringem Wasseraufnahmevermögen hergestellt sind. Dem gegenüber stehen jedoch die vielfältigen gesetzlich verankerten Anforderungen, unter anderem an die energetische Qualität der Außenwandquerschnitte in hochwertig genutzten Gebäuden, die in den überwiegenden Fällen vielschichtige Wandquerschnitte bedingen.

Zu den Wandbaustoffen des Rohbaus, welche aufgrund ihrer spezifischen Materialeigenschaften (unter anderem geringere Wasseraufnahmekoeffizienten) im Überflutungsfall eine geringe Schadensanfälligkeit aufweisen, zählen Stahlbetonkonstruktionen, einschaliges Mauerwerk aus keramischen oder mineralisch gebundenen Mauersteinen von hinreichender Rohdichte und bei historischen Gebäuden auch einschaliges Natursteinmauerwerk, etwa aus magmatischem Gestein oder Sedimentgestein hoher Rohdichte, mit gutem Formschluss und ohne erhöhten Hohlraumanteil. Da die Ausführung derartig robuster Wandkonstruktionen jedoch unter dem Gesichtspunkt der Energieeinsparung so nicht mehr zulässig ist, optimiert man beim Neubau sowie beim

Systemverhalten bei Wasserbeanspruchung

Mehrschichtige und mehrschalige Außenwandkonstruktionen

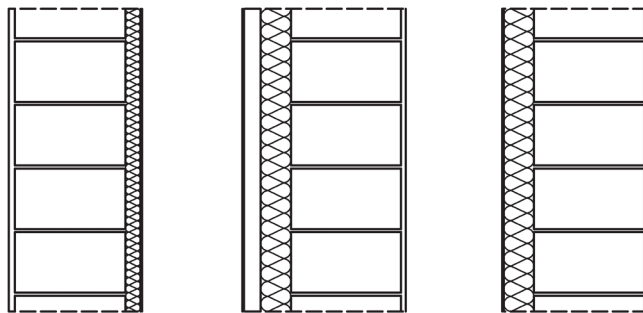
Bauen im Bestand den Wärmedurchlasswiderstand der Wandquerschnitte, indem

- zusätzliche Wärmedämmstoffe mit besonders geringer Wärmeleitfähigkeit in den Wandquerschnitt integriert werden (Polystyrol-Hartschaum, Mineralwolle, organische Dämmstoffe usw.) oder
- die Wärmeleitfähigkeit homogener Wandbaustoffe durch einen erhöhten Lochflächen- und Porenanteil im Bauprodukt (Leichtlochlochziegel, Porenbeton, zementgebundene Blähtonsteine usw.) optimiert, das heißt vermindert wird.

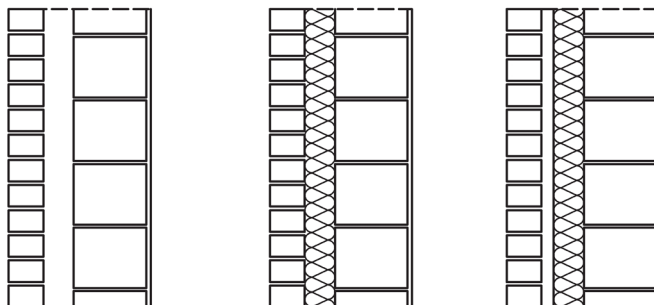
Bild 8

Schematische Darstellung verschiedener Außenwandkonstruktionen aus Mauerwerk

oben von links:
einschalige Wand mit Innendämmung, mit Außendämmung und hinterlüfteter Bekleidung, mit Wärmedämm-Verbundsystem



unten von links:
zweischalige Wand mit Luftschicht, mit Kerndämmung, mit Dämmung und Luftschicht



Beide Optionen führen jedoch in der Regel zu einer erhöhten Verletzbarkeit der Wandquerschnitte gegenüber Hochwassereinwirkungen, da entweder schadensanfällige Dämmstoffe verwendet werden oder das Porenvolumen massiver Außenwandquerschnitte deutlich vergrößert wird, wodurch sich deren Feuchtegehalt in der Regel erhöht.

Die Anordnung der Wärmedämmung innerhalb mehrschaliger Außenwandkonstruktionen¹⁰² ist nicht geeignet, da diese Kerndämmung lediglich mit großem Aufwand, wie etwa dem systematischen Rückbau der äußeren Schale, zu erreichen und auszutauschen beziehungsweise zuverlässig zu trocknen ist. Auch mehrschalige Fertigteilelemente, so bezeichnete Sandwichkonstruktionen, etwa mit einer Innen- und Außenschale aus Stahlbeton sowie einer dazwischen liegenden Dämmstoffschicht, sind aufgrund der vorgenannten Problematik als ungeeignet einzustufen.

Die Anordnung der Wärmedämmung auf der Außenseite der Außenwandkonstruktion in Form eines Wärmedämmverbundsystems¹⁰³ ist im Hinblick auf die Erreichbarkeit zunächst als günstiger zu bewerten, erfordert jedoch die fachli-

¹⁰² Lose Dämmstoffe in mehrschaligem Mauerwerk oder bei der Holzständerbauweise, wie etwa Mineralwolleflocken, expandierte Perlite und dergleichen, sind nach dem Hochwasser setzungsgefährdet, so dass sich Hohlräume bilden können, die wiederum zu Wärmebrücken führen. Perlit enthält bis zu 2 % Wasser und hat eine Schüttdichte von etwa 900 – 1000 kg/m³. Durch Glühen auf etwa 800 – 1000 °C expandiert Perlit sein Volumen auf das fünfzehn- bis zwanzigfache und verfügt dann über eine Schüttdichte von 50 – 100 kg/m³ und eine Wärmeleitfähigkeit λ von 0,040 – 0,070 W/(m*K). Silikonimprägniertes Perlit und Bläherperlit werden etwa in Form von Perlen mit etwa 5 mm Durchmesser als schüttfähige Wärmedämmung in Decken- und Fußbodenkonstruktion und als Kerndämmung verwendet.

¹⁰³ Wärmedämm-Verbundsysteme bestehen aus einer auf den tragenden Untergrund, zum Beispiel aus Mauerwerk oder Stahlbeton, geklebten und/oder mechanisch befestigten Wärmedämmschicht sowie einer darauf applizierten, mehrlagigen Deckschicht. Als Wärmedämmschicht fungieren in den überwiegenden Fällen Mineralfaserplatten, expandiertes Polystyrol (EPS), Polyurethan (PUR), extrudiertes Polystyrol (XPS) oder Holzwolle-Leichtbauplatten. Weitere Wärmedämmstoffe und deren Einsatzgebiete enthält Reyer et al. (2000). Die Deckschicht bildet ein glasfaserbewehrter Armierungsmörtel (mineralischer oder organischer Unterputz mit einer Schichtstärke von etwa 3 bis 10 mm) sowie einer putzartigen Abschlusschicht (gebräuchlich sind Kunstharzoberputze oder kunststoffvergütete mineralische Oberputze mit einer Schichtstärke von 3 mm). In selteneren Fällen besteht die Deckschicht aus einem auf Dünnbettmörtel mit Floating-Buttering-Verfahren aufgetragenen keramischen Material, wie zum Beispiel Klinker-Riemchen. Oberputze mit mineralischen Bindemitteln und mineralischer Gesteinskörnung erhärten durch Hydratation, während kunstharzmodifizierte Putze durch Polymerisation, Polyaddition und Polykondensation ihre Festigkeitseigenschaften entwickeln. Kunstharzzusätze erhöhen im Allgemeinen die Zähigkeit, die Zugfestigkeit, die Verarbeitungsfähigkeit sowie die Wasserundurchlässigkeit der Putze.

che Betrachtung potentieller Schwachpunkte, die bei Hochwasserbeanspruchung zum Verlust der Standsicherheit des Wärmedämmverbundsystems führen können:

- Gewährleistung der Formstabilität durchfeuchteter Dämmstoffschichten. Ungeeignet sind daher etwa kunstharzgebundene Faserdämmstoffe.
- Gewährleistung einer ausreichenden Haftzugfestigkeit des Klebemittels in der Materialfuge zwischen Dämmstoff und Untergrund. Gelangt Flutwasser hinter nicht vollflächig verklebte Dämmstoffschichten (zum Beispiel über die Sockelschiene), kann es zum einen die Haftzugfestigkeit des Klebemittels nachteilig mindern und zum anderen direkt die Wandkonstruktion beanspruchen, so dass deren Wassergehalt schneller ansteigt.
- Beachtung der Auftriebsproblematik für Wärmedämmverbundsysteme bei hinreichenden Überflutungshöhen.

Die Anordnung der Wärmedämmung auf der Innenseite der Außenwandkonstruktion, die aus bauphysikalischer Sicht in der Regel nicht empfohlen wird, bietet im Überflutungsfall auch keinen nennenswerten Vorteil.

Für potentiell hochwassergefährdete Gebäude bildet die außenseitige Anordnung von Wärmedämmschichten hinter leicht demontierbaren Außenwandbekleidungen (hinterlüftete Fassadenkonstruktionen) eine bedenkenswerte Alternative. Weiterhin kann die Anordnung systematischer Bauteilfugen in der Fassade oberhalb des zu erwartenden Hochwasserstandes in die Planung einbezogen werden, um den raschen Rückbau durchfeuchteter Dämmstoffe zu ermöglichen und somit die zügige Trocknung der Wandbaustoffe zu gewährleisten. Anschließend fungieren die Bauteilfugen als Anschlusslinie für die neu anzubringende Wärmedämmung. Da in beiden Varianten die Dämmstoffe nach einem Hochwasser planmäßig entfernt werden, können in diesem potentiell gefährdeten Außenwandbereich (so bezeichneter Opferbereich) auch nicht wasserbeständige Dämmstoffe, wie etwa Mineralwolle, verwendet werden.

Für die optimierte Herstellung homogener Wandquerschnitte mit geringer Wärmeleitfähigkeit kommen oftmals Mauersteine mit hohem Lochflächen- und Porenanteil (zum Beispiel Hochlochziegel) zum Einsatz. Der Mauerverband ba-

siert in den überwiegenden Fällen auf großformatigen Planziegeln mit reduzierten Mörtelschichtdicken in den Lagerfugen (Dünnbettmörtel) und Nut-Feder-Systemen in den Stoßfugenbereichen. Insbesondere durch die mörtelfreien Stoßfugen gelangt Flutwasser relativ rasch durch die Mauerkonstruktion und erhöht die Wassergehalte der Ziegel. Die Wasserfüllung der systematisch vorgesehenen Hoch- oder Langlöcher in den Ziegeln verzögert die erfolgreiche Trocknung der Mauerwerkskonstruktion.

Baukonstruktionen mit kapillaraktiven Baustoffen, geringer Rohdichte und hohem Porenvolumen, mit großer Gesamtstärke oder mit mehrschaligen Konstruktionslösungen erfordern grundsätzlich einen höheren Trocknungsaufwand. In der Mehrzahl aller Fälle ist der Rückbau von Außen- und Innenputzen beziehungsweise anderen diffusionshemmenden Bekleidungen empfehlenswert, um die Trocknung des Wandbaustoffes – gegebenenfalls auch unter Einsatz technischer Verfahren (zum Beispiel Trocknungsgeräte) – deutlich zu beschleunigen. Während der Trocknungsphase ist die Wasserdampfdurchlässigkeit der eingesetzten Baustoffe von hoher Relevanz. Diese sollte nach außen hin zunehmen, das heißt der Diffusionswiderstand wird nach außen kleiner, damit eingedrungene Feuchtigkeit zur Außenseite abtrocknen kann und nicht im Bauteil verbleibt.

Für tragende Wände und massive Trennwände im Innenbereich von Gebäuden gelten sinngemäß die grundlegenden Aussagen zu massiven Außenwänden, wobei hier die Problematik der Wärmedämmschichten von deutlich geringerer Relevanz ist. Leichte Trennwände mit Beplankungen aus Gipskarton oder anderen nicht wasserbeständigen Materialien sind nach einem Überflutungsereignis stets zu öffnen, um mindestens die Beplankungen und Dämmschichten auszutauschen. Grundsätzlich ist zu beachten, dass im Falle eines lokalen Wassereintritts in ein Gebäude während der Wasserausbreitung deutliche Wasserstandsunterschiede beidseits von leichten Trennwänden auftreten können, was zu starken Schäden an den Trennwänden führt.

Einen Sonderfall der baukonstruktiven Betrachtung stellen überflutete Wandkonstruktionen aus Holz dar, welche im modernen Bauwesen vor allem als systematisierte Holzskelettbauten mit Beplankung ausgeführt werden. Bei histori-

schen Gebäuden sind hingegen Fachwerk- oder Blockwände von Bedeutung. Aufgrund der beschriebenen Gefährdung durch Mikroorganismen (Pilze, Bakterien) ist bei derartigen Konstruktionen eine Freilegung der betroffenen Massivholzquerschnitte unerlässlich, um eine zügige und vollständige Austrocknung zu gewährleisten. Hierzu sind meist Beplankungen, Dämmstoffe, Dampfsperren und dergleichen im Schadensbereich zurückzubauen. Während bei massiven Holzquerschnitten nach fachgerechter Trocknung die Quellverformung weitgehend zurückgeht, erleiden Holzwerkstoffe in Wandkonstruktionen meist irreversible Verformungen und müssen ersetzt werden. Aufgrund des Ausmaßes und der Intensität der erforderlichen Eingriffe bei überfluteten Holzskelettwänden sind derartige Konstruktionen in flutgefährdeten Gebäuden grundsätzlich als verletzbare Lösung anzusprechen, auch wenn die Austrocknung selbst dann vergleichsweise rasch erfolgt. Derartige Wandkonstruktionen sollten insbesondere dort vermieden werden, wo Gebäude bereits bei geringeren Wiederkehrintervallen von Überflutung bedroht sind.

4 Vorgehensweise

4.1 Methodisches Gesamtkonzept

Für die Beantwortung der in Abschnitt 1.2 formulierten Forschungsfragen dient ein mehrstufiger Ansatz, der verschiedene Methoden miteinander verknüpft (siehe Bild 9). Die zentralen Elemente dieses Ansatzes bilden Verfahren

- für die Untersuchung des Feuchteverhaltens ausgewählter Außenwandkonstruktionen,
- für die Bewertung ihrer Schadensanfälligkeit bei intensiver Feuchtebeanspruchung sowie
- für die Ableitung baukonstruktiver Alternativen zur Reduzierung hochwasserbedingter Risiken.



Bild 9

Methodisches Gesamtkonzept zur Beantwortung der Forschungsfragen

Im Hinblick auf die Analyse des Systemverhaltens von Baukonstruktionen bei intensiver hygrischer Beanspruchung, welche mit der ersten Forschungsfrage adressiert wird, steht vor allem die Methodenentwicklung im Vordergrund. Das Systemverhalten kann grundsätzlich anhand empirischer Laborstudien oder numerischer Simulationsverfahren quantitativ untersucht werden. Beide Verfahren erlauben prinzipiell die Abbildung zeitabhängiger Wasseraufnahme- und Wassertransportvorgänge in baukonstruktiven Schichtenfolgen. Die Möglichkeiten einer numerischen Simulation sind im Abschnitt 4.2.2 kursorisch genannt. Da bisher keine normativen Regelungen, im Sinne eines standardisierten Prüfverfahrens, existieren, wird im Abschnitt 4.2.3 eine Methodik beschrieben, mit deren Hilfe die in betroffenen Mauerwerkskonstruktionen auftretenden Feuchtezustände nachgestellt und ausgewertet werden können.

Forschungsfrage 1

Aufbauend auf den Untersuchungen zum Feuchteverhalten werden entsprechend der zweiten Forschungsfrage spezifische Methoden und Kriterien zur Ermittlung und Bewertung der Schadensanfälligkeit bestehender Mauerwerkskonstruktionen identifiziert. Hierbei steht zunächst die Analyse der Wirkungszusammenhänge zwischen dem dokumentierten

Forschungsfrage 2

Feuchteverhalten und dessen nachteiligen Folgen im Mittelpunkt. Die Wirkungsanalysen dienen der Entwicklung relevanter Bewertungskriterien. Die Bewertungsverfahren ermöglichen den systematischen Vergleich der Konstruktionen im Hinblick auf ihre Empfindlichkeit¹⁰⁴ gegenüber den betrachteten Einwirkungen. Die Anforderungen an multikriterielle Bewertungsverfahren sind unter anderem, dass sie die Beurteilung von Konstruktionsalternativen auf einer einzigen kardinalen Skala ermöglichen müssen. Hierfür wird die Nutzwertmethode verwendet, die durch Elemente des analytisch-hierarchischen Prozesses (AHP-Verfahren)¹⁰⁵ ergänzt wird. Die Nutzwertmethode wird im Abschnitt 4.3.2 und das AHP-Verfahren im Abschnitt 4.3.3 beschrieben.

Forschungsfrage 3

Auf der Basis dieser Bewertungen lassen sich Handlungsoptionen der physischen Risikovorsorge konsistent und transparent ableiten, die im Hinblick auf die zu verfolgenden Ziele, eine wirksame (optimale) Konstruktionslösung darstellen.¹⁰⁶ Anhand des verwendeten methodischen Ansatzes lassen sich somit die Effekte verschiedener baukonstruktiver Maßnahmen bezogen auf die Verringerung des Risikos einschätzen.

4.2 Verfahren zur Analyse des Feuchteverhaltens

4.2.1 Überblick

Das Feuchteverhalten mehrschichtiger Baukonstruktionen lässt sich mittels verschiedener Modelle näherungsweise prognostizieren. Häufig kann die Komplexität realer Systemvorgänge jedoch nicht in beliebiger Detailschärfe abgebildet werden. Die Entwicklung eines konzeptionellen Modells ermöglicht es, ausschließlich die für das jeweilige Untersuchungsziel relevanten Elemente sowie deren wechselseitigen Beziehungen untereinander und mit der Umwelt zu beschreiben. Hierfür wird die physikalische Realität auf das erforderliche Maß abstrahiert und idealisiert. Dieses konzeptionelle Modell bildet die Grundlage sowohl für mathematische als auch für experimentelle Modelle (siehe Bild 10). Diese

¹⁰⁴ Die Begriffe Empfindlichkeit, Schadensanfälligkeit und physische Vulnerabilität werden hier synonym verwendet.

¹⁰⁵ Der analytisch-hierarchische Prozess nach Saaty (1980) ist ein Entscheidungsverfahren für multikriterielle Probleme, welches in der Literatur als Weiterentwicklung der Nutzwertanalyse gesehen wird.

¹⁰⁶ Vergleiche Klein und Scholl (2011)

fungieren wiederum als notwendige Basis für Simulationen beziehungsweise Experimente. An die Mehrzahl der im Bauingenieurwesen verwendeten Modelle werden im Allgemeinen sehr hohe Anforderungen an die Belastbarkeit und Zuverlässigkeit ihrer Ergebnisse gestellt. In diesem Zusammenhang hat das von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) geförderte Graduiertenkolleg 1462 „Modellqualitäten“ an der Bauhaus-Universität Weimar methodische Grundlagen erarbeitet, um die Qualität von Modellen im konstruktiven Ingenieurbau zu bewerten.¹⁰⁷

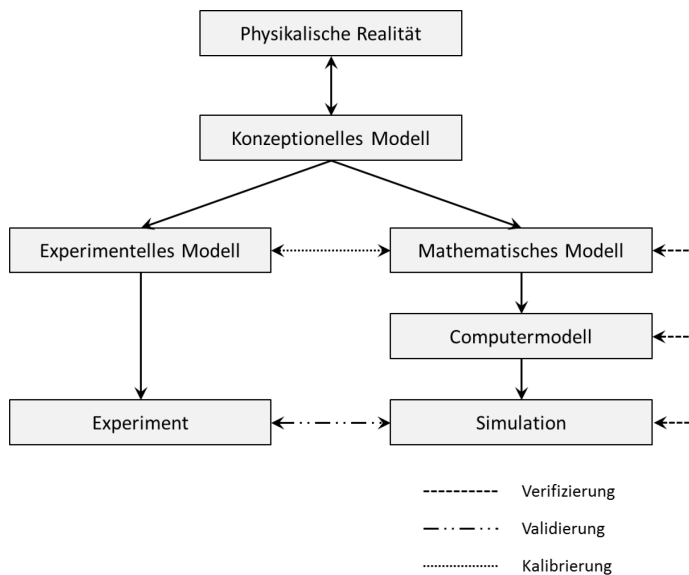


Bild 10
Darstellung eines Modellierungsprozesses in Anlehnung an Stein et al. (2011)

4.2.2 Numerische Simulationsverfahren

Der Einsatz numerischer Simulationsverfahren gewinnt in nahezu allen Vertiefungsrichtungen des Bauingenieurwesens zunehmend an Bedeutung.¹⁰⁸ Eine grundlegende Voraussetzung für die Bildung analytischer Modelle ist die zum Teil sehr komplexe mathematisch-physikalische Beschreibung der zu untersuchenden Phänomene. In den überwiegenden Fällen werden Wirkungszusammenhänge abstrah-

¹⁰⁷ Vergleiche zum Beispiel Stein et al. (2011), Werner et al. (2011), Lahmer et al. (2011)

¹⁰⁸ Wichtige Einsatzbereiche von Simulationsverfahren im Bauingenieurwesen sind zum Beispiel die Analyse der Standsicherheit von Bauwerksstrukturen bei Erdbeben- oder Brandeinwirkungen. In den überwiegenden Bereichen sind Simulationen mittlerweile zum Standardverfahren geworden. Vergleiche zum Beispiel Aschaber et al. (2007)

hiert und idealisiert, um die ablaufenden Prozesse zu vereinfachen und somit zu einer geschlossenen Lösung zu gelangen. Auf der Basis analytischer Modelle ist es anschließend möglich, den Einfluss verschiedener Parameter unter Angabe von Bandbreiten zu bestimmen und Korrelationen abzuleiten.¹⁰⁹

In der Bauphysik stellen insbesondere Simulationsmodelle des gekoppelten Wärme-, Luft-, Feuchte-, Schadstoff- und Salztransports in kapillarporösen Baustoffen¹¹⁰ anerkannte Instrumente dar, um das jeweilige Systemverhalten unter ausgewählten Randbedingungen und Einwirkungen zu beurteilen. Nach Stein et al. (2011) basieren Simulationsmodelle auf der Formulierung eines mathematischen Modells sowie auf dessen anschließender Diskretisierung und Implementierung. Derartige Modelle für die Simulation hygrothermischer Prozesse wurden bereits in computergestützten Simulationsprogrammen¹¹¹ implementiert, die der realitätsnahen Berechnung des wärme- und feuchteabhängigen Verhaltens von ein- und mehrschichtigen Bauteilen dienen. Die Veröffentlichung technischer Merkblätter¹¹² und Normen¹¹³ half den Anwendern dieser Programme bei der Beurteilung der Simulationsergebnisse und erhöhte somit die Akzeptanz derartiger Verfahren.

Vor- und Nachteile

Zu den bedeutendsten Vorteilen numerischer Simulationen gegenüber konventionellen Laborexperimenten und praktischen Beobachtungen zählt insbesondere die flexible, zeit- und kosteneffiziente Untersuchung verschiedener Varianten, um zum Beispiel unterschiedliche Eingangsparameter, Randbedingungen oder zukünftige Entwicklungen zu berücksichtigen. Nachteile numerischer Verfahren sind zum Beispiel

¹⁰⁹ Mit Hilfe so bezeichneter Sensitivitätsanalysen kann die Abhängigkeit zwischen den Inputparametern und den Strukturantworten im Simulationsmodell bestimmt werden.

¹¹⁰ Vergleiche Grunewald und Plagge (2006), Lengsfeld und Holm (2007)

¹¹¹ Als Beispiele sind die EDV-Simulationsprogramme DELPHIN4 (Institut für Bauklimatik an der TU Dresden) und WUFI® („Wärme und Feuchte instationär“ des Fraunhofer Instituts für Bauphysik) für den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport in Bauteilen zu nennen.

¹¹² Vergleiche zum Beispiel WTA (2001), WTA (2005), WTA (2014)

¹¹³ DIN EN 15026:2007-07 „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation“

- die zum Teil stark vereinfachte und idealisierte Modellbildung, ohne die jedoch eine analytische Beschreibung der häufig komplexen Prozesse nicht in geschlossener Form möglich wäre,
- das für die Kalibrierung der Mehrzahl der Modelle qualitativ hochwertige Messergebnisse für feuchtetechnische Materialkennwerte aus genormten Laborexperimenten erforderlich sind, weil die Genauigkeit der Simulationsergebnisse stets von der Exaktheit der dahinterstehenden Materialfunktionen abhängt¹¹⁴ oder
- das die Ergebnisse sehr stark von den ausgewählten Annahmen und Stoffparametern abhängen und daher einige Erfahrungen bei der bauphysikalischen Beurteilung verlangen.¹¹⁵

Die Materialfunktionen verschiedener Baustoffe, zum Beispiel das freie Wasseraufnahmeverhalten, sind anhand normativ geregelter Methoden¹¹⁶ zeitlich hochaufgelöst bestimmbar. Diese Methoden gelten in diesem Fall jedoch nur für kurzzeitige und drucklose hygrische Beanspruchungen, so dass deren Anwendbarkeit zur Überprüfung des Feuchteverhaltens bei lang andauernder Druckwassereinwirkung bei Überflutungsereignissen als ungeeignet angesprochen werden muss. Bei der Betrachtung von mehrschichtigen Baukonstruktionen fehlen zudem Übergangsbedingungen, welche für die Beschreibung von Wassertransportvorgängen über Grenzschichten hinweg erforderlich sind. Aus diesen Gründen empfiehlt sich die Anwendung eines empirischen Verfahrens.

¹¹⁴ Vergleiche zum Beispiel Scheffler und Plagge (2005). Fitz und Krus (2004) führen aus, dass im Zuge der europäischen Harmonisierung eine Flut von Normen für die Bestimmung von feuchtetechnischen Materialkennwerten entstanden ist, so dass nunmehr für jeden Baustoff produktspezifische Verfahren existieren anstatt wie früher produktübergreifende Normen. Dies mündet in verschiedenen Prüfalgorithmen und in einer erschwerten Vergleichbarkeit der Kennwerte.

¹¹⁵ Vergleiche zum Beispiel Albrecht und Koppold (2010)

¹¹⁶ Verfahren für die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten (Messung der Wasseraufnahme durch die Oberfläche eines Baustoffs) bei teilweisem Eintauchen zur Beurteilung des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens von Baustoffen und Bauprodukten sind in DIN EN ISO 15148 geregelt. Damit kann die Saugfähigkeit eines Baustoffes abgeschätzt werden.

4.2.3 Empirische Verfahren

Zu den wichtigen empirischen Verfahren für die Untersuchung des Verhaltens von Baustoffen und Baukonstruktionen bei intensiver hygrischer Beanspruchung zählen Experimentalstudien. Die empirische Datengewinnung kann hierbei grundsätzlich auf Labor- oder Feldversuchen basieren.

Systematische Laborversuche beinhalten die messtechnische Untersuchung ausgewählter Mauerwerksquerschnitte unter definierten, einheitlichen Randbedingungen. Die Laborstudie ermöglicht die Beobachtung zeitabhängiger Feuchteänderungen innerhalb des betrachteten baukonstruktiven Gefüges. Hierbei sind insbesondere die Parameter Rohdichte, Porosität und Wasserleitfähigkeit und deren Korrelation von Bedeutung. Allgemein gilt, dass mit zunehmender Rohdichte eines Baustoffes, dessen Porosität und dessen Wasseraufnahme- und Wasserleitfähigkeit abnimmt.¹¹⁷ Diese Zusammenhänge können unter Kenntnis der Materialkennwerte im Laborversuch erkundet werden.

Für die Untersuchung ihres Feuchteverhaltens werden Schichtenfolgen üblicher Mauerwerkskonstruktionen über eine definierte Dauer einer intensiven Wasserbeanspruchung ausgesetzt, welche den Einwirkungen bei einem Hochwasserereignis mit geringen Fließgeschwindigkeiten entsprechen. Einwirkungen infolge hydrodynamischen Drucks oder Lastenanpralls werden ausdrücklich nicht betrachtet. Der Modellversuch dient dem Zweck, die zeitabhängigen Veränderungen der Feuchtegehalte und den Feuchteverlauf in den jeweils verwendeten Baustoffen der unterschiedlich gefügten Konstruktionen zu analysieren. Da in diesem Zusammenhang bisher keine normativen Regelungen existieren, ist zunächst eine geeignete Untersuchungsmethode zu entwickeln und zu beschreiben. Das Laborexperiment bildet die Evidenzbasis für die Beantwortung der skizzierten Forschungsfragen und ist daher integraler Bestandteil des Dissertationsvorhabens. Die Reproduzierbarkeit der Laborversuche erlaubt den Vergleich von Ergebnissen aus zurückliegenden und zukünftigen Untersuchungen.

¹¹⁷ Vergleiche zum Beispiel Burkert et al. (2011)

4.3 Verfahren zur multikriteriellen Bewertung von Konstruktionslösungen

4.3.1 Überblick

Im Bauingenieurwesen werden multikriterielle Bewertungsverfahren vielfältig eingesetzt, zum Beispiel bei der Nachhaltigkeitsbewertung von Baukonstruktionen und Gebäuden¹¹⁸ oder bei der baubetrieblichen Bewertung verschiedener Bauverfahren, wenn abseits monetärer Kriterien, etwa auch Qualitätsziele, Einflüsse auf die Bauzeit und die Umwelt oder Aspekte der Ausführungssicherheit und des Gesundheitsschutzes adäquat berücksichtigt werden sollen.¹¹⁹

Multikriterielle Bewertungsmethoden dienen der umfassenden Beurteilung und Priorisierung alternativer Konstruktionslösungen und sind somit ein wichtiges Instrument der Entscheidungsunterstützung. Ein wesentlicher Prozessschritt bei der Berechnung der Schadensanfälligkeit ist die gegenseitige Abwägung unterschiedlicher Kriterien. In der einschlägigen Fachliteratur wird eine Vielzahl strukturierter Verfahren beschrieben, die – neben der intuitiven Auswahl von Lösungen oder dem Rückgriff auf bewährte Lösungen der Vergangenheit beziehungsweise auf nicht formalisierte Methoden – verwendet werden können.¹²⁰

Der prinzipielle Ablauf der Bewertungsverfahren ist im Wesentlichen identisch. Er umfasst

- die Abgrenzung der zu berücksichtigenden Alternativen,
- die Erstellung einer operationalen Zielhierarchie¹²¹, in der das Hauptziel in mehrere Einzel- beziehungsweise Teilziele (Sub-Ziele) aufgeteilt und somit die Komplexität eines Bewertungsproblems verringert wird,

¹¹⁸ Vergleiche zum Beispiel Hegner und Kerz (2010), Roth (2011). Aufgrund inhaltlicher Bezüge ist auch die Studie des Instituts für Bauforschung e.V. (IFB) zur Bewertung von Neubau-Wandkonstruktionen unter ökologischen, ökonomischen und technischen Gesichtspunkten zu nennen. Vergleiche Pfeiffer et al. (2005).

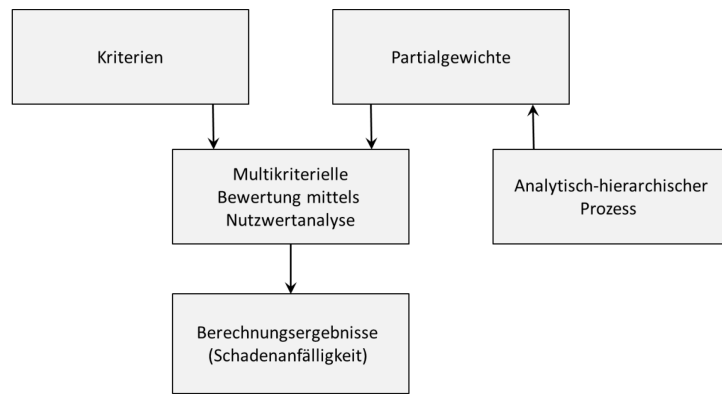
¹¹⁹ Vergleiche zum Beispiel Schach und Hentschel (2009)

¹²⁰ Vergleiche zum Beispiel Grünig und Kühn (2011), Norris und Marshall (1995)

¹²¹ Nach Klein und Scholl (2011) sollte jedes Einzel- beziehungsweise Teilziel der operationalen Zielhierarchie so gestaltet sein, dass die Zielerreichung einer Alternative möglichst genau und treffend gemessen werden kann.

- die Festlegung von Kriterien die für die Erfüllung der Einzelziele maßgebend sind und anhand derer jede der Alternativen bewertet werden kann,¹²²
- die Gliederung und Wichtung der Kriterien auf der Grundlage einer geeigneten Scoring-Methode,
- die Bewertung der Einzelkriterien sowie
- die Auswertung entsprechend des gewählten Bewertungsverfahrens, so dass eine vollständige Ordnung der Alternativen möglich ist, wobei gleichwertige Alternativen den gleichen Rang einnehmen.

Bild 11
Berechnung der Schadensanfälligkeit von Konstruktionsalternativen.



In den folgenden Abschnitten 4.3.2 und 4.3.3 werden die Nutzwertanalyse¹²³ und der analytisch-hierarchische Prozess¹²⁴ vorgestellt, die beide geeignete Verfahren darstellen, um den Gesamtnutzen einer Mauerwerkskonstruktion im Hinblick auf ihre Schadensanfälligkeit bei Überflutung bewerten zu können. Eine weitere Gruppe von Verfahren beurteilt Alternativen nach einem Effizienzkriterium, das heißt nach ökonomischen Aspekten. Hierzu zählen die Kosten-Nutzen-Analyse, welche im Abschnitt 4.3.4 näher beschrieben wird.

¹²² In der Regel ergibt sich aus der Natur der Kriterien für jedes Kriterium eine andere Bewertungsskala. Je nach Entscheidungsverfahren können nominale, ordinale oder kardinale Merkmale für die Bewertung infrage kommen. Bei einigen Verfahren ist es notwendig, dass alle Kriterien mit derselben Bewertungsskala beurteilt werden, was in der Regel eine Normierung oder Umrechnung der einzelnen Bewertungsskalen erforderlich macht. Vergleiche Roth (2011).

¹²³ Vergleiche Zangemeister (1971)

¹²⁴ Vergleiche Saaty (1980)

4.3.2 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse, die viele Literaturstellen auch als Punktwertverfahren oder Scoring-Methode bezeichnen, ist ein mehrdimensionales Bewertungsverfahren, auf dessen Grundlage Handlungs- beziehungsweise Lösungsalternativen nach mehreren verschiedenen Zielkriterien systematisch beurteilt, verglichen und in eine Rangfolge gebracht werden können. Die Nutzwertanalyse trägt somit zur Unterstützung multikriterieller Entscheidungen bei. Die Anwendung der Nutzwertanalyse nach Zangemeister (1971) dient dem Zweck

- die Mauerwerkskonstruktion mit der geringsten Schadensanfälligkeit nachvollziehbar zu identifizieren,
- eine Ordnung im Sinne einer Rangfolge von Konstruktionsalternativen abzuleiten und
- den Abstand auf einer kardinalen Skala zwischen verschiedenen Varianten zu bestimmen.

Im Kontext dieser Arbeit wird innerhalb des Nutzwertverfahrens die Schadensanfälligkeit als Reziproke des Nutzwertes verstanden. Je geringer die Schadensanfälligkeit einer Konstruktionsalternative ist, desto höher ist demnach ihr Nutzwert. In Anlehnung an Klein und Scholl (2011) repräsentiert der Nutzwert hier keinen monetären sondern einen abstrakten, dimensionslosen Ordnungsindex, welcher ein Maß für die Wirksamkeit einer Alternative im Hinblick auf die Erreichung eines bestimmten Ziels darstellt. Der mit dem formalisierten Verfahren bestimmte Gesamtnutzwert ist demnach eine Kennzahl für die Effektivität einer Außenwandkonstruktion hinsichtlich der Begrenzung hochwasserbedingter Schäden. Der Mauerwerkskonstruktion mit dem höchsten Gesamtnutzwert ist demzufolge die geringste Schadensanfälligkeit zuzuordnen.

In Bild 12 sind die sieben Hauptphasen der Nutzwertanalyse dargestellt. Klein und Scholl (2011) führen aus, dass für die Ermittlung des Gesamtnutzens jeder Alternative zuvor der in Bezug auf jede einzelne Zielgröße entstehende Teilnutzen ermittelt werden muss. Für die additive Nutzensynthese nach Zangemeister (1976, S. 55 ff.) wird zunächst ein hierarchisches, problemadäquates Zielsystem entwickelt, das heißt entsprechend dem formulierten, übergeordneten Ziel

sind für die Nutzwertanalyse zunächst weitere untergeordnete Einzelziele zu definieren. Für diese Einzelziele sind wiederum Kriterien abzuleiten, anhand deren jede der Alternativen bewertet werden kann (siehe Bild 12).

Bild 12
Hauptphasen der Nutzwertanalyse in Anlehnung an Roth (2011)

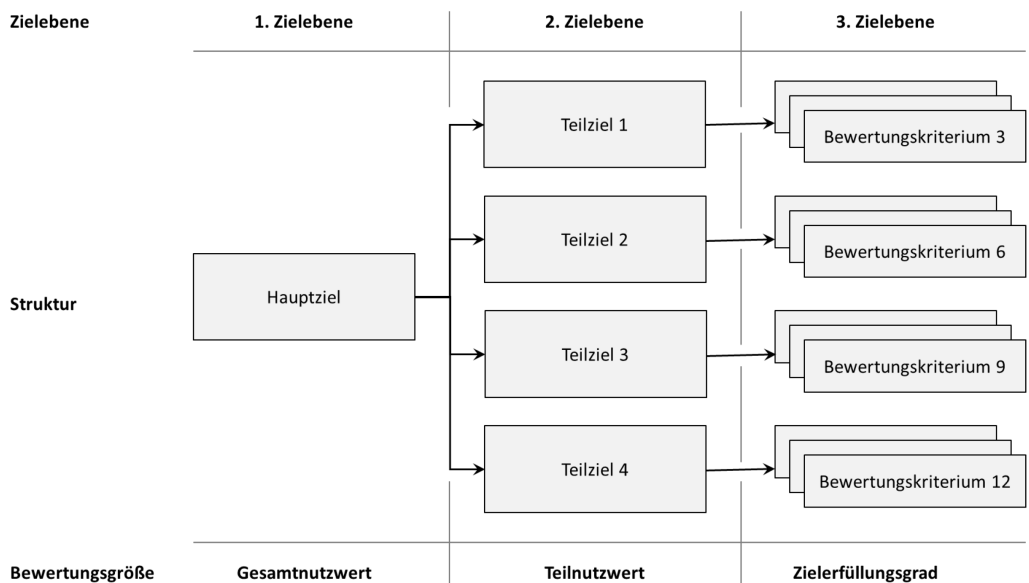


In die Nutzwertanalyse können sowohl qualitative als auch quantitative Bewertungskriterien einbezogen werden (semi-quantitatives Verfahren). Quantitative Kriterien sind jedoch nur insoweit einzubeziehen, als es sich nicht um monetär beschreibbare Größen handelt, wie etwa Herstellungs- oder Instandsetzungskosten. Diese monetären Kriterien fließen in Kosten-Nutzen-Analysen ein, die anschließend fundierte Aussagen über die Wirtschaftlichkeit verschiedener Maßnahmen ermöglichen.

Häufig ergibt sich für jedes Kriterium dieses Ensembles eine andere Bewertungsskala.¹²⁵ Für jedes Kriterium muss eine

¹²⁵ Nach Roth (2011) können je nach Entscheidungsverfahren nominale, ordinale oder kardinale Merkmale für die Bewertung infrage kommen. Bei einigen Verfahren ist es notwendig, dass alle Kriterien mit derselben Bewertungsskala beurteilt werden, was in der Regel eine Normierung oder Umrechnung der einzelnen Bewertungsskalen erforderlich macht. Bei der Nutzwertanalyse ist das nicht der Fall, so dass die Notwendigkeit gleichnamiger Messgrößen entfällt. Die verschiedenen Skalierungsmethoden sind im Glossar beschrieben.

Nutzenfunktion gebildet werden. Diese Nutzenfunktion dient dem Zweck, den Zielerfüllungsgrad abzubilden und somit den Teilnutzwert zu bestimmen. Roth (2011) argumentiert, dass eine klare Vorstellung darüber vorliegen muss, welcher Wert für ein Kriterium einen erstrebenswerten Zustand darstellt (volle Zielerfüllung), bei welchem Wert kein Nutzen vorhanden ist (unzureichende Zielerfüllung) und wie die Funktion zwischen diesen Werten verläuft.



Nutzenfunktionen¹²⁶ sind nach Klein und Schöll (2011) mathematische Abbildungen, die einem Ergebnis bezüglich einer Zielgröße einen reellen Nutzenwert zuordnet. Die in dieser Arbeit verwendeten Nutzenfunktionen beziehen sich vorrangig auf Normen und fundierte Forschungsergebnisse. Um das jeweilige Verhältnis der Nutzwerte zum Gesamtnutzwert zu berücksichtigen, werden Gewichtungsfaktoren in die Berechnung einbezogen. Die Gewichtungsfaktoren können als Maßstabsfaktoren angesprochen werden, welche die Bedeutung jedes einzelnen Kriteriums für die Rangfolgenbildung bemessen.¹²⁷ Die Summe der Gewichte aller Kriterien beträgt stets 100 %. Die Bestimmung der Gewichte basiert

Bild 13

Struktur eines hierarchischen Zielsystems mit Haupt- und Teilzielen sowie Bewertungskriterien.

¹²⁶ Im Gegensatz zu Klein und Schöll (2011) sprechen Eisenführ et al. (2010) von einer Wertfunktion, wenn eine Entscheidung unter Sicherheit vorliegt, und von einer Nutzenfunktion bei einer Entscheidung unter Unsicherheit.

¹²⁷ Vergleiche zum Beispiel Kühnapfel (2014)

auf der Paarvergleichsmethode des analytisch-hierarchischen Prozesses, die im Abschnitt 4.3.3 beschrieben ist. Das gewichtete Zielsystem bildet die normative Basis für die Ermittlung des Gesamtnutzwertes jeder Alternative. Die Aggregation, das heißt die additive Synthese der Teilnutzwerte zum Gesamtnutzwert erfolgt bei der Nutzwertanalyse schrittweise von der untersten bis zur obersten Zielebene entsprechend nachfolgender Gleichung:

Gleichung 1

$$GNW = \sum_j^n x_j * w_j$$

mit:

<i>GNW</i>	Gesamtnutzwert der Alternative [-]
<i>j</i>	Bewertungskriterien
<i>n</i>	Gesamtzahl der berücksichtigten Kriterien
<i>x_j</i>	Teilnutzwert der Alternative hinsichtlich des Kriteriums <i>j</i> [-]
<i>w_j</i>	Wichtung des Kriteriums <i>j</i> [-]

Diese Teilnutzwerte drücken aus, wie gut eine Alternative ein Ziel des Bewertenden erfüllt.¹²⁸

4.3.3 Analytisch-hierarchischer Prozess

Der analytisch-hierarchische Prozess (AHP) nach Saaty (1980) ist ein zuverlässiges und theoretisch fundiertes Verfahren, welches die oft kritisierten Schwächen der Nutzwertanalyse, insbesondere die Subjektivität der Gewichtung, kompensieren soll. Die Verwendung des AHP hat den Zweck, die Gewichte der Kriterien für die Bewertung der Schadensanfälligkeit zu bestimmen. Der Algorithmus gehört zu den hierarchisch additiven Gewichtungsverfahren und erlaubt die Ordnung verschiedener Alternativen, sowie die Angabe der besten Alternative nach dem Maximalprinzip.

Festlegung von Gewichten

Der analytisch-hierarchische Prozess zeichnet sich unter anderem dadurch aus, dass die beurteilungsrelevant erscheinenden Kriterien ausgewählt und entsprechend ihrer Relevanz eingestuft werden. Hierfür dient die in Tabelle 4 dargestellte 9-Punkte-Skala. Die Festlegung der Gewichte für die einzubeziehenden Kriterien bildet einen elementaren Schritt im Algorithmus des Bewertungsverfahrens. Die Gewich-

¹²⁸ Vergleiche Zangemeister (2000, S. 122)

tungsfaktoren können in den überwiegenden Fällen nicht objektiv bestimmt werden, sondern spiegeln lediglich die impliziten Präferenzen des jeweiligen Entscheiders wider. Das AHP-Verfahren formalisiert das Aufstellen eines hierarchischen Zielsystems, die Wichtung der Kriterien und die Bewertung der Alternativen hinsichtlich jedes Kriteriums.

Skalenwert	Definition	Interpretation
1	gleiche Bedeutung	Beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächsthöhere Element.
3	etwas größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
5	erheblich größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
7	sehr viel größere Bedeutung	Die sehr viel größere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit klar gezeigt.
9	absolut dominierend	Es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen.
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte	Feinabstufung

Tabelle 4
Neun-Punkte-Skala aus Poschmann et al. (1998) zitiert in Bloech und Götze (2004)

Die Besonderheit des AHP besteht im Wesentlichen in der speziellen systematischen Vorgehensweise, bei der Kriterien stets paarweise miteinander verglichen werden. Im Verlauf des Verfahrens muss beurteilt werden, wie die Wichtigkeit des einen Kriteriums gegenüber dem anderen Kriterium eingeschätzt wird.

Für jedes Kriterienpaar ist zu bestimmen, welches Kriterium wichtiger ist und wie groß die Bedeutungsdivergenz ist. Entsprechend der Tabelle 4 ist die Differenz auf einer Skala von 1 (gleichbedeutend) bis 9 (maximaler Bedeutungsunterschied) zu bewerten. Bei n Kriterien sind $(n \cdot (n-1))/2$ Vergleiche durchzuführen. Die Ergebnisse aller paarweisen Vergleiche münden in einer Evaluationsmatrix A .

Gleichung 2

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{bmatrix}$$

aus der die Gewichte für n Kriterien berechnet werden können.¹²⁹ Die Matrixelemente $a_{i,j}$ folgen der Bildungsvorschrift:

$$a_{i,j} = \begin{cases} \text{Paarvergleichswert} & \text{für } i < j \\ 1 & \text{für } i = j \\ 1/a_{j,i} & \text{für } i > j \end{cases} \quad \forall i, j = 1, \dots, n \quad n \in \mathbb{N}$$

Nach der Berechnung der Spaltensummen S_j der Matrix A

Gleichung 3

$$S_j = \sum_{i=1}^n a_{i,j} \quad \forall j = 1, \dots, n$$

und der Normierung der Elemente der Matrix A

Gleichung 4

$$b_{i,j} = \frac{a_{i,j}}{S_j} \quad \forall i, j = 1, \dots, n$$

werden die relativen Gewichte w_i der Kriterien ermittelt:

Gleichung 5

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{i,j}}{n} \quad \forall i = 1, \dots, n$$

Dieses Vorgehen stellt einen Vorteil gegenüber der Nutzwertanalyse dar, da sie eine willkürliche Festlegung der Gewichte umgeht. Der Entscheider wird gezwungen, sich im Detail mit seinen Zielvorstellungen auseinanderzusetzen. Es wird angestrebt, diese Elemente des AHP mit dem Nutzwertverfahren zu kombinieren.

Zu beachten ist, dass sich bei dem Verfahren durch Hinzu- oder Wegnahme einer Alternative die Rangfolge der Alternativen ändern kann.¹³⁰ Das Ergebnis hat also nur im Rahmen der betrachteten Alternativen eine Bedeutung und stellt keinen absoluten Wert für den Nutzen dar.

Den Gleichungen 2 bis 5 folgend, werden die jeweiligen Gewichte der Kriterien über den Eigenvektor der Matrix A mit

¹²⁹ Vergleiche zum Beispiel Vogel & Thinh (2007)

¹³⁰ Vergleiche zum Beispiel Bloech und Götze (2004)

dem größten Eigenwert berechnet. Um Inkonsistenzen in den Wichtungen zu identifizieren, wird der Konsistenz-Index *CI* (Consistency Index) und das Konsistenz-Verhältnis *CR* (Consistency Ratio) bestimmt.¹³¹

$$\lambda_i = \frac{Aw_i}{w_i} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \text{Gleichung 6}$$

mit

$$Aw_i = \sum_{j=1}^n a_{i,j}w_j \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \text{Gleichung 7}$$

Der Konsistenz-Index *CI* ergibt sich aus der Anzahl der Indikatoren *n* und dem Mittelwert der Eigenwerte $\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n} \quad \text{Gleichung 8}$$

zu

$$CI = \frac{\bar{\lambda} - n}{n - 1} \quad \text{Gleichung 9}$$

Das Konsistenz-Verhältnis *CR* ist definiert als Quotient aus Konsistenz-Index *CI* und dem Random-Index *RI*:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Gleichung 10}$$

Der Random-Index *RI* dient als Vergleichsmaß und ist abhängig von der Anzahl der Kriterien *n*, das heißt von der Matrixordnung. Tabelle 5 enthält den durchschnittlichen Random-Index für reziproke Zufallsmatrizen mit *n* Zeilen. Die paarweisen Vergleiche sind konsistent, wenn die Bedingung $CR < 0,1$ nachgewiesen wird. Andernfalls sind die Paarvergleiche solange anzupassen, bis die Konsistenzbedingung erfüllt ist.

Tabelle 5
Random-Index *RI* nach Saaty (2000)

Matrix- ordnung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI	0,00	0,00	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,51	1,54

¹³¹ Vergleiche Saaty (2000, S. 47 ff.) und Saaty (2001, S. 80 ff.)

4.3.4 Nutzen-Kosten-Untersuchungen

Das Ziel der Abwägung der Kosten und des Nutzens einer Anpassungsmaßnahme ist die Ermittlung und Bewertung ihrer Wirtschaftlichkeit. Die Nutzen-Kosten-Analyse ist somit ein Instrument zur Unterstützung ökonomisch rationaler Entscheidungen. Das mathematisch-statistische Verfahren zählt zu den Effizienzwertmethoden und beruht auf dem Wirtschaftlichkeitsprinzip¹³². Je größer das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand ist, desto höher ist der Effizienzwert der betrachteten Anpassungsoption. Die Methode erlaubt die Ordnung der Alternativen auf einer kardinalen Skala.¹³³

Gleichung 11

$$NKV_j = \frac{N_j}{K_j}$$

mit:

NKV	Nutzen-Kosten-Verhältnis einer Alternative j
N_j	Nutzenbarwert einer Alternative j
K_j	Kostenbarwert einer Alternative j

Die Kosten umfassen alle monetären Aufwendungen, die für die erstmalige Anpassung einer Konstruktionsalternative, für ihren Betrieb und ihre Instandhaltung während der Nutzungsdauer sowie für ihre Wiederherstellung nach einem zukünftigen Hochwasserereignis zu berücksichtigen sind. Der Nutzen wird ebenfalls in Geldeinheiten ausgedrückt und beschreibt die Differenz zwischen den Schadenserwartungswerten im unangepassten und angepassten Zustand. Der Schadenserwartungswert¹³⁴ verknüpft Auftrittswahrscheinlichkeiten mit den jeweiligen Schadenshöhen. Bild 14 zeigt diesen prinzipiellen Zusammenhang zwischen der Überschreitungswahrscheinlichkeit des Auftretens bestimmter Hochwasserereignisse und den zugehörigen Schadenshöhen. Der jährliche Schadenserwartungswert (englisch: Expected Annual Damage) entspricht dem Integral der Funktion und ist ein Maß für das Risiko¹³⁵ gegenüber einer Reihe von Ereignissen. Wenn der Nutzen die Kosten übersteigt,

¹³² Das Wirtschaftlichkeitsprinzip (ökonomisches Prinzip) beschreibt den Grundsatz, dass ein bestimmtes Ziel mit dem geringstmöglichen Mittlereinsatz (Minimalprinzip) beziehungsweise mit einem definierten Mittlereinsatz der größtmögliche Erfolg (Maximalprinzip) erzielt werden soll. Piekenbrock und Hennig (2013)

¹³³ Vergleiche Roth (2011)

¹³⁴ Der Begriff Schadenserwartungswert wird im Glossar definiert.

¹³⁵ Der Begriff Risiko wird im Glossar definiert.

das heißt das Nutzen-Kosten-Verhältnis ist größer als eins, wird im Allgemeinen von einer wirtschaftlichen Lösung gesprochen.

Bei der Nutzen-Kosten-Analyse werden die verschiedenen Zielgrößen gleichnamig gemacht, indem auch nicht monetäre Größen monetär bewertet werden, und jeweils für Kosten und Nutzen addiert. Da alle Kriterien in derselben monetären Einheit gemessen werden, ist keine Wichtung notwendig. Die Bewertung einer Variante ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Kosten und Nutzen. Die beste Variante wird nach dem Minimalprinzip bestimmt. Bei der Ermittlung des Barwertes sowohl für den Nutzen als auch für die Kosten sind in der Regel auch Opportunitätskosten sowie der Effekt der Diskontierung, das heißt die Abzinsung zukünftiger Zahlungen zur Bestimmung des gegenwärtigen Barwertes, zu berücksichtigen.

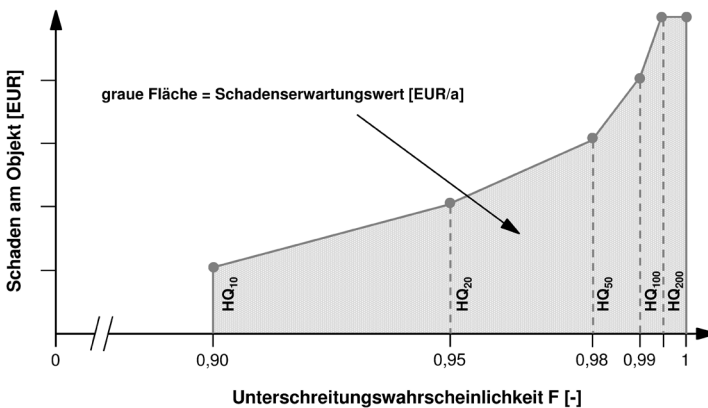


Bild 14
Prinzipielle Risikokurve basierend auf der Schadenshöhe und Überschreitungswahrscheinlichkeit (Schanze & Meyer, 2008)

$$EAD = \int D(F) dF$$

Gleichung 12

mit:

- EAD* Expected Annual Damage [€]
(durchschnittlich zu erwartender jährlicher Schadenswert)
- F* $F = 1 - 1/T$ Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Abfluss unterschritten wird. Beispiel HQ₂₀: $F = 1 - 1/20 = 0,95$
- D(F)* $D(F)$ ist der Schaden für ein Hochwasser mit der jährlichen Unterschreitungswahrscheinlichkeit F

5 Untersuchungsgegenstand

5.1 Abgrenzung

Während eines Überflutungsereignisses werden insbesondere die Konstruktionselemente der Gebäudehülle, welche das Gebäude gegen den Außenraum abgrenzen, intensiv durch drückendes und gegebenenfalls bewegtes Wasser beansprucht. Zu diesen exponierten Elementen zählen insbesondere Außenwandscheiben unterschiedlicher Bauart sowie Fenster und Außentüren mit ihren jeweiligen Anschlusskonstruktionen. Herkömmliche Außenwandscheiben lassen sich anhand der überwiegend verwendeten Baustoffe in folgende Bauarten differenzieren:

- Mauerwerkskonstruktionen
- Holzständer- und Holztafelkonstruktionen
- Stahlbetonkonstruktionen
- Stahl-Glas-Konstruktionen

Potentielle Schwachpunkte in der Gebäudehülle bilden in diesem Zusammenhang neben Fugen, Durchdringungen und Übergängen insbesondere Fenster und Türen mit ihren jeweiligen Anschlüssen an den umgebenen Baukörper, welche folglich eine detaillierte fachliche Betrachtung erfordern.¹³⁶

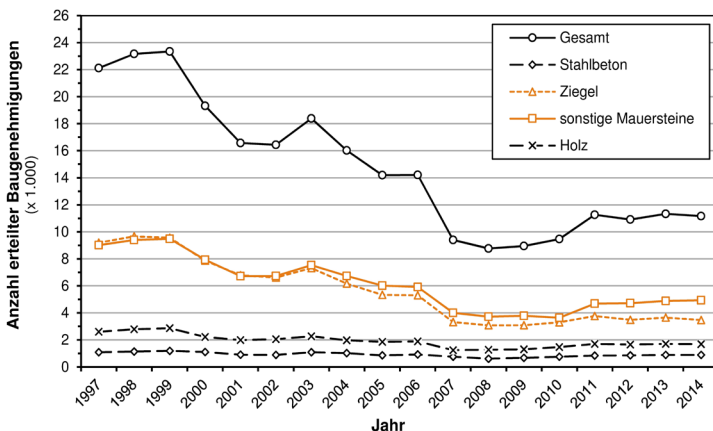


Bild 15

Anzahl erteilter Baugenehmigungen in Deutschland zwischen 1997 und 2014 für den Neubau von Wohngebäuden differenziert nach dem überwiegend verwendeten Wandbaustoff

Datenquelle:
Statistisches Bundesamt

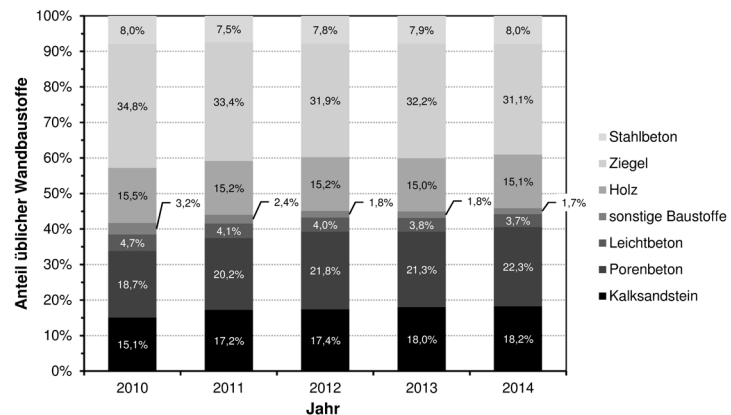
¹³⁶ Die Richtlinie FE-07/1 „Hochwasserbeständige Fenster und Türen“ des „Instituts für Fenster und Fassaden, Türen und Tore, Glas und Baustoffe“ in Rosenheim definiert Anforderungen an die Hochwasserbeständigkeit von Tür- und Fensterelementen sowie deren Anschlüsse an die Gebäudehülle und beschreibt entsprechende Prüfalgorithmen und Grenzwerte IFT (2005).

Abgrenzung des Untersuchungsgegenstandes (Systemgrenzen)

In der Laborstudie werden ausnahmslos Regelquerschnitte üblicher, massiver Mauerwerkskonstruktionen untersucht, das heißt es werden typische Materialfolgen hinsichtlich ihres Feuchteverhaltens analysiert. Alle Konstruktionen stellen bewährte Mauerwerksbauweisen dar, die den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen. Nach Wasmuth et al. (1931) wird „jede aus natürlichem oder künstlichen Steinen errichtete Einfriedung oder Begrenzung eines Raumes“ als Mauerwerk bezeichnet. Deplazes (2008) beschreibt das Fügeprinzip der Mauerwerksbauweise als „Technik des Schichtens“, auf Grund welcher eine Konstruktion bereits allein durch die Gravitationskraft Stabilität erlangt. Nach Breit und Adams (2013) besteht Mauerwerk aus „Mauersteinen, die entweder trocken aufeinander geschichtet oder durch Mauermörtel kraft- und formschlüssig verbunden werden“.

Bild 16
Anteil üblicher Wandbaustoffe in Baugenehmigungen für den Neubau von Wohngebäuden in Deutschland im Zeitschnitt 2010–2014

Datenquelle:
Statistisches Bundesamt



Einen Überblick über baupraktisch bedeutende natürliche Gesteine im Mauerwerksbau enthält Abschnitt 3.3.2. Mauerwerkskonstruktionen aus künstlichen, industriell hergestellten Mauersteinen, zum Beispiel Ziegel oder sonstige mineralisch gebundene Mauersteine, wie etwa Kalksandstein, Porenbeton oder Leichtbeton, bilden aufgrund ihrer günstigen statischen und bauphysikalischen Eigenschaften jedoch seit Dekaden die dominierende Bauweise für Außenwandkonstruktionen im Wohnungsbau.¹³⁷

Das Diagramm in Bild 15 differenziert die in Deutschland zwischen 1997 und 2014 erteilten Baugenehmigungen für den Neubau von Wohngebäuden anhand der überwiegend

¹³⁷ Vergleiche Statistisches Bundesamt: Bauen und Wohnen - Baugenehmigungen / Baufertigstellungen, Lange Reihen; 2014.

verwendeten Wandbaustoffe. Es verdeutlicht den hohen Anteil (etwa zwei Drittel) von Ziegeln und sonstigen Mauersteinen bei der Ausführung von Wohngebäuden während der zurückliegenden 18 Jahre.

Für diesen Zeitraum sind beim Statistischen Bundesamt in Wiesbaden zusätzlich erhobene Daten abrufbar, die eine noch detailliertere Analyse der Verteilung der überwiegend verwendeten Baustoffe bei Neubauvorhaben zulassen (siehe Balkendiagramm in Bild 16). Der dominierende Marktanteil und die somit unterstellte große räumliche Verbreitung der Mauerwerksbauweise legitimiert die vertiefte Untersuchung ihrer Schadensanfälligkeit bei Hochwasserbeanspruchung.

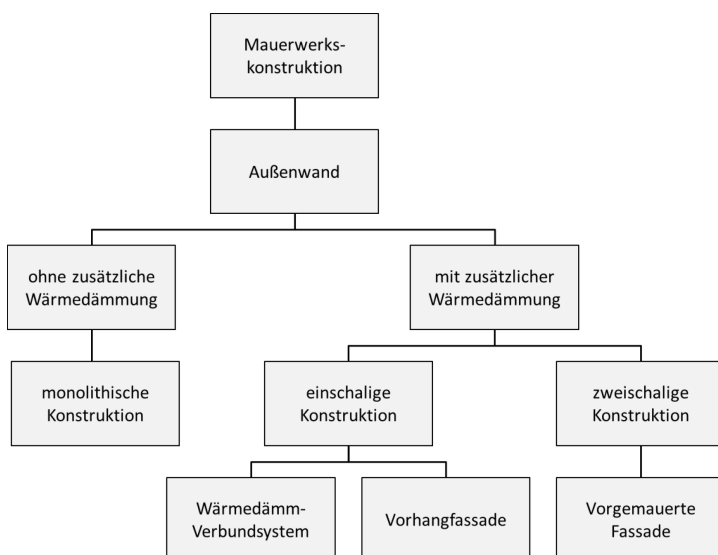


Bild 17
Systemübersicht über Außenwandkonstruktionen in Mauerwerksbauweise

Bild 17 enthält eine Systemübersicht über Außenwandkonstruktionen in Mauerwerksbauweise. Zu den wichtigsten Leitmotiven für technische Neu- und Weiterentwicklungen im Mauerwerksbau gehörten in den letzten Dekaden insbesondere stetig zunehmende Anforderungen im Hinblick auf

- die Nutzung von Rationalisierungspotentialen¹³⁸,
- die Optimierung der Wärmedämm-, Schalldämm- und Brandschutzeigenschaften,¹³⁹
- die Gewährleistung des Feuchte- und Schlagregenschutzes,
- den Bedeutungszuwachs ökologischer Aspekte, wie etwa Primärenergiegehalt und Treibhauspotential sowie
- die Erhöhung der Ausführungssicherheit¹⁴⁰.

Diese vielfältigen Anforderungen bedingen die Ausführung mehrschichtiger, mitunter auch mehrschaliger Mauerwerkskonstruktionen.¹⁴¹ Insbesondere die gestiegenen normativen Anforderungen an den Wärmeschutz der opaken Bauteile führen unter anderem

- zur raschen Verbreitung von Einsteinmauerwerk mit großformatigen Plansteinen und Planelementen in Verbindung mit Leichtmörteln im Dünnbettverfahren, um den Einfluss von Unstetigkeiten im Hinblick auf die Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks zu reduzieren,¹⁴²
- zur Minderung der Mauersteinrohichte durch Erhöhung des Porenvolumens im Materialgefüge (zum Beispiel durch porosierte Ziegelscherben) sowie des Hohlraumanteils mit ruhender Luft (Lochanteil im Mauerstein) sowie

¹³⁸ Zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit der Mauerwerksbauweise, das heißt zur Minderung des Materialverbrauches, zur Verkürzung der Bauzeit und zur Reduzierung der Baukosten, dienen unter anderem die Verwendung größerer Steinformate, die Optimierung der Steinformen (zum Beispiel Stoßfugenverzahnung) und deren Maßhaltigkeit sowie die Nutzung verbesserter Füge-technologien. Die zulässige Maßtoleranz der Steinhöhe beträgt ± 1 mm.

¹³⁹ Zur Verbesserung der Wärmedämmung entwickelte die Ziegelindustrie etwa ab 1970 porosierte Mauerziegel, die aufgrund ihres geringen Gewichts in der Regel als großformatige Blöcke verwendet werden.

¹⁴⁰ Vergleiche Zilch und Schermer (2005). Demnach steigt die Ausführungssicherheit, wenn einfache Detailkonstruktionen und eine geringe Materialvielfalt gewährleistet sind.

¹⁴¹ Neben ihren statischen (Lastabtragung, Aussteifung) und raumabschließenden Funktionen müssen Wände weitere normative Anforderungen erfüllen, wie etwa die Gewährleistung des Wärme-, Schall-, Brand- und des Schlagregenschutzes sowie den Schutz gegen drückendes sowie nichtdrückendes Wasser in erdberührten Bereichen. Vergleiche Neumann und Weinbrenner (2006).

¹⁴² Das Kleben großformatiger Plansteine mit Dünnbettmörtel erfordert besonders geringe Fertigungstoleranzen bei der Plansteinhöhe und der Ebenheit der Lagerflächen.

- zur werksseitigen Integration wärmedämmender Materialien, wie etwa Perlite oder kunstharzgebundene Faserdämmstoffe, in die Steinlochungen,

um die spezifischen Transmissionswärmeverluste durch den opaken Außenwandquerschnitt zu begrenzen.¹⁴³ Es wird jedoch vermutet, dass die Prämissen der Neu- und Weiterentwicklungen im Mauerwerksbau mit der Schadensanfälligkeit gegenüber Hochwassereinwirkungen konfliktieren. Inwieweit diesbezüglich Korrelationen hergestellt werden können, zeigt die Bewertung der Ergebnisse der Laborstudie.

Anforderung	Regelwerke	Beschreibung
Brandschutz	LBO / MBO DIN 4102-4 DIN 4102-22	<ul style="list-style-type: none"> – Verhinderung der Brandausbreitung über Brandabschnitte hinaus – Sicherung der Trag- und Schutzfunktion im Brandfall für eine bestimmte Zeit zur Gewährung von Flucht, Evakuierung und Brandbekämpfung – Schutz von Sachwerten
Feuchteschutz	DIN 4108-3 DIN 18195	<ul style="list-style-type: none"> – Vermeidung Tauwasser- und Schimmelbildung – Schlagregenschutz – Schutz gegen aufsteigende Feuchte und seitlich eindringende Feuchte aus dem Boden
Schallschutz	DIN 4109	<ul style="list-style-type: none"> – Schutz gegen Außenlärm – Schutz gegen Lärm aus anderen Nutzungseinheiten und innerhalb der eigenen Nutzungseinheit – Verhinderung von Lärmbelästigung durch technische Gebäudeausrüstung, sowie Maschinen und Geräte
Wärmeschutz	DIN 4108-2 EnEV	<ul style="list-style-type: none"> – Gewährleistung von Mindestanforderungen zur Sicherstellung gesunder Wohn- und Arbeitsverhältnisse – Reduzierung des Energiebedarfs

Tabelle 6

Kursorischer Überblick über die normativen Anforderungen an Außenwände nach Jäger (2006)

¹⁴³ Die Energieeinsparverordnung (EnEV) ist das zentrale Ordnungspolitische Regelwerk zur Verbesserung der Gebäudeenergieeffizienz. Sie ist 2002 erstmals in Kraft getreten und seither aufgrund verschärfter politischer Zielsetzungen geändert worden. Im Mai 2014 trat die EnEV 2014 in Kraft.

Die Mehrzahl der Mauerwerkskonstruktionen ist in der Regel technologisch leicht herstellbar. Der Mauerverband, mit seinen beiden formgebenden Komponenten Mauerstein und Mauermörtel, bildet ein definiertes geometrisches Ordnungssystem, unabhängig vom jeweiligen Material des Wandbildners.¹⁴⁴ Der folgende Abschnitt 5.2 beschreibt und visualisiert die konstruktive Ausbildung der acht untersuchten unbewehrten Wandquerschnitte. Zu beachten ist, dass alle verwendeten Bauprodukte normativ geregelt oder über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) des DIBt¹⁴⁵ verfügen, die ihre jeweilige Verwendbarkeit nachweist.

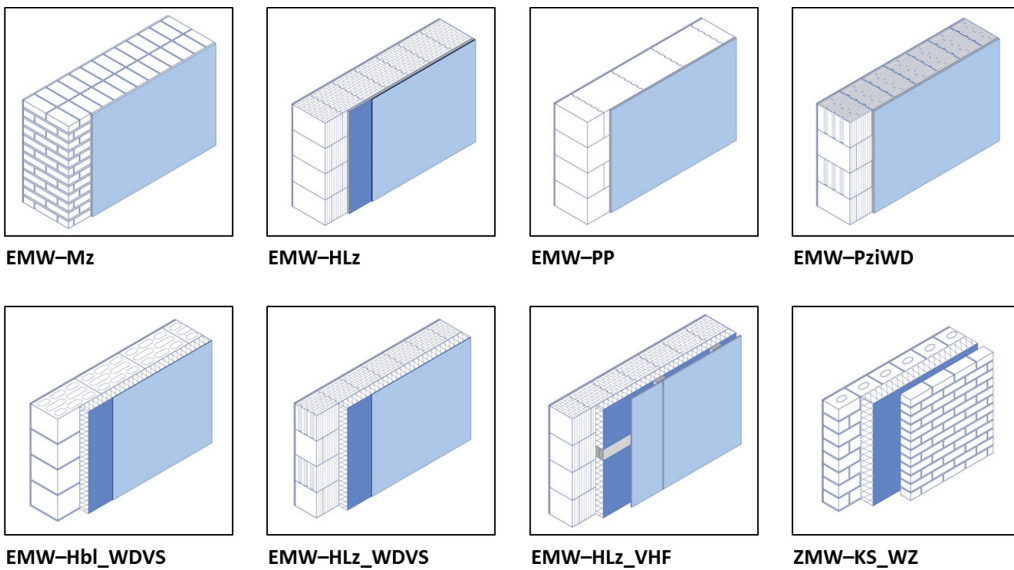


Bild 18
 Untersuchungsgegenstand:
 Übliche Mauerwerkskonstruktionen bestehender Gebäude

Die Auswahl des Untersuchungsgegenstandes orientiert sich an der Forderung, die Bandbreite üblicher Mauerwerkskonstruktionen abzubilden, welche im Wohngebäudebestand häufig ausgeführt und räumlich weit verbreitet sind. Die Wohngebäudetypologie reicht vom einzeln stehenden Einfamilienhaus über das Reihenhaus bis zum Mehrfamilienhaus in geschlossener Blockrandbebauung.

¹⁴⁴ Alle Hersteller von Mauersteinen orientieren sich an dem bewährten Oktametersystem, welches von Ernst Neufert eingeführt wurde (Vergleiche Neufert 1943). Es bildet die Basis für eine der frühesten Normen im Bauwesen, der „Maßordnung im Hochbau“, DIN 4172 von 1955. Die Höhe eines Mauersteins und die zugehörige Lagerfuge bildet ein Vielfaches des Grundmaßes von 12,5 cm.

¹⁴⁵ Das Deutsche Institut für Bautechnik in Berlin erteilt auf Antrag allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen mit bundesweiter Geltung.

Die obere Reihe in Bild 18 zeigt daher einschalige, monolithische Mauerwerkskonstruktionen ohne zusätzliche außenliegende Wärmedämmung:

- EMW–MZ: Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen, kleinformatigen Vollziegeln
- EMW–HLz: Einschaliges Mauerwerk aus leichten Hochlochziegeln
- EMW–PP: Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen
- EMW–PziWD: Einschaliges Mauerwerk aus Planhochlochziegeln mit integrierter Wärmedämmung

Die untere Bildreihe beinhaltet ein- und mehrschalige Mauerwerkskonstruktionen, welche über eine zusätzliche außenliegende Wärmedämmschicht verfügen, um etwa die Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz zu erfüllen:

- EMW–Hbl_WDVS: Einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit zusätzlicher außenliegender Wärmedämmung
- EMW–HLz_WDVS: Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit zusätzlicher außenliegender Wärmedämmung
- EMW–HLz_VHF: Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit zusätzlicher außenliegender Wärmedämmung und hinterlüfteter Außenwandbekleidung
- ZMW–KS_WZ: Zweischaliges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung

5.2 Regelquerschnitte üblicher Außenwandkonstruktionen im Wohnungsbau

5.2.1 Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln

Konstruktion

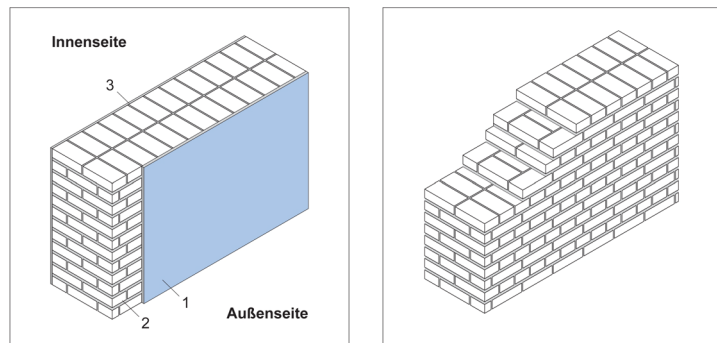
Das monolithische Mauerwerk besteht aus kleinformatigen, gebrannten Vollziegeln mit einer Rohdichte ρ von etwa 1.800 kg/m^3 und Kantenlängen von $240 \times 115 \times 71 \text{ mm}$. Das Mauerwerk ist im Blockverband mit einer Nettowandstärke von 49 cm ¹⁴⁶ errichtet und bildet einen anisotropen Materialverbund.¹⁴⁷ Alle Lager- und Stoßfugen sind mit Normalmauermörtel ausgeführt. Das Mauerwerk ist innen- und außen-seitig mit einem mineralisch gebundenen Kalk-Zement-Putz bekleidet, dessen Schichtstärke $1,5 \text{ cm}$ beziehungsweise $2,0 \text{ cm}$ beträgt.

Bild 19

Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln

Links: Isometrische Darstellung der Schichtenfolge

Rechts: Vollziegelmauerwerk im Blockverband



- 1 Kalk-Zement-Putz, $d = 20 \text{ mm}$
- 2 Mauerwerk aus Vollziegeln, NF, $d = 49 \text{ cm}$
- 3 Kalk-Zement-Putz, $d = 15 \text{ mm}$

Da diese traditionelle Mauerwerkskonstruktion weder den Anforderungen an eine zeit- und kosteneffiziente Herstellung noch an die energetische Qualität¹⁴⁸ von Außenwänden genügt, hat sie ihre Bedeutung im Neubau vollständig verloren. Aufgrund der hohen Relevanz von Vollziegelmauerwerk im Gebäudebestand, wird diese Referenzkonstruktion dennoch im Versuchsprogramm berücksichtigt.

¹⁴⁶ Die Nettowandstärke von 49 cm (Brutto = $52,5 \text{ cm}$) wird durch ein zwei Steinlängen (zwei Bindersteine + Stoßfuge) starkes Mauerwerk erreicht.

¹⁴⁷ Eine Verbundkonstruktion hat ein anisotropes Verhalten, wenn ihre physikalischen, mechanischen oder chemischen Eigenschaften richtungsabhängig sind. Zum Beispiel ist die Druckfestigkeit von Mauerwerk parallel und senkrecht zu den Lagerfugen unterschiedlich.

¹⁴⁸ Der Wärmedurchgangskoeffizient U der dargestellten Mauerwerkskonstruktion beträgt $1,23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Er entspricht damit seit der Einführung der Wärmeschutzverordnung 1982 nicht mehr den Anforderungen.

Tabelle 7
Eigenschaftskennwerte für
einschaliges Mauerwerk
aus traditionellen Vollzie-
geln

Eigenschaftskennwerte

	Bekleidung innen	Wand- bildner	Mauer- mörtel	Bekleidung außen
	Putzmörtel (Werk trocken- mörtel)	Vollziegel (Mz)	Normal- mauermörtel (NM)	Putzmörtel (Werk trocken- mörtel)
Produkt- bezeichnung	<i>Baumit Kalk-Zement- Putz KZP 65</i>	<i>EDER MZ 1,8 NF</i>	<i>Baumit Mauermörtel MM 95</i>	<i>Baumit Kalk-Zement- Putz KZP 65</i>
Baustoffgruppe	Kalk-Zement- Mörtelgruppe P IIb (Kalk-Zement- Mörtel)	–	Normal- mauermörtel NM IIa / M5	Kalk-Zement- Mörtelgruppe P IIb (Kalk-Zement- Mörtel)
Druckfestigkeit f_k [N/mm ²]	1,5–5,0	20	> 5,0	1,5–5,0
Rohdichte ρ [kg/m ³]	1.900	1.800	1.800	1.900
Wärmeleitfähigkeit λ_R [W/(m ² K)]	1,000	0,810	1,200	1,000
Diffusions widerstand μ [-]	10–15	5	15	10–15
Schichtdicke d [cm]	1,5	49,0	Lagerfuge 1,2 cm Stoßfuge 1,0 cm	2,0
Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	0,15–0,23	2,45	–	0,20–0,30
Regelwerke	DIN V 18580	DIN 105-1 DIN EN 771-1	DIN EN 998-2	DIN V 18580
Format LxBxH [mm]	–	NF 240x115x71	–	–
Bemerkungen	–	Ziegel DIN 105- Mz-20-1,8-NF	–	–
Wasserkapazität Φ_k [m ³ /m ³]		0,19		
Sättigungsfeuchte- gehalt Φ_s [m ³ /m ³]		0,29		

5.2.2 Einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln

Konstruktion

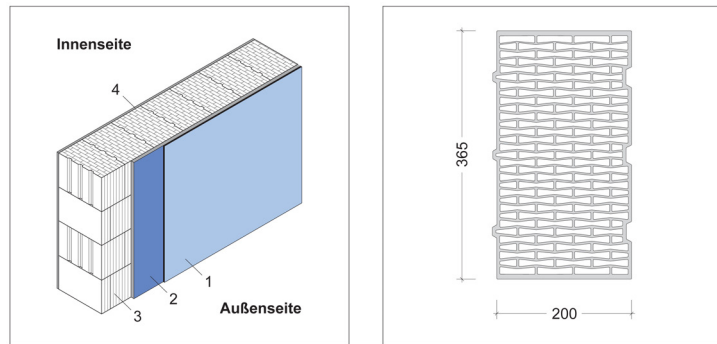
Für die Herstellung des einschaligen monolithischen Einsteinmauerwerks werden Hochlochziegel mit Stoßfugenverzahnung und ein deckelnder Dünnbettmörtel verwendet. Die untersuchten Planziegel haben eine Länge von 200 mm, eine Breite von 365 mm und eine Höhe von 249 mm (Ziegelformat 10 DF). Die Netto-Wandstärke des Einsteinmauerwerks beträgt folglich 36,5 cm. Die verklebte Lagerfuge hat eine Höhe von 1 mm. Aufgrund der Stoßfugenverzahnung der großformatigen Planziegel (Nut-Feder-System) sind die Stoßfugen des Mauerwerks nicht vermörtelt. Für den Kraftschluss sind die Hochlochziegel lediglich dicht aneinander zu stoßen.

Bild 20

Einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln im Dünnbettverfahren mit Stoßfugenverzahnung

Links: Isometrische Darstellung der Schichtenfolge

Rechts: Lochbild des verwendeten Leichthochlochziegels



- 1 mineralischer Oberputz, $d = 10$ mm
- 2 Wärmedämmputz, $d = 25$ mm
- 3 Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln, 10 DF, $d = 365$ mm
- 4 Kalkputz, $d = 10$ mm

Raumseitig wird ein 1,0 cm starker Kalkputz und außenseitig ein zweilagiger, insgesamt 3,5 cm starker, Wärmedämmputz verwendet. Die Wärmeleitfähigkeit λ des mineralischen Unterputzes auf Kalk-Zement-Basis ($d = 2,5$ cm) wird durch die Beimengung von expandierten Polystyrol-Kügelchen auf einen Wert kleiner gleich $0,2 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ reduziert.¹⁴⁹ Da dieser Unterputz lediglich über eine geringe Festigkeit verfügt, ist für dessen Schutz gegen mechanische Beschädigung ein mineralischer Oberputz ($d = 1$ cm) erforderlich.¹⁵⁰ Aufgrund der geringen Rohdichte der Planziegel von etwa $700 \text{ kg}/\text{m}^3$

¹⁴⁹ Marktüblichen Wärmedämm-Putzsystemen werden zur Erreichung einer geringen Wärmeleitfähigkeit organische Zuschläge, wie etwa expandiertes Polystyrol, oder mineralische Zuschläge, wie etwa Perlite, Vermiculite, Blähglas, Blähton, Blähschiefer oder Bimsstein beige-mischt. Ihr Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit $\leq 0,2 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$ gilt nach DIN EN 998-1 als erfüllt, wenn die Trockenrohichte $\leq 600 \text{ kg}/\text{m}^3$ ist.

¹⁵⁰ Siehe hierzu die Ausführungsvorschrift in der DIN 18550-3.

sowie des geringen Fugenanteils im Mauerwerk wird in Verbindung mit diesem Putzsystem ein Wert für die Wärmeleitfähigkeit des Bauteilquerschnitts erreicht, der auch ohne zusätzliche außenliegende Wärmedämmschicht den Anforderungen der derzeit gültigen Energieeinsparverordnung 2014 genügt.¹⁵¹

Tabelle 8
Eigenschaftskennwerte für einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln im Dünnbettverfahren mit Stoßfugenverzahnung

Eigenschaftskennwerte

	Bekleidung innen	Wandbildner	Mauermörtel	Bekleidung außen
	Kalk-Innenputz	Hochlochziegel (HLz)	deckelnder Dünnbettmörtel (DM)	Wärmedämmputz
Produktbezeichnung	<i>Maxit Purcalc 381</i>	<i>EDER XP 10 N+F</i> Planziegel DIN 105-HLzW-10-0,7-10 DF (365) N+F	<i>Maxit Mur 900 D</i>	<i>Baumit DP 85</i>
Baustoffgruppe	Kalkmörtelgruppe P Ic (Mörtel mit hydraulischem Kalk)	–	Dünnbettmörtel DM / M10	Kalk-Zement-Mörtelgruppe P IIb (Kalk-Zement-Mörtel)
Druckfestigkeit f_k [N/mm ²]	1,8	10	< 1.000	0,4
Rohdichte ρ [kg/m ³]	≤ 1.200	700	< 1.000	≈ 600
Wärmeleitfähigkeit λ_R [W/(m*K)]	0,440	0,100	0,210	0,070
Diffusionswiderstand μ [-]	< 20	5	15	8
Schichtdicke d [cm]	1,0	36,5	0,1	3,5
Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	< 0,20	1,83	–	0,28
Regelwerke	DIN 18550	DIN 105-2 DIN EN 771-1	DIN EN 998-2 DIN V 18580	DIN V 18550
Format $L_x B_x H$ [mm]	–	10 DF 200x365x249	–	–
Bemerkungen	–	Stoßfugenverzahnung, Dünnbettverfahren	–	Unterputz $d_1 = 2,5$ cm, Oberputz $d_2 = 1,0$ cm

¹⁵¹ Der U -Wert des Bauteils beträgt 0,24 W/(m²*K). Die geringe Rohdichte der Ziegel wird durch porosierte Ziegelscherben und eine optimierte Gestaltung der Luftkammern mit Stegdicken von lediglich 4 mm erreicht. Die Wärmeleitfähigkeit λ des Ziegels kann somit auf Werte kleiner als 0,100 W/(m*K) reduziert werden. Die EnEV 2014 (Tabelle 1) fordert für Außenwände in Wohngebäuden mit Innentemperaturen größer als 19 °C einen Wärmedurchgangskoeffizienten $U \leq 0,24$ W/(m²*K).

5.2.3 Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen

Konstruktion

Das Dünnbettmauerwerk ist aus großformatigen, bindemittelgebundenen Porenbeton-Plansteinen mit einer Rohdichte von 350 kg/m^3 und der Dimension $449 \times 365 \times 249 \text{ mm}$ gefügt.¹⁵² Die Netto-Wandstärke beträgt somit $36,5 \text{ cm}$. Die Stoßflächen der Plansteine sind mit Griffmulden und Nut-Feder-Verbindungen ausgeführt, so dass die Mauersteine im mittigen Verband ohne planmäßig vermörtelte Stoßfugen knirsch versetzt werden.¹⁵³ Die Rezeptur des hochporösen¹⁵⁴, mineralischen Baustoffs Porenbeton basiert in den überwiegenden Fällen auf mehlflein gemahlenem Quarzsand, dem Bindemittel Branntkalk, dem Porosierungsmittel Aluminium und Wasser.¹⁵⁵ Die Plansteine sind Vollziegel mit homogen verteilten Gefügebestandteilen, ohne Lochanteile oder ähnlichem.¹⁵⁶

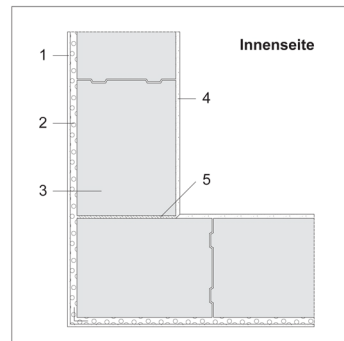
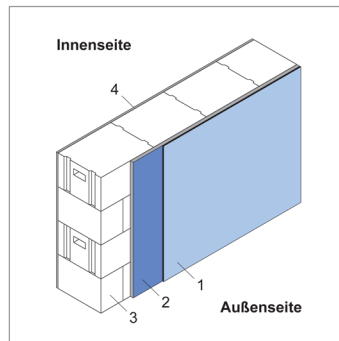
Bild 21

Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen im Dünnbettverfahren mit Stoßfugenverzahnung

Links: Isometrische Darstellung der Schichtenfolge

Rechts: Horizontalschnitt an einer Außenecke

- 1 mineralischer Oberputz, $d = 10 \text{ mm}$
- 2 Wärmedämmputz, $d = 25 \text{ mm}$
- 3 Mauerwerk aus Porenbeton-Planstein, $d = 365 \text{ mm}$
- 4 Kalkputz, $d = 10 \text{ mm}$
- 5 Mörtelfuge



Das Putzsystem, welches bereits im Abschnitt 5.2.2, beschrieben wurde, wird auch bei dieser Einsteinmauerwerkskonstruktion verwendet. Demnach wird raumseitig ein Kalkputz mit einer Schichtstärke von $1,0 \text{ cm}$ ausgeführt, während

- ¹⁵² Die Trockenrohddichte entspricht dem Mindestwert für tragende Bauteile von 350 kg/m^3 .
- ¹⁵³ Das Überbindemaß (Versetzmaß) ist der DIN 1053-1 beziehungsweise der entsprechenden allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) zu entnehmen. Nach DIN 1053-1 entspricht das Überbindemaß:

$$\ddot{u} \geq 0,4 \cdot h_{\text{Stein}} \geq 45 \text{ mm}.$$
- ¹⁵⁴ Die Porosität ϕ der Porenbeton-Plansteine beträgt zwischen 65 und 90 V.-% .
- ¹⁵⁵ Weitere Rezepturen enthält zum Beispiel Scholz et al. (2010).
- ¹⁵⁶ Zu den Gefügebestandteilen zählen die Luftporen und der Feststoff (Calciumsilikathydrate). Vergleiche Schlegel und Hums (2002).

außenseitig ein zweilagiger Wärmedämmputz mit 2,5 cm starken Unter- und 1,0 cm starken Oberputz appliziert wird. Diese Schichtenfolge erreicht ohne zusätzliche Wärmedämmebene einen Wärmedurchgangskoeffizient U von $0,21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Sie erfüllt somit die in der EnEV 2014 formulierten energetischen Anforderungen an Außenwände.¹⁵⁷

Tabelle 9
Eigenschaftskennwerte für einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen im Dünnbettverfahren mit Stoßfugenverzahnung

Eigenschaftskennwerte

	Bekleidung innen	Wandbildner	Mauermörtel	Bekleidung außen
	Kalk-Innenputz	Porenbeton-Planstein (PP)	deckelnder Dünnbettmörtel (DM)	Wärmedämmputz
Produktbezeichnung	<i>Maxit Purcalc 381</i>	<i>PORIT Planstein PPW 2-0,35</i> Planstein DIN 4165-PPW2-0,35-449x365x249 N+F	<i>Maxit Mur 900 D</i>	<i>Baumit DP 85</i>
Baustoffgruppe	Kalkmörtelgruppe P Ic (Mörtel mit hydraulischem Kalk)	–	Dünnbettmörtel DM / M10	Kalk-Zement-Mörtelgruppe P IIb (Kalk-Zement-Mörtel)
Druckfestigkeit f_k [N/mm ²]	1,8		< 1.000	0,4
Rohdichte ρ [kg/m ³]	≤ 1.200	350	< 1.000	≈ 600
Wärmeleitfähigkeit λ_R [W/(m ² K)]	0,440	0,090	0,210	0,070
Diffusionswiderstand μ [-]	< 20	5	15	8
Schichtdicke d [cm]	1,0	36,5	0,1	3,5
Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	0,20	1,83	–	0,28
Regelwerke	DIN 18550	DIN 4165 DIN EN 771-4	DIN EN 998-2 DIN V 18580	DIN V 18550
Format LxBxH [mm]	–	449x365x249	–	–
Bemerkungen	–	Stoßfugenverzahnung, Dünnbettverfahren	–	Unterputz $d_1 = 2,5 \text{ cm}$, Oberputz $d_2 = 1,0 \text{ cm}$

¹⁵⁷ Die EnEV 2014 (Tabelle 1) fordert für Außenwände in Wohngebäuden mit Innentemperaturen größer als 19 °C einen Wärmedurchgangskoeffizienten $U \leq 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

5.2.4 Einschaliges Mauerwerk aus Planhochlochziegeln mit integrierter Wärmedämmung

Konstruktion

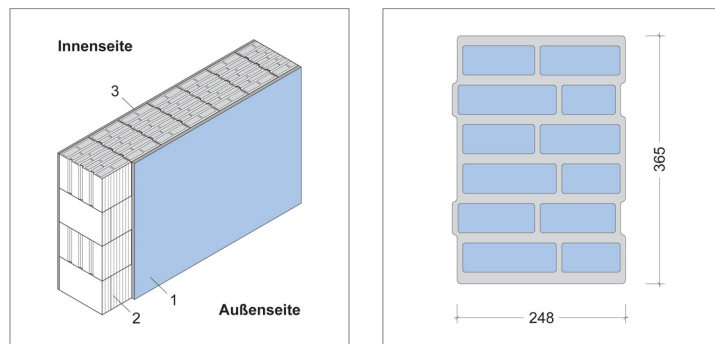
Für die Herstellung der einschaligen Außenwandkonstruktion werden Planhochlochziegel mit werkseitig integriertem Wärmedämmstoff verwendet.¹⁵⁸ Die Ausführung des Einsteinmauerwerks erfolgt im Dünnbettverfahren ohne Vermörtelung der Stoßfugen.¹⁵⁹ In den sechs Kammerreihen der Planhochlochziegel ist ein Dämmstoff aus vorkonfektionierten Mineralfaser-Formteilen eingearbeitet (siehe Bild 22 rechts).¹⁶⁰ Der mit dem Dämmstoff verfüllte Ziegel hat eine Rohdichte von 650 kg/m^3 . Sein Gesamtlochquerschnitt beträgt maximal 60,5 %. Die Planhochlochziegel haben eine Länge von 248 mm, eine Breite von 365 mm (Netto-Wandstärke) und eine Höhe von 249 mm (Ziegelformat 12 DF). Gemäß gültiger abZ wird für die Ausführung des Mauerwerks ein vollflächig aufgetragener Dünnbettmörtel mit Glasfilamentgewebe eingesetzt.¹⁶¹

Bild 22

Einschaliges Mauerwerk aus Planhochlochziegeln mit integrierter Wärmedämmung

Links: Isometrische Darstellung der Schichtenfolge

Rechts: Lochbild des verwendeten Planziiegels mit integrierter Dämmstofffüllung



- 1 mineralischer Faserleichtputz, $d = 20 \text{ mm}$
- 2 Mauerwerk aus Planhochlochziegeln mit integrierter Mineralfaser-Formteilen, 12 DF, $d = 365 \text{ mm}$
- 3 Kalkputz, $d = 10 \text{ mm}$

Die Konstruktion erhält innenseitig einen Kalkputz mit einer Schichtstärke von 1,0 cm und außenseitig einen mineralischen, faserbewehrten Leichtputz mit einer Schichtstärke von 2,0 cm. Dieser dient der dauerhaften Aufnahme von

¹⁵⁸ Vergleiche abZ des DIBt Nr. Z-17.1-906

¹⁵⁹ Die Stirnflächen der Planhochlochziegel sind mit Nut-Feder-Verbindungen versehen, die das Versetzen mit mörtelfreien Stoßfugen gewährleisten.

¹⁶⁰ Andere marktübliche Planziegel mit integrierter Wärmedämmung sind werkseitig mit gebundenen, hydrophobierten Perliten versehen. Rohperlit ist ein vulkanisches Glas, welches aufgrund seines Kristallwassergehaltes bei thermischer Behandlung zum Endprodukt Perlite expandiert (Granulat). Silikongetränkte Perlite sind hydrophob.

¹⁶¹ Für das Mauerwerk kann ein Bemessungswert für die Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,080 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$ angesetzt werden.

Zug- und Biegezugspannungen, die insbesondere bei hochwärmenden Mauerwerk aufgrund erheblicher thermischer Einwirkungen und den hieraus resultierenden Zwangsbeanspruchungen in der Putzmatrix zu berücksichtigen sind. Das Bauteil erreicht mit dieser Schichtenfolge einen Wärmedurchgangskoeffizienten U von $0,21 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

Tabelle 10
Eigenschaftskennwerte für einschaliges Mauerwerk aus Planhochlochziegeln mit integrierter Wärmedämmung

Eigenschaftskennwerte

	Bekleidung innen	Wandbildner	Mauermörtel	Bekleidung außen
	Kalk-Innenputz	Planhochlochziegel mit integrierter Wärmedämmung	deckelnder Dünnbettmörtel (DM)	Faserbewehrter Leichtputz
Produktbezeichnung	<i>Maxit Purcalc 381</i>	<i>THERMOPLAN MZ8</i> Planhochlochziegel	<i>Maxit Mur 900 D</i>	<i>Baunit Faser-Leichtputz FL 68</i>
Baustoffgruppe	Kalkmörtelgruppe P Ic (Mörtel mit hydraulischem Kalk)	–	Dünnbettmörtel DM / M10	Kalk-Zement-Mörtelgruppe P IIb (Kalk-Zement-Mörtel)
Druckfestigkeit f_k [N/mm ²]	1,8	6,0	–	1,5–5,0
Rohdichte ρ [kg/m ³]	≤ 1.200	650	< 1.000	≈ 900
Wärmeleitfähigkeit λ_R [W/(m·K)]	0,440	0,080	0,210	0,380
Diffusionswiderstand μ [-]	< 20	5	15	10–15
Schichtdicke d [cm]	1,0	36,5	0,1	2,0
Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	0,20	1,83	–	0,20–0,30
Regelwerke	DIN 18550	abZ Z-17.1-906	DIN EN 998-2 DIN V 18580	DIN V 18550
Format LxBxH [mm]	–	12 DF 248x365x249	–	–
Bemerkungen	–	Kammern werkseitig mit vorkonfektionierten nicht-brennbaren Mineralfaserdämmstoff-Formteilen gefüllt; Stoßfugenverzahnung; Dünnbettverfahren	–	–

5.2.5 Einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung

Konstruktion

Das mehrschichtige Einsteinsmauerwerk wird aus großformatigen Leichtbeton-Hohlblöcken gefügt. Die Hohlblöcke sind fünfseitig geschlossene Mauersteine mit jeweils drei Luftkammern senkrecht zur Lagerfläche. Die Luftkammern sind oberseitig abgedeckt, das heißt der Mauerstein ist auf seiner Oberseite geschlossen, damit ein Mörtelauftrag möglich ist. Die Baustoffmatrix des Leichtbetons hat eine haufwerksporige Struktur, welche durch das gezielte Auslassen beziehungsweise Reduzieren einzelner Korngruppen in der Sieblinie leichter Gesteinskörnungen erreicht wird. Als Gesteinskörnung fungiert Blähton, der über ein poriges Gefüge und eine raue Oberfläche verfügt. Die Rohdichte der Hohlblöcke wird mit dieser Rezeptur auf 700 kg/m^3 eingestellt.

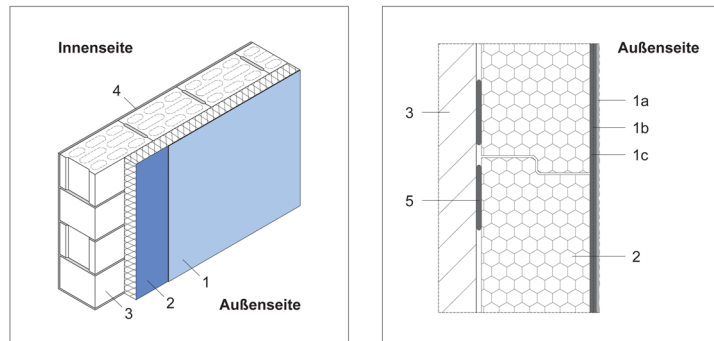
Bild 23

Einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit zusätzlicher außenliegender Wärmedämmung

Links: Isometrische Darstellung der Schichtenfolge

Rechts: Aufbau des Wärmedämm-Verbundsystems

- 1 mehrlagiger Dünnschichtputz, $d = 7 \text{ mm}$
- 1a mineralischer Dünnschichtdeckputz, $d = 2 \text{ mm}$
- 1b Textilglasgewebe
- 1c mineralischer Unterputz, zweilagig, $d = 5 \text{ mm}$
- 2 Polystyrol-Hartschaum Fassadendämmplatte mit Stufenfalz, $d = 120 \text{ mm}$
- 3 Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken, 20 DF, $d = 300 \text{ mm}$
- 4 Kalk-Zement-Putz, $d = 15 \text{ mm}$
- 5 mineralischer Klebmörtel, punktwise appliziert



Die verwendeten Hohlblöcke haben eine Länge von 496 mm, eine Breite von 300 mm (Netto-Wandstärke) und eine Höhe von 238 mm (Steinformat 20 DF). Die Ausführung des Mauerwerks erfolgt im Dickbettverfahren, das heißt entsprechend der oktametrischen Maßordnung beträgt die Höhe der Lagerfugen 12 mm. Die Stirnflächen der verwendeten Hohlblöcke werden stumpf gestoßen und anschließend die Mörteltaschen verfüllt. Zur Gewährleistung eines zulässigen Wärmedurchgangskoeffizienten U ist die Mauerwerkskonstruktion zusätzlich mit einem außenliegenden Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS)¹⁶² versehen, dessen Basis 12 cm starke Fassadendämmplatten aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum der Wärmeleitfähigkeitsgruppe

¹⁶² Die Verwendung eines WDVS ist stets systemgebunden und erfordert dessen allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, in der alle Systemkomponenten sowie die Verarbeitung definiert sind.

035 bilden. Der Haftverbund an der Grenzfläche Mauerstein-Dämmstoff wird durch punktuell applizierten Klebemörtel erzielt. Zu den weiteren Systemkomponenten gehören ein vollabdeckend aufgezogener Klebe- und Armierungsmörtel mit eingebettetem Armierungsgewebe (Textilglasgittergewebe) sowie ein mineralischer Leichtputz auf Kalk-Zement-Basis als Dünnschichtdeckputz. Innenseitig ist ein Kalk-Zement-Putz mit einer Schichtstärke von 1,5 cm aufgetragen. Das Bauteil erreicht mit dieser Schichtenfolge einen Wärmedurchgangskoeffizienten U von $0,22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Tabelle 11
Eigenschaftskennwerte für einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit zusätzlicher außenliegender Wärmedämmung

Eigenschaftskennwerte

	Bekleidung innen	Wandbildner	Mauermörtel	Bekleidung außen
	Putzmörtel	Leichtbeton-Hohlblock (Hbl)	Normalmauermörtel (NM)	Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) WAP
Produktbezeichnung	<i>Baumit Kalk-Zement-Putz KZP 65</i>	<i>RÖCKELEIN DIN V 18151-Hbl-2-0,7-20DF (300) N+F</i>	<i>Baumit Mauermörtel MM 95</i>	<i>CAPAROL Dalmatiner Fassaden-dämmplatte</i>
Baustoffgruppe	Kalk-Zement-Mörtelgruppe P IIb (Kalk-Zement-Mörtel)	–	Normalmauermörtel NM IIa / M5	Expandierter Polystyrol-Hartschaum (EPS)
Druckfestigkeit f_k [N/mm ²]	1,5–5,0	2,5	> 5,0	–
Rohdichte ρ [kg/m ³]	1.900	700	1.800	18
Wärmeleitfähigkeit λ_R [W/(m*K)]	1,000	0,32	1,200	0,035
Diffusionswiderstand μ [-]	10-15	5–10	15	20-50
Schichtdicke d [cm]	1,5	30,0	Lagerfuge 1,2 cm, Stoßfuge 1,0 cm	12,0
Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	0,15–0,23	1,5–3,0	–	2,4–6,0
Regelwerke	DIN V 18580	DIN V 18151 DIN EN 771-3	DIN EN 998-2	DIN EN 13163
Format $L \times B \times H$ [mm]	–	20 DF 496x300x238	–	–
Bemerkungen	–	Stirnflächen mit Mörteltaschen; Dickbettverfahren	–	mit Klebe- und Armierungsmörtel, Glasgittergewebe und Deckputz

5.2.6 Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit außenliegender Wärmedämmung

Konstruktion

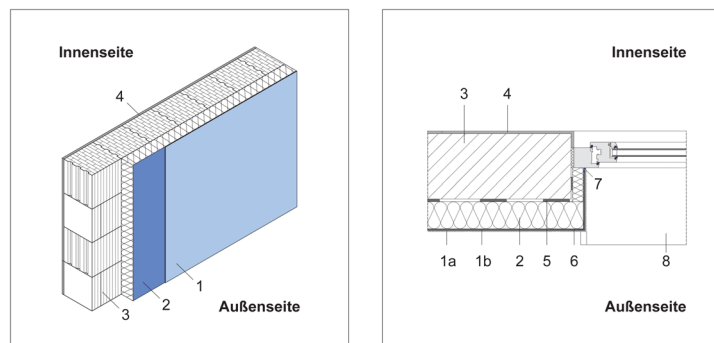
Die einschalige Mauerwerksscheibe ist aus Hochlochziegeln mit einer Rohdichte ρ von 800 kg/m^3 und den Kantenlängen $247 \times 240 \times 249 \text{ mm}$ (Ziegelformat 8 DF) sowie einem deckelnden Dünnbettmörtel gefügt. Die Netto-Wandstärke des Einsteinsmauerwerks entspricht der Ziegelbreite von 24 cm . Die großformatigen Mauerziegel verfügen an ihren Stirnflächen über ein Nut-Feder-System, welches die mörtelfreie Ausführung der Stoßfugen erlaubt.

Bild 24

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit zusätzlicher außenliegender Wärmedämmung

Links: Isometrische Darstellung der Schichtenfolge

Rechts: Horizontalschnitt, Bauwerksanschluss Fenster



- 1 mehrlagiger Dünn-schichtputz, $d = 7 \text{ mm}$
- 1a Kunstharzoberputz, $d = 2 \text{ mm}$
- 1b mineralischer Unterputz, zweilagig, mit Textilglasgittergewebe, $d = 5 \text{ mm}$
- 2 Polystyrol-Hartschaum Fassadendämmplatte, $d = 100 \text{ mm}$
- 3 Mauerwerk aus Hochlochziegeln, $d = 240 \text{ mm}$
- 4 Kalkputz, $d = 10 \text{ mm}$
- 5 mineralischer Klebemörtel, punktweise appliziert
- 6 Eckschutzschiene
- 7 Anputzleiste
- 8 Fensterbank

Die raumseitige Wandbekleidung bildet ein Kalkputz mit einer Schichtstärke von $1,0 \text{ cm}$. Das außenliegende, bauphysikalisch erforderliche Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) ist punktuell mit dem tragenden Untergrund verklebt. Zu den Systemkomponenten gehören 10 cm starke Dämmstoffplatten aus expandierten Polystyrol (EPS).¹⁶³ Der dünn-schichtige, mehrlagige Außenputz ist aufgrund der dahinterliegenden, gering wärmeleitenden Dämmstoffschicht hygrisch und thermisch weitgehend vom Untergrund entkoppelt. Aus diesem Grund ist die hygro-thermische Beanspruchung der Putzschicht größer als etwa bei Außenputzen auf monolithischen Mauerwerkskonstruktionen. Um die Bildung von Rissen infolge resultierender Zwangsspannungen in der Putzmatrix zu begrenzen, wird ein alkalibeständiges Textilglasgittergewebe in den zweilagig ($2 \times 2,5 \text{ mm}$) aufgetragenen Unterputz eingelegt. Auf diesem gewebe-armierten Unterputz ist ein 2 mm dicker, organisch gebundener Deckputz

¹⁶³ Die Fassadendämmplatten aus EPS werden der Wärmeleitfähigkeitsgruppe 035 zugeordnet.

(größter Korndurchmesser = 2 mm) aufgezogen und mit einem Farbanstrich versehen. Die beschriebene Schichtenfolge der zu untersuchenden Konstruktion erreicht einen Wärmedurchgangskoeffizienten U von $0,22 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, wodurch sie auch den energetischen Anforderungen der EnEV 2014 genügt.

Tabelle 12
Eigenschaftskennwerte für einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit zusätzlicher außenliegender Wärmedämmung

Eigenschaftskennwerte

	Bekleidung innen	Wandbildner	Mauermörtel	Bekleidung außen
	Kalk-Innenputz	Hochlochziegel (HLz)	deckelnder Dünnbettmörtel (DM)	Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) WAP
Produktbezeichnung	<i>Maxit Purcalc 381</i>	<i>EDER Thermopor P 016 N+F</i> Planziegel DIN 105-HLzW-12-0,8-8 DF (240)	<i>Maxit Mur 900 D</i>	<i>CAPAROL Dalmatiner Fassaden-dämmplatte</i>
Baustoffgruppe	Kalkmörtelgruppe P Ic (Mörtel mit hydr. Kalk)	–	Dünnbettmörtel DM / M10	Expandierter Polystyrol-Hartschaum (EPS)
Druckfestigkeit f_k [N/mm ²]	1,8	12	< 1.000	–
Rohdichte ρ [kg/m ³]	≤ 1.200	800	< 1.000	18
Wärmeleitfähigkeit λ_R [W/(m ² K)]	0,440	0,160	0,210	0,035
Diffusionswiderstand μ [-]	< 20	5	15	20–50
Schichtdicke d [cm]	1,0	24,0	0,1	10,0
Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	< 0,20	1,20	–	2,0–5,0
Regelwerke	DIN 18550	DIN 105-1 DIN EN 771-1	DIN EN 998-2 DIN V 18580	DIN EN 13163
Format LxBxH [mm]	–	8 DF 247x240x249	–	–
Bemerkungen	–	Stoßfugenverzahnung, Dünnbettverfahren	–	mit Klebe- und Armiierungsmörtel, Glasgittergewebe und Deckputz

5.2.7 Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade

Konstruktion

Analog zu der bereits im Abschnitt 5.2.6 beschriebenen Mauerwerkskonstruktion dient ein eigenschafts- und formatgleicher Hochlochziegel als lasttragender Wandbaustoff für dieses Einsteinsmauerwerk im Dünnbettverfahren. Die hinterlüftete Außenwandbekleidung entkoppelt die bewitterte Bauteiloberfläche von der dahinterliegenden Schichtenfolge.¹⁶⁴ Zur Begrenzung von Transmissionswärmeverlusten durch das opake Bauteil wird die äußere Wandbekleidung als vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF) ausgeführt.¹⁶⁵

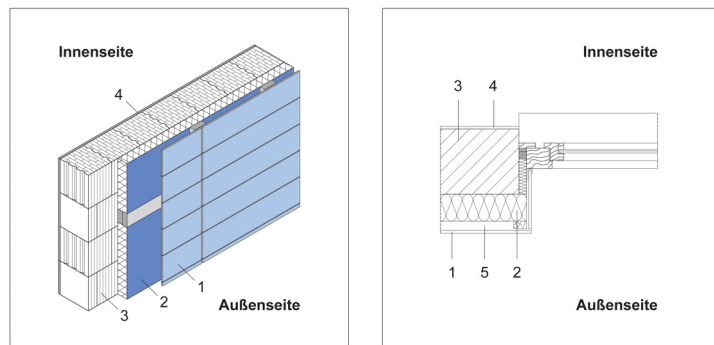
Bild 25

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade

Links: Isometrische Darstellung der Schichtenfolge

Rechts: Horizontalschnitt, Bauwerksanschluss Fenster

- 1 Fassadenpaneel, Faserzement, $d = 10 \text{ mm}$, mit Trag- und Konterlattung aus Holz
- 2 Außendämmung hinter Bekleidung (WAB), Fassaden-Dämmplatte aus Steinwolle, einseitig mit Glasvlies kaschiert, $d = 100 \text{ mm}$
- 3 Mauerwerk aus Hochlochziegeln, 8 DF, $d = 240 \text{ mm}$
- 4 Kalkputz, $d = 10 \text{ mm}$
- 5 Luftraum



Die aus Faserzement hergestellten Fassadenpaneele sind über eine Holzunterkonstruktion mit dem Verankerungsgrund verbunden.¹⁶⁶ Das Fassadenbild wird durch die horizontale Verlegung planebener, vollkantiger Fassadenpaneele ohne Überdeckung mit offenen Fugen der Breite von 5 mm geprägt. Als Wärmedämmung fungieren mineralische, kunstharzgebundene Faserdämmstoffplatten (Steinwolle)

¹⁶⁴ VHF sind aufgrund ihres konstruktiven Aufbaus (Differentialbauweise) und der ihnen zugrunde liegenden Verbindungstechnik vollständig in ihre Systembestandteile zerlegbar.

¹⁶⁵ Die Ausführung erfolgt nach DIN 18516-1 Außenwandbekleidungen, hinterlüftet – Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze.

¹⁶⁶ Für die Holzunterkonstruktion (Trag- und Konterlattung) werden Latten mit einem Profilquerschnitt von 60 x 40 mm verwendet. Der Achsabstand zwischen den vertikalen Traglatten wird durch die Windlast, die Gebäudehöhe, den Standort sowie durch das Eigengewicht der Fassadenpaneele bestimmt. Die mechanische Verankerung der Paneele auf der Unterkonstruktion sowie der Unterkonstruktion auf dem Untergrund erfolgt jeweils mit Schraubverbindungen. Die konstruktiv einfach ausführbaren offenen Fugen sind mit einem Fugenband aus Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (Kurzzeichen EPDM) oder Aluminium hinterlegt, um die Holzunterkonstruktion vor Witterungseinflüssen zu schützen.

mit einer Schichtstärke von 10 cm, die ohne zusätzliche mechanische Befestigung mit dem Untergrund zwischen der horizontalen Konterlattung angeordnet sind.¹⁶⁷ Die auf der Außenseite zusätzlich mit einem schwarzen Glasvlies kaschierten, hydrophobierten Dämmstoffplatten entsprechen der WLG 035. Die raumseitige Wandbekleidung bildet ein Kalkputz mit einer Schichtstärke von 1,0 cm. Der Wärmedurchgangskoeffizient U von 0,22 W/(m²*K).

Tabelle 13
Eigenschaftskennwerte für einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit zusätzlicher außenliegender Wärmedämmung und hinterlüfteter Außenwandbekleidung

Eigenschaftskennwerte

	Bekleidung innen	Wandbildner	Mauermörtel	Bekleidung außen
	Kalk-Innenputz	Hochlochziegel (HLz)	deckelnder Dünnbettmörtel (DM)	Vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF) mit WAB
Produktbezeichnung	<i>Maxit Purcalc 381</i>	<i>EDER Thermopor P 016 N+F</i> Planziegel DIN 105-HLzW-12-0,8-8 DF (240)	<i>Maxit Mur 900 D</i>	<i>Eternit CEDRAL Fassadenpaneele; Knauf Insulation Fassaden-Dämmplatte FPL-035</i>
Baustoffgruppe	Kalkmörtelgruppe P Ic (Mörtel mit hydr. Kalk)	–	Dünnbettmörtel DM / M10	–
Druckfestigkeit f_k [N/mm ²]	1,8	12	< 1.000	–
Rohdichte ρ [kg/m ³]	≤ 1.200	800	< 1.000	WAB: ≈ 100
Wärmeleitfähigkeit λ_R [W/(m*K)]	0,440	0,160	0,210	WAB: 0,035
Diffusionswiderstand μ [-]	< 20	5	15	WAB: 1
Schichtdicke d [cm]	1,0	24,0	0,1	WAB: 10
Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	< 0,20	1,20	–	WAB: 0,10
Regelwerke	DIN 18550	DIN 105 DIN EN 771-1	DIN EN 998-2 DIN V 18580	WAB: DIN EN 13162 VHF: DIN EN 12467
Format $L_x B_x H$ [mm]	–	8 DF 247x240x249	–	Fassadenpaneel 3.600x190x10
Bemerkungen	–	Stoßfugenverzahnung, Dünnbettverfahren	–	–

¹⁶⁷ Bei größeren Dämmstoffdicken ist die Wärmedämmung mit Tellerdübeln am Verankerungsgrund zu befestigen. Das Kurzzeichen der „Außendämmung der Wand hinter Bekleidung“ nach DIN 4108-10 ist WAB. Die Dämmstoffplatten sind stumpf gestoßen.

5.2.8 Zweischaliges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung

Konstruktion

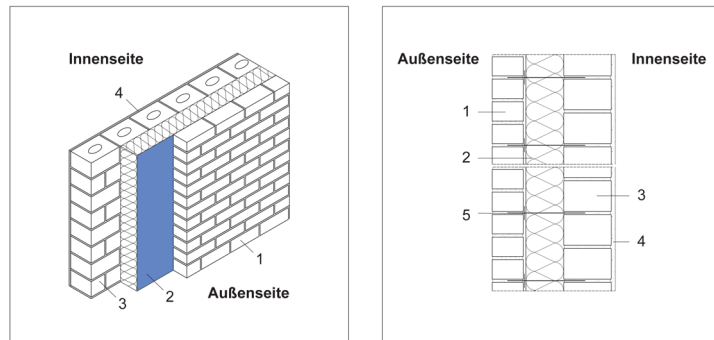
Die zweischalige Mauerwerkskonstruktion besteht aus zwei parallelen, massiven Wandscheiben und einer dazwischenliegenden Wärmedämmung. Die innere, statisch wirksame Wandscheibe ist aus mittelformatigen Kalksand-Lochsteinen gefertigt, deren Rohdichte auf etwa 1.400 kg/m^3 eingestellt ist. Die Mauersteine haben eine Länge von 240 mm, eine Breite von 175 mm und eine Höhe von 113 mm (3 DF). Das Einsteinauerwerk wird im Dickbettverfahren mit vermörtelten Lager- und Stoßfugen ausgeführt. Als äußere Wandscheibe fungiert eine Sichtmauerwerkskonstruktion aus normalformatigen Kalksand-Verblendsteinen (Vollsteine) im Läuferverband mit einer Rohdichte von circa 2.000 kg/m^3 .

Bild 26

Zweischaliges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung

Links: Isometrische Darstellung der Schichtenfolge

Rechts: Vertikalschnitt



- 1 KS-Verblender, NF, $d = 115 \text{ mm}$
- 2 Kerndämmung von zweischaligem Mauerwerk (WZ), Dämmplatte aus Steinwolle, einseitig mit Glasvlies kaschiert, $d = 140 \text{ mm}$
- 3 Mauerwerk aus KS-Lochsteinen, 3 DF, $d = 240 \text{ mm}$
- 4 Kalk-Zement-Putz, $d = 15 \text{ mm}$
- 5 Drahtanker mit Tropf- und Klemmscheibe

Die DIN EN 1996-1-1 nennt vier grundlegende Ausführungsvarianten für zweischaliges Mauerwerk, gleichwohl lediglich die Konstruktionen mit Luftschicht und Wärmedämmung sowie mit Kerndämmung baupraktisch bedeutend sind. Bei Neubauvorhaben entfällt jedoch zunehmend der mindestens 4 cm breite Luftzwischenraum, um den Wärmedurchgangskoeffizienten des Bauteils zu optimieren.¹⁶⁸ Als weiteren Vorteil der Kerndämmung nennt Künzel (1998) die höhere Ausführungssicherheit. Zwischen den Schalen der untersuchten Konstruktion ist eine 14 cm starke Wärmedämmung (Kurzzeichen WZ¹⁶⁹) aus mineralischen, kunstharzgebundenen

¹⁶⁸ Vergleich zum Beispiel Künzel (1998). Infolge der „nicht ruhenden“ (mit der Außenluft in Verbindung stehenden) Luftschicht, wird der Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion nachteilig erhöht.

¹⁶⁹ Der DIN 4108-10 folgend, indiziert das Kurzzeichen WZ die Anwendung der Wärmedämmung in zweischaligen Außenwandkonstruktionen sowie als Kerndämmung.

Fasern (Steinwolle) angeordnet.¹⁷⁰ Sowohl diese hydrophobierten Fassadendämmplatten der WLG 035 als auch die Verblendschale sind mit korrosionsbeständigen Drahtkern mit dem Untergrund verbunden. Die Außenwand ist innen-seitig mit einem Kalk-Zement-Putz mit einer Schichtstärke von 1,5 cm bekleidet. Der *U*-Wert der skizzierten Schichtenfolge beträgt 0,22 W/(m²*K).

Tabelle 14
Eigenschaftskennwerte für zweischaliges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung

Eigenschaftskennwerte

	Bekleidung innen	Innen-schale	Mauer-mörtel	Wärme-dämmung	Außen-schale
	Putzmörtel	Kalksandstein KS-Lochstein (KS-L)	Normal-mauermörtel (NM)	Mineralische, kunstharzgeb. Fasern als WZ	Kalksandstein KS-Verblender (KS-Vb)
Produkt-bezeichnung	<i>Baumit Kalk-Zement- Putz KZP 65</i>	<i>Heidelberger KS-Lochstein Kalksandstein DIN V 106- KSL-12-1,4-3 DF (175)</i>	<i>Baumit Mauermörtel MM 95</i>	<i>Knauf Insulation Fassaden- Dämmplatte FPL-035</i>	<i>Heidelberger KS-Verblender Kalksandstein DIN 106-KS Vb20-2,0-NF</i>
Baustoffgruppe	Kalk-Zement-Mörtelgruppe P IIb (Kalk-Zement-Mörtel)	–	Normal-mauermörtel NM IIa / M5	–	–
Druckfestigkeit f_k [N/mm ²]	1,5–5,0	12	> 5,0	–	20
Rohdichte ρ [kg/m ³]	1.900	1.400	1.800	≈ 100	2.000
Wärmeleitfähigkeit λ_R [W/(m*K)]	1,000	0,700	1,200	0,035	1,100
Diffusions-widerstand μ [-]	10–15	5–10	15	1	25
Schichtdicke d [cm]	1,5	17,5	Lagerfuge 1,2 cm, Stoß-fuge 1,0 cm	10	11,5
Diffusionsäquivalente Luftschicht s_d [m]	0,15–0,23	0,88–1,76	–	0,10	2,88
Regelwerke	DIN V 18580	DIN V 106 DIN EN 771-2	DIN EN 998-2	DIN EN 13162	DIN V 106
Format $L_x B_x H$ [mm]	–	3 DF 240x175x113	–	–	NF 240x115x71
Bemerkungen	–	Dickbettverfahren	–	–	Dickbettverfahren

¹⁷⁰ Nach DIN 1053-1 ist ein maximaler Abstand zwischen Innen- und Außenschale von 15 cm zulässig.

6 Labortechnische Analyse des Feuchteverhaltens

6.1 Ziele und Beschreibung des Verfahrens

Zu den maßgebenden empirischen Methoden für die Untersuchung des Verhaltens separierter Baustoffe bei intensiver hygrischer Beanspruchung zählen Experimentalstudien. Außerhalb normativer Regelungen befinden sich in diesem Zusammenhang Verfahren für die quantitative Analyse von Feuchtetransportvorgängen in gefügten Konstruktionen. Ein Schwerpunkt dieser Arbeit bezieht sich daher auf die Beschreibung eines geeigneten Modellversuches. Die Grundzüge der Methode und ihre Abgrenzung zu numerischen Simulationsverfahren sind bereits im Abschnitt 4.2.3 auf Seite 66 beschrieben worden.

Die Feuchtebewegung in hygroskopischen, kapillarporösen Baustoffen basiert stets auf der Kombination dampfförmiger und flüssiger Feuchteströme.¹⁷¹ Diese stehen sowohl mit den Temperatur- und Feuchtegradienten als auch mit den Baustoffeigenschaften, und hier vor allem der Rohdichte, Porosität und der Porenradienverteilung, in komplexen Wechselbeziehungen. Bei Hochwasserbeanspruchung erfolgt der Massentransport praktisch vollständig in der Flüssigphase, das heißt das Wasser verteilt sich im Baustoff infolge eines Kapillardruckunterschiedes¹⁷² mit einer bestimmten Geschwindigkeit.¹⁷³

Die empirische Datengewinnung basiert auf systematischen Laboruntersuchungen und beinhaltet die messtechnische Analyse der Feuchteverteilung in ausgewählten Mauer-

Ziele

¹⁷¹ Vergleich zum Beispiel DIN EN ISO 15148

¹⁷² Wassertransport in flüssiger Form findet in den wassergefüllten Porenbereichen und an den wasserbenetzten inneren Oberflächen poröser Medien statt. Treibende Kraft für den Flüssigtransport sind räumliche Druckunterschiede in der Flüssigphase. Dieses Saugspannungsgefälle bedingt, dass Wasser in flüssiger Form von Bereichen höherer Wassergehalte in Bereiche geringerer Wassergehalte geleitet beziehungsweise gesaugt wird.

¹⁷³ Der Wassertransport in der Gasphase (Wasserdampftransport) erfordert einen Dampfdruckunterschied als treibende Kraft. Ein Dampfdruckunterschied, der einen druckausgleichenden Dampfdiffusionsstrom vom hohen zum niedrigen Partialdampfdruck bedingt, hängt wiederum von den Gradienten der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit ab. Unter Laborbedingungen herrschte jedoch kein Dampfdruckgefälle, so dass der Transportmechanismus nicht vertieft untersucht wurde.

werksquerschnitten unter definierten, einheitlichen Randbedingungen. Der Modellversuch dient somit dem Zweck, die zeitabhängige Feuchteverteilung in den Schichtenfolgen der spezifisch gefügten Konstruktionen quantitativ zu analysieren und miteinander zu vergleichen. Hierbei ist von besonderem Interesse, die Wirkung bestimmter Konstruktionsmerkmale, wie etwa die Einflüsse unterschiedlicher Putzschichtstärken, Bindemittelarten oder Lagerfugendicken, zu erkunden. Auf dieser Grundlage kann anschließend unter anderem die feuchtebedingte Änderung charakteristischer Eigenschaftswerte, wie zum Beispiel die der Druckfestigkeit, bestimmt und bewertet werden. Darüber hinaus umfasst die Versuchsdurchführung die Messung der Wassermenge, die bei außenseitig anstehendem Wasser in flüssiger Form durch die Konstruktion gelangt und auf der dem Wasser abgewandte Seite austritt. Dieser Messwert ist ein Indikator für die Wasserleitfähigkeit der Außenwandkonstruktion.

Vorgehen

Um die zeitabhängige Änderung des Feuchtegehaltes und den Feuchteverlauf von Baustoffen in ihrer bautypischen Anordnung zu untersuchen, werden Schichtenfolgen üblicher Mauerwerkskonstruktionen über eine definierte Dauer einer intensiven Wasserbeanspruchung ausgesetzt, welche den Einwirkungen bei einem Hochwasserereignis mit geringen Fließgeschwindigkeiten entsprechen. Einwirkungen infolge hydrodynamischen Drucks (Fließgeschwindigkeit ≥ 1 m/s) oder Lastenanpralls werden ausdrücklich nicht betrachtet. Gemessen werden die sich einstellenden Feuchtegehalte in den Schichtenfolgen in verschiedenen Zeitabschnitten, um unterschiedliche Überflutungsdauern zu berücksichtigen. Das Laborexperiment bildet die Evidenzbasis für die Beantwortung der skizzierten Forschungsfragen und ist daher integraler Bestandteil des Dissertationsvorhabens.

Die Modellversuche fanden im Zeitraum von Juli 2011 bis Juli 2012 im Wasserbaulabor (Hubert-Engels-Labor) des Instituts für Wasserbau und Technische Hydrodynamik an der Technischen Universität Dresden statt. Die acht beschriebenen Schichtenfolgen wurden in vier Versuchsreihen analysiert.

6.2 Abgrenzung der betrachteten Einwirkungen

Die erste Forschungsfrage adressiert das Feuchteverhalten der ausgewählten Mauerwerkskonstruktionen. Für ihre Beantwortung im Laborexperiment sind zunächst Systemgrenzen festzulegen. Hierzu gehört die Abgrenzung und Beschreibung der studienrelevanten Hochwasserparameter. Die nachstehende Tabelle 15 fasst bedeutende, ereignisbezogene Hochwasserparameter zusammen und leitet die betrachteten Einwirkungen für die empirischen Untersuchungen der Außenwände ab.

Bei der Abgrenzung der betrachteten Einwirkungen sei hervorgehoben, dass kritische Wasserstandsdimensionen, welche zu nicht zulässigen Horizontallasten auf die Außenwandkonstruktionen und somit zum Verlust ihrer Stabilität führen können, ausdrücklich nicht Gegenstand des Versuchsprogramms sind.

Hochwasserparameter	Berücksichtigung in der Laborstudie	Beschreibung, Randbedingungen
Wassertiefe	Ja	<ul style="list-style-type: none"> – Parameter, dessen hohe Signifikanz im Hinblick auf die zu erwartenden hochwasserinduzierten Schäden bereits in Studien nachgewiesen ist – Vermeidung von Wasserstandsdimensionen, welche zu nicht zulässigen Horizontallasten auf die Gebäudehülle oder zu kritischen Auftriebskräften auf das gesamte Gebäude führen können – Wassertiefe im Laborversuch beträgt konstant 40 cm – die Standsicherheit aller untersuchter Konstruktionen ist bei dieser Wassertiefe nicht gefährdet
Überflutungsdauer	Ja	<ul style="list-style-type: none"> – 1. Versuchsphase: außenseitige Wasserbeanspruchung des Untersuchungsgegenstandes, Dauer: 72 Stunden – 2. Versuchsphase: kombinierte Einwirkung, das heißt weitere außen- und zusätzliche innenseitige Wasserbeanspruchung des Untersuchungsgegenstandes, Dauer: 24 Stunden

Tabelle 15
Kursorische Beschreibung der maßgebenden Hochwasserparameter und ihre Berücksichtigung in der Laborstudie

Hochwasserparameter	Berücksichtigung in der Laborstudie	Beschreibung, Randbedingungen
<i>Fortsetzung</i>		<ul style="list-style-type: none"> – die Wirkung des Parameters, das heißt die zeitabhängige Feuchteverteilung in der Konstruktion, wird nach der ersten und zweiten Versuchsphase dokumentiert
Häufigkeit / Wiederkehrintervall	Nein. Berücksichtigung bei der Nutzen-Kosten-Untersuchung (NKU)	<ul style="list-style-type: none"> – die statistische Wiederkehrwahrscheinlichkeit eines Hochwasserereignisses beeinflusst maßgeblich den wirtschaftlichen Nutzen baukonstruktiver Anpassungsmaßnahmen – Kaskadeneffekte, das heißt sukzessive Veränderungen von Materialeigenschaften bei mehrfacher Hochwasserbetroffenheit, werden jedoch nicht betrachtet
Fließgeschwindigkeit / Feststofftransport (Geschiebe)	Nein	<ul style="list-style-type: none"> – zur Wahrung der statischen Integrität der untersuchten Mauerwerkskonstruktionen werden keine hydrodynamischen Einwirkungen (Fließgeschwindigkeit $\vec{v} \geq 1 \text{ m/s}$) angesetzt, die zu strukturellen Schäden an der Gebäudehülle führen könnten – der Anprall von Einzellasten (Treibgut) und der Feststofftransport infolge Fließdynamik, die in Modellrechnungen in der Regel als statische Ersatzkraft beziehungsweise Ersatzdruck berücksichtigt sind, werden ebenfalls nicht betrachtet
Kontamination	Nein	<ul style="list-style-type: none"> – Flutwasser kann als Lösungsmittel für chemische oder biologische Schadstoffe (zum Beispiel Heizöl, bauschädliche Salze) dienen – konzentrierte Schadstoffe, die im Flutwasser nicht hinreichend verdünnt vorliegen, belasten die Bausubstanz bei direktem Kontakt und führen in vielen Fällen zu erheblichen Kontaminationschäden (Wahrnehmung häufig durch eine intensive Geruchsbelästigung)

Hochwasserparameter	Berücksichtigung in der Laborstudie	Beschreibung, Randbedingungen
<i>Fortsetzung</i>		<ul style="list-style-type: none"> – die nachhaltige Beseitigung von Verunreinigungen und die Wiederherstellung eines hygienisch unkritischen Zustandes sind in der Regel mit einem erhöhten technischen und finanziellen Aufwand verbunden – Effekte infolge Kontamination werden nicht betrachtet
Wellenhöhe	Nein	<ul style="list-style-type: none"> – die Energie einer Wasserwelle ist unter anderem abhängig vom Quadrat der Wellenhöhe – für Gebäude die gegenüber dieser Umweltgefahr exponiert sind, besteht häufig ein signifikantes Schadensrisiko – Wellenschlag ist in der Regel nur in Küstenregionen von hoher Bedeutung – der Parameter wird in der Untersuchung nicht betrachtet
Vorwarnzeit	Nein	<ul style="list-style-type: none"> – die Implementierung verschiedener objektbezogener, mobiler Barriersysteme, welche das Eindringen von Flutwasser zumindest verzögern, erfordert eine systemabhängige Vorwarnzeit – der Parameter ist für diese Untersuchung nicht relevant

6.3 Versuchsanordnung

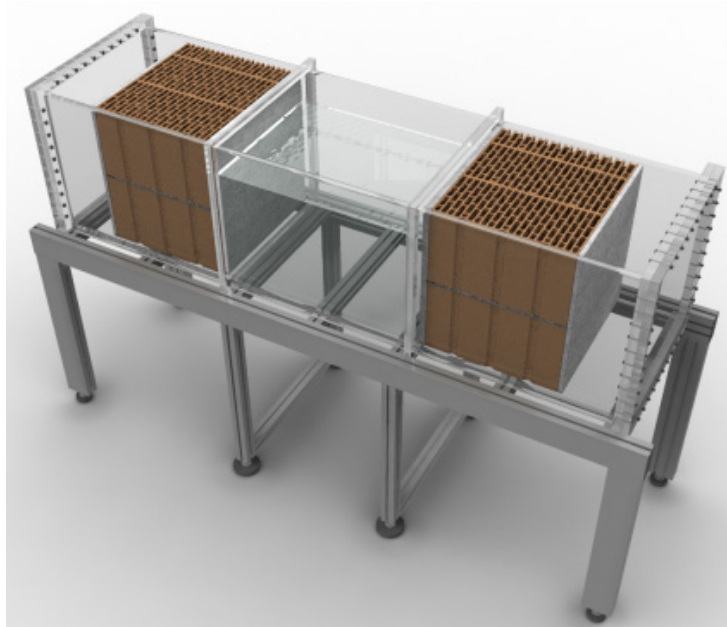
Für die Untersuchung des Bauteilverhaltens werden die beschriebenen Mauerwerkskonstruktionen in einem Wasserbecken errichtet und einer mehrtägigen Hochwasserbeanspruchung ausgesetzt.

Wasserbecken

Das in der Laborstudie verwendete quaderförmige Wasserbecken hat die Innenabmessungen: Länge 200 cm, Breite 50 cm und Höhe 50 cm. Die transparenten Seitenwände des Beckens bestehen aus 2 cm starkem Acrylglas und ermöglichen die allseitige Beobachtung des Versuchsablaufes.

Bild 27

Versuchsanordnung für die Analyse des Feuchteverhaltens von Außenwandquerschnitten bei intensiver Wasserbeanspruchung.



Die Stirnflächen des Beckens sind mit Schraubverbindungen befestigt, so dass sie sich für den erleichterten Auf- und Abbau der Mauerwerkskonstruktionen entfernen lassen. Um den wasserdichten Anschluss der Probekörper an den Beckenboden und die Seitenflächen zu gewährleisten und um eindimensionale Verhältnisse zu erhalten, werden 3 mm starke Metallbleche mit Silikon eingeklebt und anschließend mit Kehl Nähten (Stirn- beziehungsweise Flankennähte) abgedichtet (siehe Bild 28). Damit wird ein Hinterlaufen der Bleche vermieden. Die elastischen, punktuellen Klebeverbindungen sowie die umlaufenden Kehl Nähte auf Silikonbasis zwischen den Metallblechen und dem Acrylglas können nach jeder Versuchsreihe gelöst werden, um die Bleche vor ihrem nächsten Einsatz zu reinigen.

Im Beckenboden befinden sich drei verschließbare Öffnungen: eine in Beckenmitte für das Ablassen des Wassers am Versuchsende und je eine an den beiden Längsrändern des Beckens für die Messung des Wasservolumens, welches bei einseitiger Beanspruchung durch den Querschnitt auf die Rückseite der Konstruktion gelangt.¹⁷⁴

¹⁷⁴ Unterhalb der Bohrungen an den Längsrändern befindet sich ein Messzylinder.

Probekörper

Für die parallele Untersuchung von jeweils zwei Probekörpern in jeder der vier Versuchsreihen werden die Mauerwerkskonstruktionen im Wasserbecken derart angeordnet, dass sie sich mit ihren Außenseiten in einem Abstand von etwa 70 cm gegenüberstehen (siehe Bild 27). Entsprechend der Geometrie des Wasserbeckens sind die Probekörper etwa 50 cm breit¹⁷⁵ und bis zu 50 cm hoch¹⁷⁶.

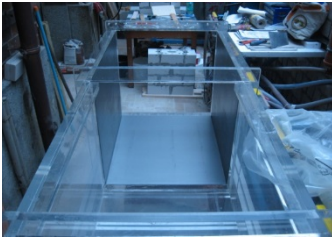


Bild 28

Links: Einkleben der 3 mm starken Metallbleche, die den wasserdichten Anschluss der Probekörper an den Beckenboden und die Seitenflächen gewährleisten

Rechts: Herstellung der Probekörper auf der Blechbekleidung im Wasserbecken

Die Probekörper verfügen über eine regelmäßige Form mit einem konstanten Querschnitt.¹⁷⁷ Bei einer Einfüllhöhe von 40 cm beträgt die vom Wasser beanspruchte Fläche etwa 50 x 40 cm, das heißt 2.000 cm². Während die Geometrie in Längen- und Breitenrichtung lediglich einen Ausschnitt abbildet, entspricht der Querschnitt der Probekörper der tatsächlichen Bruttowandstärke der jeweiligen Mauerwerkskonstruktion.

6.4 Versuchsdurchführung

Herstellen der Proben

Die Herstellung der Probekörper im Labor folgte den allgemein anerkannten Regeln der Technik, den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen sowie den jeweiligen Angaben der Produkthersteller zur Bauausführung. Alle hygroskopischen Baustoffe werden vor ihrer Verwendung konditioniert, das heißt sie lagern solange unter Laborklimabedingungen (siehe Tabelle 16) bis sich die jeweilige Ausgleichsfeuchte eingestellt hat und die Massekonstanz einer Probe

¹⁷⁵ Abzüglich 2 x 3 mm für die Bleche sowie 2 x 1 mm für die Silikonklebefläche.

¹⁷⁶ Die Höhe der Probekörper orientiert sich an der Mauersteinhöhe.

¹⁷⁷ Der Hinweis „konstanter Querschnitt“ bezieht jedoch nicht die gegebenenfalls vorliegenden anisotropen Eigenschaftswerte der planvoll verwendeten Baustoffe mit ein.

erreicht ist.¹⁷⁸ Der Anfangsfeuchtegehalt wird baustoffspezifisch vor der Herstellung der Probekörper gemessen und dokumentiert (siehe Abschnitt 6.5).

Untersuchungsgegenstand	EMW-Mz	EMW-HLz	EMW-PP	EMW-PziWD	EMW-Hbl_WDVS	EMW-HLz_WDVS	EMW-HLz_WD_VHF	ZMW-KS_WZ
Trocknungsdauer in [d]	28	28	28	28	28	28	28	28

Tabelle 16
Trocknungsdauer der jeweiligen Mauerwerkskonstruktionen

Vor ihrer Prüfung müssen die im Labor gefertigten Mauerwerkskonstruktionen trocknen, so dass zum Beispiel zementgebundene Schichten (Mauer- und Putzmörtel) ihre planmäßige Festigkeit entwickeln können.¹⁷⁹ Die Trocknungsdauer der jeweiligen Konstruktion hängt von den verwendeten Materialien ab und richtet sich unter anderem nach den Angaben der Hersteller (siehe Tabelle 16). Das Mindestalter der Probekörper zu Untersuchungsbeginn beträgt 28 Tage. Die Konditionierung und Trocknung sind eine wesentliche Voraussetzung für die Begrenzung von Oberflächenrissen.¹⁸⁰

Dauer

Die Gesamtdauer jeder Versuchsreihe beträgt vier Tage, wobei innerhalb der ersten drei Tage (72 Stunden) eine ausschließlich außenseitige Wasserbeanspruchung der Gebäudehülle untersucht wird. Die Zeitspanne beginnt mit dem vollständigen Befüllen des Wasserbeckens bis zur definierten Höhe von 40 cm. Im Verlauf eines weiteren Tages (24 Stunden) werden die Probekörper nicht nur außen-, sondern zusätzlich auch innenseitig beansprucht, um ein Hochwasserszenario mit eindringendem Flutwasser abzubilden.

¹⁷⁸ Die verwendeten Baustoffe lagerten vier Wochen in der geschlossenen Prüfhalle, bevor die Ausgangseigenschaften bestimmt wurden.

¹⁷⁹ Zementgebundene Baustoffe erreichen zum Beispiel ihren charakteristischen Wert der Druckfestigkeit nach 28 Tagen.

¹⁸⁰ Das Bilden von Oberflächenrissen infolge plastischem Trocknungsschwinden, das während der Modellversuche zum Teil beobachtet werden konnte, unterscheidet sich in seiner Ausprägung (Rissbild, Rissbreite) von der Realität, insbesondere aufgrund (i) der kleineren Dimensionen der Probekörper sowie (ii) der festen Einspannung der Untersuchungsgegenstände an den Kanten des Wasserbeckens. Vertiefte Untersuchungen zum kurz- und langzeitigem Trocknungsschwinden sind nicht Gegenstand der Laborstudie.

Die Festlegungen zur Überflutungsdauer orientieren sich unter anderem an DIN EN 12390-8 (Prüfung von Festbeton – Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck) und an den Bauteilversuchen von Escarameia et al. (2007).

Randbedingungen

Für die Durchführung der Modellversuche gelten die in Tabelle 17 angegebenen Randbedingungen beziehungsweise Festlegungen.

Randbedingung / Festlegung	Beschreibung
Raumklima ¹⁸¹	<ul style="list-style-type: none"> – Temperatur: 23 °C ± 2 K – Relative Luftfeuchte: 60 % ± 5 % – ein digitaler Datenlogger maß und dokumentierte die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit während der Versuchsdurchführung
Flutwasser	<ul style="list-style-type: none"> – Verwendung von Leitungswasser, um Schadensprozesse, die durch verunreinigtes Wasser ausgelöst werden, zu vermeiden – Wassertemperatur 20 °C
Füllhöhe	<p>Der Wasserbehälter wird bis zur definierten Höhe von 40 cm mit Leitungswasser befüllt. Der Wasserstand wird während der Dauer des Versuchs konstant gehalten. Es werden keine Fließbewegungen berücksichtigt. Die Festlegung der Wasserstandhöhe orientiert sich unter anderem an den Forderungen, dass</p> <ul style="list-style-type: none"> – mindestens eine Mauersteinschicht sowie die darüber liegende Lagerfuge überflutet ist, und dass – strukturelle Schäden, wie etwa Risse und Verformungen, beziehungsweise das Versagen des Bauteils infolge kritischer Wasserstandsunterschiede zwischen Außenseite und nicht geflutetem Innenraum, vermieden werden.

Tabelle 17
Randbedingungen und Festlegungen für die Durchführung der Modellversuche

¹⁸¹ Die Bedingungen hinsichtlich des Raumklimas und dessen Schwankungsbreite entsprechen den Vorgaben der DIN EN ISO 15148.

6.5 Gravimetrische Feuchtemessung

Allgemeine Informationen zum Verfahren

Die klassische gravimetrische Feuchtemessung (Darr-Methode) zählt zu den quantitativen Analyseverfahren, mit dem der Wassergehalt kapillarporöser Baustoffe direkt durch die Masseänderung beim Trocknen bestimmt wird.¹⁸² Dieses standardisierte und allgemein anerkannte Verfahren gilt aufgrund seiner Einfachheit und hohen Ergebnisgenauigkeit als Referenzmethode für die Feuchtemessung und dient daher anderen Methoden als Bezugsverfahren.¹⁸³ Ein erheblicher Nachteil des gravimetrischen Verfahrens ist jedoch der erforderliche, zerstörende Eingriff in das baukonstruktive Gefüge für die Entnahme der zu untersuchenden Materialproben. Daraus resultiert auch, dass eine wiederholte Feuchtemessung an identischen Bauteilkoordinaten nicht möglich ist. Eine fundierte Zusammenstellung üblicher Verfahren zur Feuchtemessung im Bauingenieurwesen enthalten zum Beispiel Krus (1995) und Leschnik (1999).

Die trockenmassebezogenen Feuchtegehalte u_i der i Materialproben wurden jeweils mit Hilfe des gravimetrischen Analyseverfahrens gemäß dem WTA-Merkblatt 4-11-02/D bestimmt. Nach Ermittlung der Sättigungsfeuchte $u_{s,i}$ kann zusammen mit dem trockenmassebezogenen Feuchtegehalt u_i der Durchfeuchtungsgrad DFG_i jeder Probe berechnet werden, welcher den Anteil des für Wasser zugänglichen Porenvolumens angibt, das zum Zeitpunkt der Probenentnahme tatsächlich mit Wasser gefüllt war. Darüber hinaus wird die Rohdichte ρ des trockenen Baustoffs ermittelt.

Für die Bewertung der ermittelten trockenmassebezogenen Feuchtegehalte wird die hygroskopische Ausgleichsfeuchte, zum Beispiel nach WTA-Merkblatt 4-5-99/D oder nach DIN 4108-4, in Bezug gesetzt. Die hygroskopische Ausgleichsfeuchte entspricht dem Feuchtegehalt, der sich im Baustoff in Abhängigkeit des Umgebungsklimas einstellt. Dieses hygroskopische Feuchtespeicherverhalten ist baustoffspezifisch und wird durch Sorptionsisothermen beschrieben. Für den Vergleich der Untersuchungsergebnisse wird die hygroskopische Ausgleichsfeuchte herangezogen,

¹⁸² Vergleiche DIN EN ISO 12570

¹⁸³ Leschnik (1999) nennt eine erreichbare Messgenauigkeit von $\pm 0,5\%$.

die sich nach hinreichend lang andauernder Lagerung des porösen Baustoffs bei einer relativen Feuchtigkeit der Umgebungsluft von 80 % einstellen würde.¹⁸⁴ Dieser Feuchtegehalt wird mit dem Index $u_{80,i}$ bezeichnet.

Die Feuchtmassen m_f aller Proben wurden unmittelbar nach ihrer Entnahme mit einer Präzisionswaage bestimmt und dokumentiert. Anschließend erfolgte ihre kontinuierliche Trocknung im Wärmeschrank bei 105 °C bis zur Massekonstanz.¹⁸⁵ Die Gewichtsdiﬀerenz entspricht dem Wassergehalt der jeweiligen Probe. Nach der Bestimmung der Trockenmasse m_t , des Volumens V sowie der Masse der gesättigten Probekörper m_s wurden alle weiteren Kennwerte einschließlich des Durchfeuchtungsgrades ermittelt.

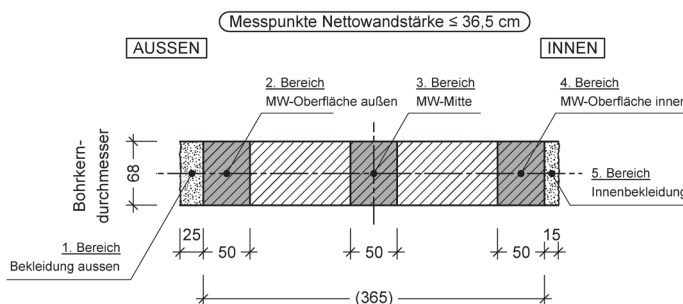


Bild 29

Tiefenabhängige Entnahme von Bohrerproben für die quantitative Bestimmung des Durchfeuchtungsgrades und die Ableitung eines Feuchteprofils (hier dargestellt für eine Musterschichtenfolge). Zerteilung der Bohrerprobe in die für die gewünschte Ortsauflösung notwendige Anzahl an Teilproben.

Sensitivität

Bei der Messung physikalischer Größen sind Fehler immanent. Leschnik (1999) nennt eine gewisse Anzahl an Ursachen (grobe Fehler), die bei der gravimetrischen Feuchtebestimmung zu Abweichungen der ermittelten Messwerte von den tatsächlich vorliegenden Feuchtegehalten führen können. Hierzu zählen zum Beispiel

¹⁸⁴ Für die hygroskopische Ausgleichsfeuchte werden je nach Literaturstelle auch die Termini „Praktischer Wassergehalt“, „Bilanzfeuchte“ oder „Gleichgewichtsfeuchte“ synonym verwendet. Eine Tabelle mit den praktischen Feuchtegehalten von Mauersteinen und Beton enthält zum Beispiel Buss (1994). Eine Begriffserläuterung enthält auch das Glossar ab Seite 243.

¹⁸⁵ Die Temperatur im Wärmeschrank wird so eingestellt, dass kein chemisch gebundenes Wasser (Hydratwasser) freigesetzt wird. Für den überwiegenden Teil der mineralischen Baustoffe beträgt die Trockentemperatur 105 °C. Bei gipsgebundenen Baustoffen ist die Temperatur geringer (Trockentemperatur 40 °C).

- das Verdunsten von Wasser während des Bohrens infolge einer zu starken Erwärmung der Materialprobe,
- das Entweichen von Feuchtigkeit im Verlauf des Transports von der Probenentnahmestelle zur ersten Wägung auf Grund undichter Behältnisse,
- eine zu hohe Luftfeuchtigkeit im Trockenschrank, insbesondere bei Baustofftrocknungen mit niedrigen Ofentemperaturen und bei sommerlichen Außenluftbedingungen,
- die hygroskopische Wasseraufnahme der Proben zwischen den Wägungen sowie
- die Festlegung nicht geeigneter Trocknungstemperaturen.

Eine vertiefte Fehlerrechnung, welche die Einflussnahme von Messfehlern auf das Messergebnis quantitativ bestimmt, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht geführt. Leschnik (1999) nennt eine erreichbare Genauigkeit der Messergebnisse bei diesem Verfahren von bis zu $\pm 0,5 \%$.

Probennahme

Die Entnahme der für die Feuchtebestimmung erforderlichen Materialproben basiert auf einem praxisüblichen mechanischen Verfahren. Hierbei werden querschnittstiefe Kernbohrungen mit einem Diamant besetzten Hohlkernbohrer und einem Durchmesser von 68 mm durchgeführt. Den Anforderungen des WTA-Merkblatts 4-11-02/D folgend, werden ein Mindestbohrkerndurchmesser von 50 mm und ein Mindestprobengewicht von 50 g festgelegt.

Die zwei Probeentnahmen zur Feuchtebestimmung erfolgen entsprechend der Versuchsdurchführung nach

- drei Tagen ausschließlich außenseitiger Wasserbeanspruchung sowie nach
- einem weiteren Tag beidseitiger Wasserbeanspruchung.

Die zwei Bohrachsen und die Oberfläche der Untersuchungsgegenstände sind orthogonal, das heißt sie schließen einen Winkel von 90° ein. Die Teilung der entnommenen Bohrproben erfolgte, je nach Wandstärke und der gewünschten Ortsauflösung, in bis zu sieben Abschnitte entlang der Bohrachse (siehe Bild 29), um

- ein Feuchteprofil über den gesamten Wandquerschnitt zu erstellen und um
- die Störung der Probekerne, das heißt die Veränderung des Feuchtegehaltes, infolge zu starker Erwärmung zu minimieren.¹⁸⁶

Für die Massebestimmung der feuchten Materialproben dient eine elektronische Präzisionswaage mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ %. Die Wägung erfolgte unmittelbar nach der Probennahme direkt vor Ort im Labor. Tabelle 18 enthält die technischen Daten des verwendeten elektronischen Wägeinstruments.

Tabelle 18

Technische Daten der verwendeten Präzisionswaage der Fa. KERN, Model: 572-33.

Wägeinstrument	Wägebereich MAX [g]	Ablesbarkeit d [g]	Linearität [g]	Reproduzierbarkeit [g]
Präzisionswaage KERN 572-33	1.600	0,01	0,03	0,01

6.6 Feuchteprofile

Die folgenden Bilder 30 bis 37 zeigen die Verteilung der Feuchte über den Querschnitt, das heißt in Tiefenrichtung, für die acht untersuchten Außenwandkonstruktionen nach der

- 72-stündigen außenseitigen Wasserbeanspruchung sowie nach der anschließenden
- 24-stündigen außen- und innenseitigen Wasserbeanspruchung.

Der Durchfeuchtungsgrad (DFG), ausgedrückt als Quotient der ermittelten absoluten Werte für den Wassergehalt und des maximalen Wassergehaltes (Sättigungsfeuchte) des jeweiligen Baustoffs, dient der besseren Interpretier- und Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Er wird daher in den Feuchteprofilen als veränderliche Größe (Ordinate) verwendet.

¹⁸⁶ Aufgrund der vergleichsweise geringen Festigkeit der untersuchten Mauersteine konnten die Proben rasch gelöst werden.

Bild 30

Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion:

Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln

Oben:

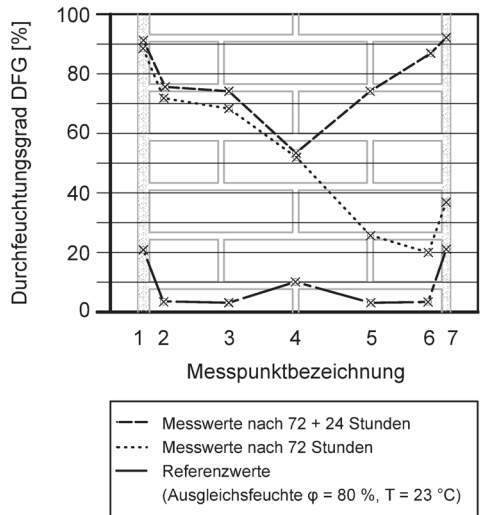
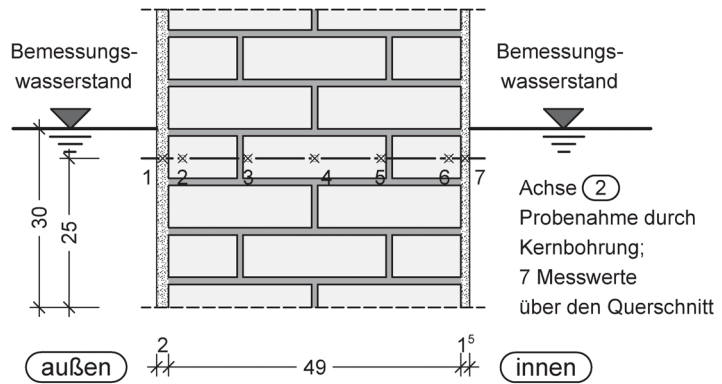
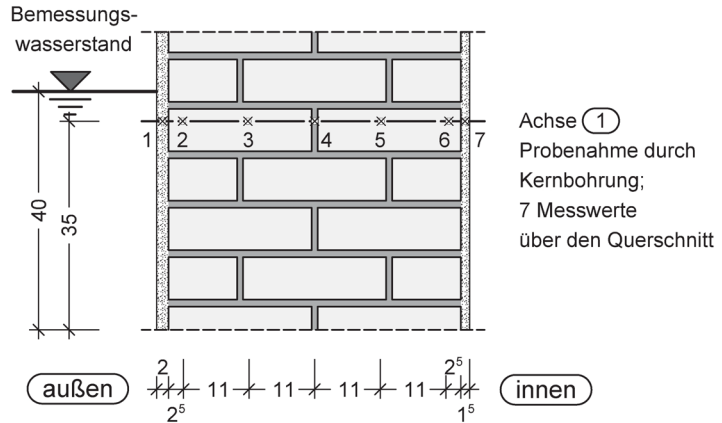
1. Versuchsphase (72 Stunden, außenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte

Mitte:

2. Versuchsphase (24 Stunden, außen- und innenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte

Unten:

Feuchteprofile für (i) den Referenzzustand vor dem Versuch, (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung und für (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung



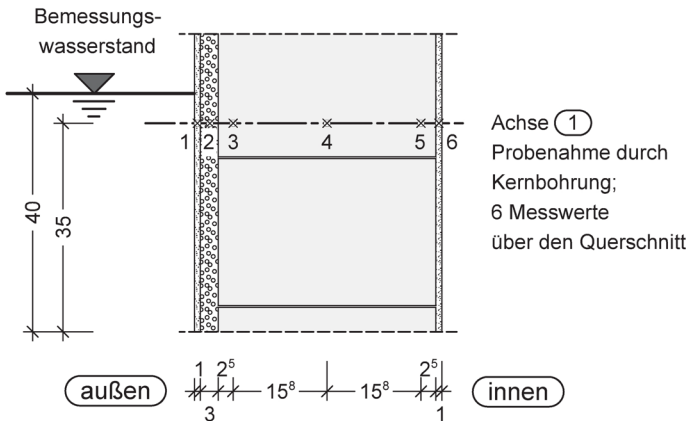


Bild 31

Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion:

Einschaliges Mauerwerk aus leichten Hochlochziegeln

Oben:

1. Versuchsphase (72 Stunden, außenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte

Mitte:

2. Versuchsphase (24 Stunden, außen- und innenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte

Unten:

Feuchteprofile für (i) den Referenzzustand vor dem Versuch, (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung und für (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung

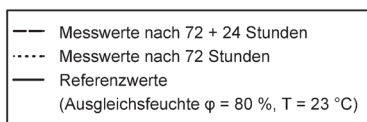
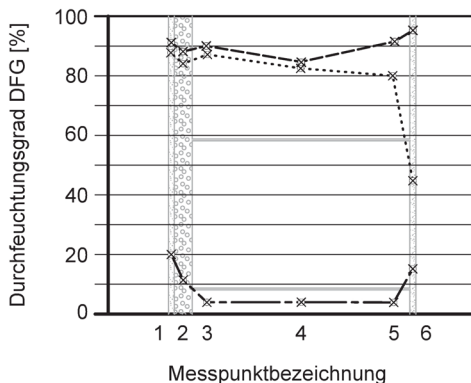
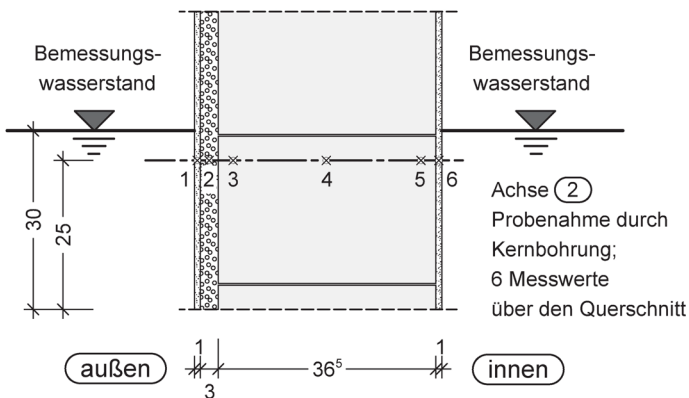


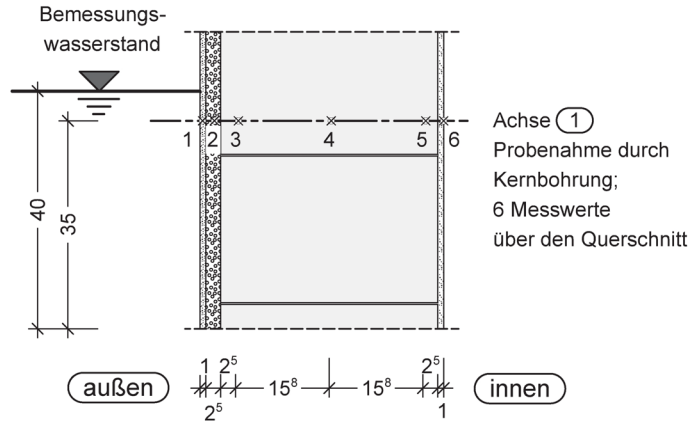
Bild 32

Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion:

Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen

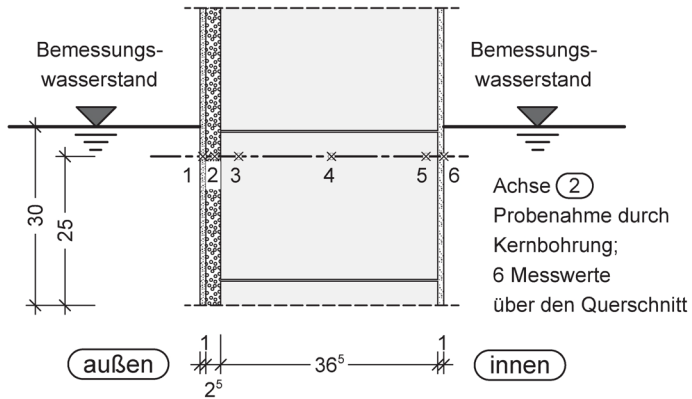
Oben:

1. Versuchsphase (72 Stunden, außenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte



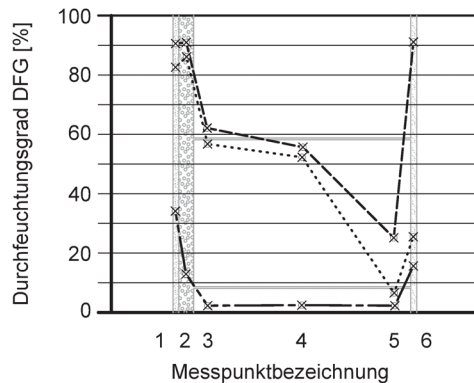
Mitte:

2. Versuchsphase (24 Stunden, außen- und innenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte



Unten:

Feuchteprofile für (i) den Referenzzustand vor dem Versuch, (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung und für (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung



— Messwerte nach 72 + 24 Stunden
 Messwerte nach 72 Stunden
 — Referenzwerte
 (Ausgleichsfeuchte $\varphi = 80\%$, $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$)

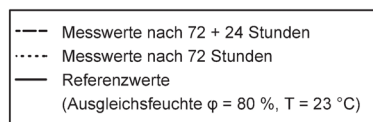
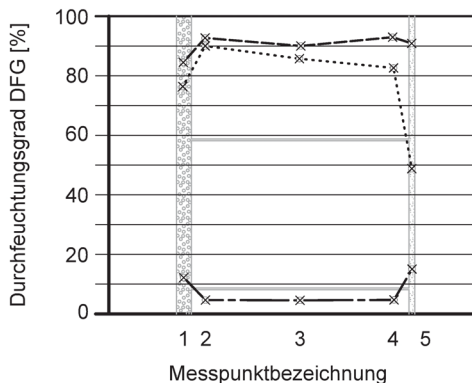
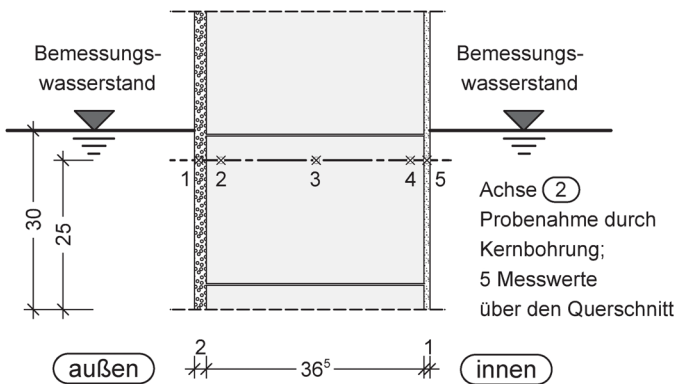
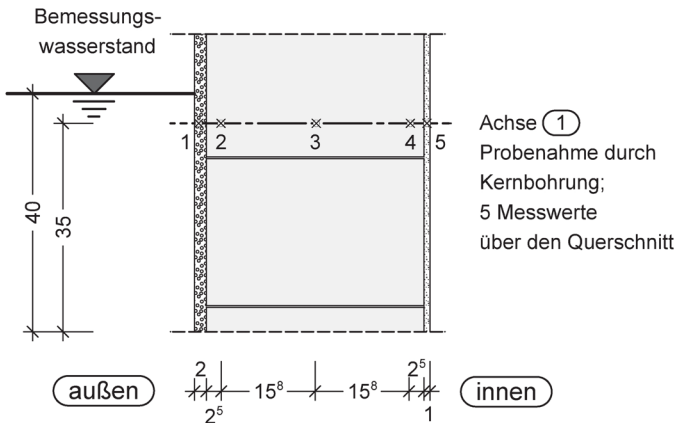


Bild 33

Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion:

Einschaliges Mauerwerk aus Planziegeln mit integrierter Wärmedämmung

Oben:

1. Versuchsphase (72 Stunden, außenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte

Mitte:

2. Versuchsphase (24 Stunden, außen- und innenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte

Unten:

Feuchteprofile für (i) den Referenzzustand vor dem Versuch, (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung und für (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung

Bild 34

Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion:

Einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken und außenliegender Wärmedämmung

Oben:

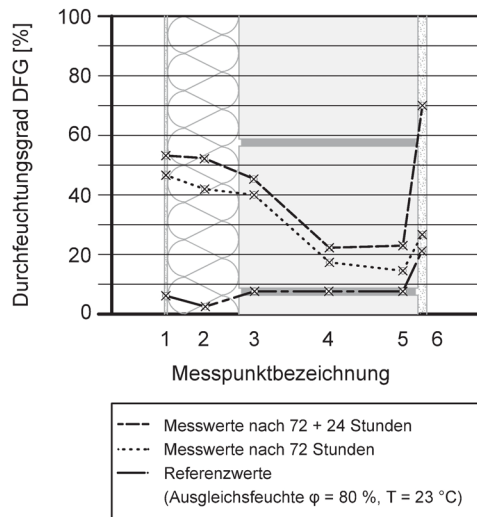
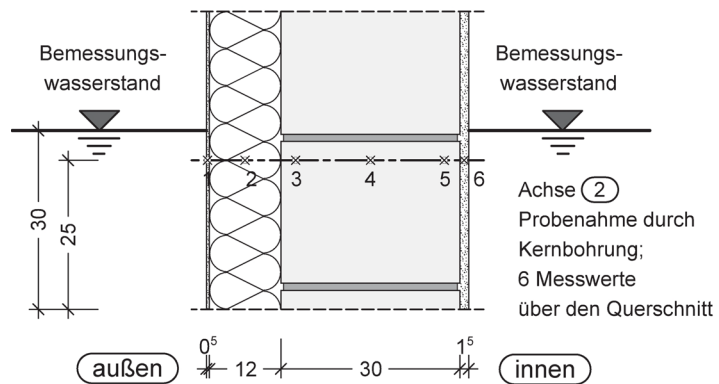
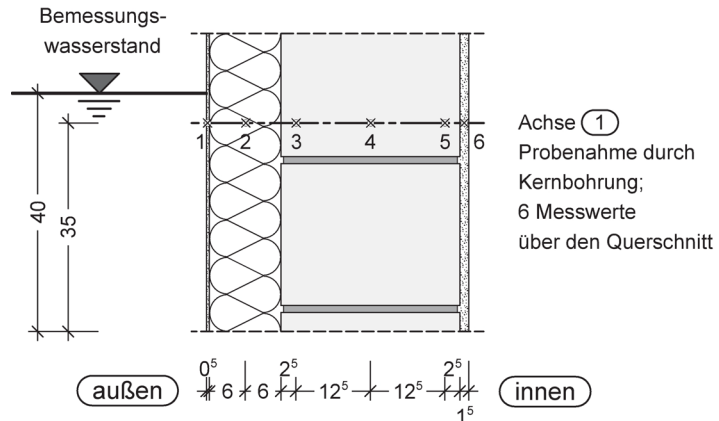
1. Versuchsphase (72 Stunden, außenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte

Mitte:

2. Versuchsphase (24 Stunden, außen- und innenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte

Unten:

Feuchteprofile für (i) den Referenzzustand vor dem Versuch, (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung und für (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung



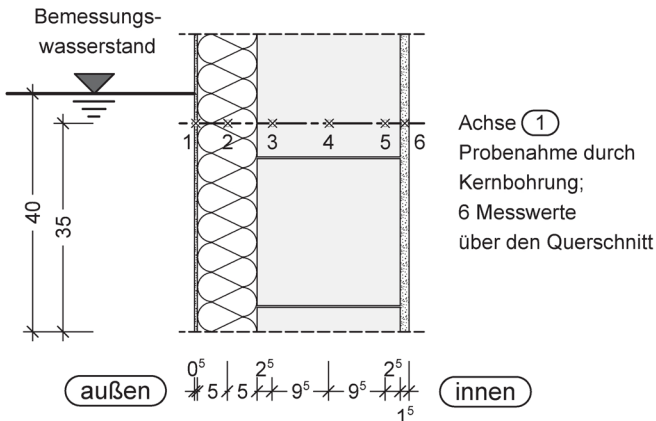


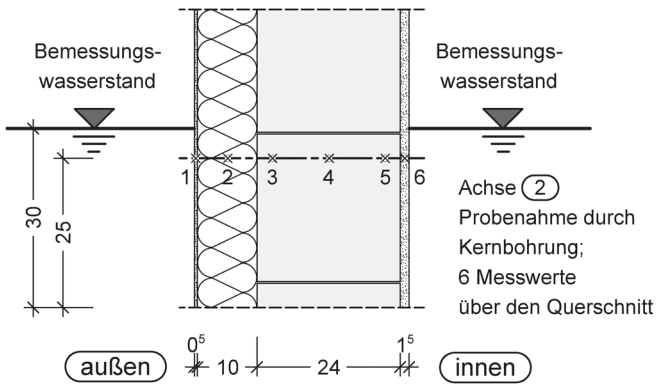
Bild 35

Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion:

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln und außenliegender Wärmedämmung

Oben:

1. Versuchsphase (72 Stunden, außenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte



Mitte:

2. Versuchsphase (24 Stunden, außen- und innenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte

Unten:

Feuchteprofile für (i) den Referenzzustand vor dem Versuch, (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung und für (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung

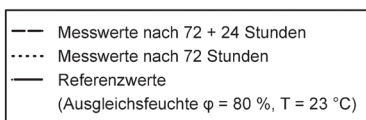
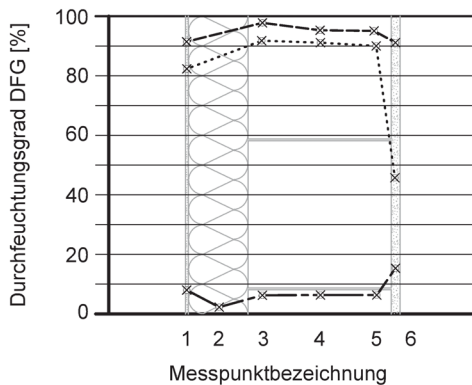


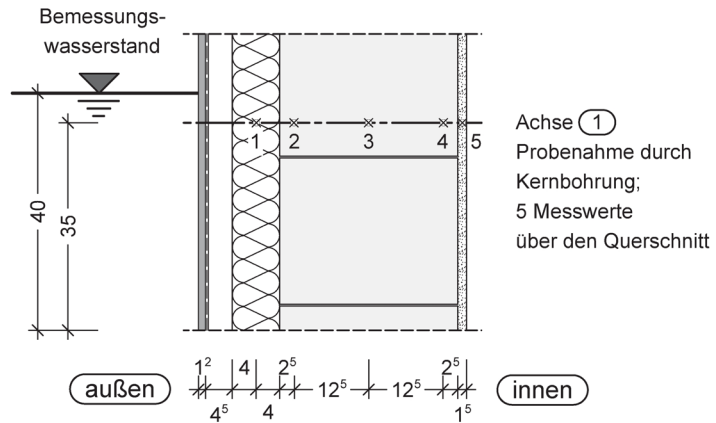
Bild 36

Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion:

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln und vorgehängter hinterlüfteter Fassade

Oben:

1. Versuchsphase (72 Stunden, außenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte

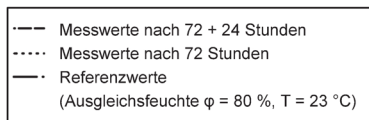
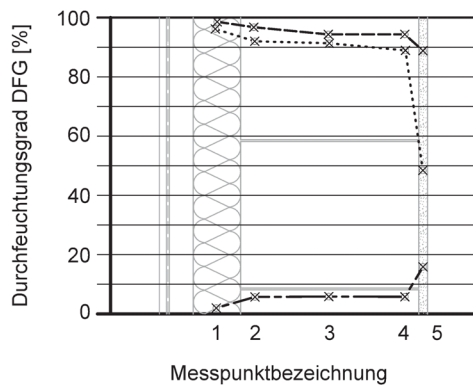
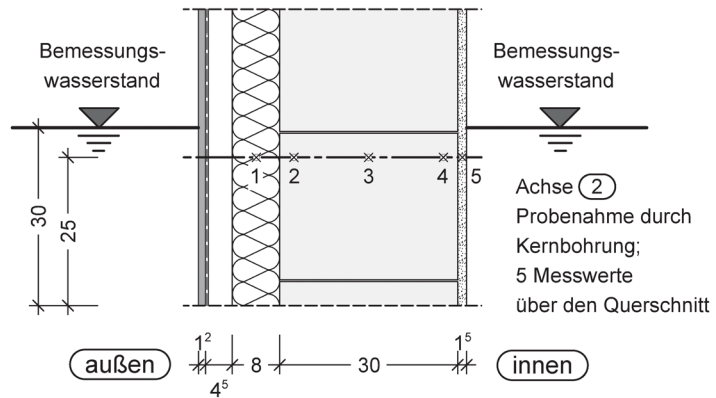


Mitte:

2. Versuchsphase (24 Stunden, außen- und innenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte

Unten:

Feuchteprofile für (i) den Referenzzustand vor dem Versuch, (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung und für (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung



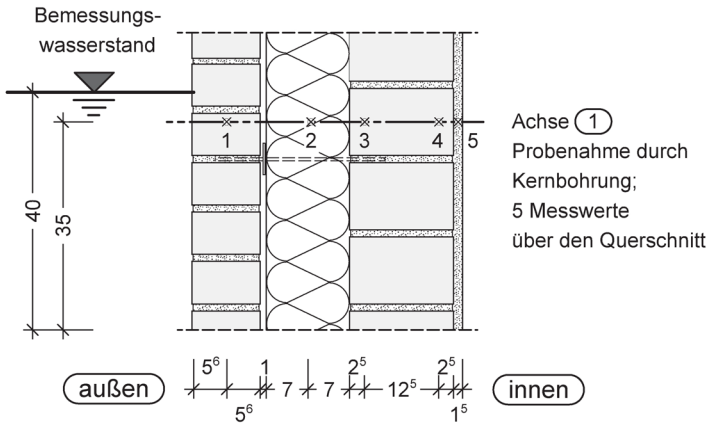


Bild 37

Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion:

Zweischaliges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung

Oben:

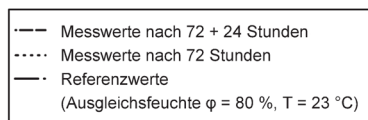
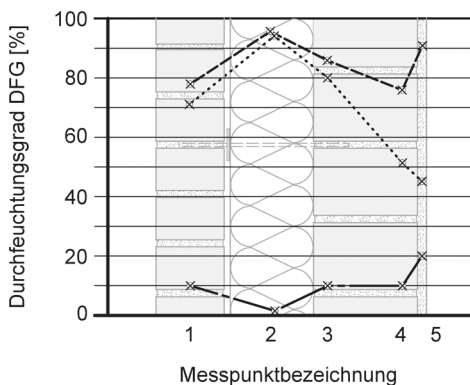
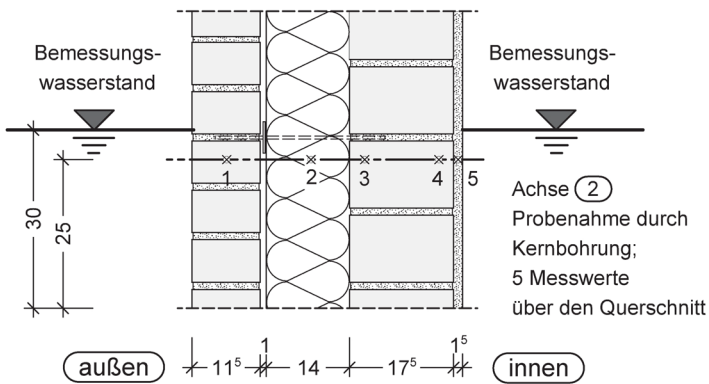
1. Versuchsphase (72 Stunden, außenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte

Mitte:

2. Versuchsphase (24 Stunden, außen- und innenseitige Beanspruchung); Probenahme und Messpunkte

Unten:

Feuchteprofile für (i) den Referenzzustand vor dem Versuch, (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung und für (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung



6.7 Wasserdurchlässigkeit

Neben dem Ziel die zeitabhängige Feuchteverteilung in den Außenwandkonstruktionen zu bestimmen, umfassen die Laboruntersuchungen auch die Messung des Wasservolumens, welches innerhalb der ersten drei Tage der Versuchsdurchführung, in denen lediglich die Außenseite der Wandkonstruktion durch anstehendes Wasser beansprucht wird, durch den Querschnitt auf die Innenseite gelangt.

DIN 19569-4¹⁸⁷ und weitere Quellen¹⁸⁸ sprechen im Zusammenhang mit der Wasserdurchlässigkeit auch von der systembezogenen Permeation¹⁸⁹, Leckagerate beziehungsweise Leckrate oder von ihrer Komplementäreigenschaft Dichtigkeit oder Wasserdichtheit. Trotz der Vielfältigkeit der Begrifflichkeiten basiert die Klassifizierung der Wasserdurchlässigkeit eines Systems jedoch in allen Quellen stets auf einem mehrstufigen Ansatz, der das absolute Wasservolumen beurteilt, dass das System in einer definierten Zeiteinheit nicht zurückhält. Dieser Klassifikationsansatz wird auf die Mauerwerkskonstruktionen übertragen (siehe Abschnitt 7.4.3 auf Seite 173).

Tabelle 19

Gemessener Wasserdurchtritt (kumuliertes Wasservolumen) durch die Mauerwerkskonstruktionen während der 72-stündigen Versuchsdauer

Wasserdurchtritt kumuliert in [dm ³]		Dauer in [h]					
		12	24	36	48	60	72
Mauerwerkskonstruktion	EMW-Mz	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	EMW-HLz	0,102	0,698	1,928	4,326	6,912	9,644
	EMW-PP	0,036	0,488	1,124	1,856	2,642	3,732
	EMW-PziWD	0,090	0,676	1,616	3,740	6,174	8,842
	EMW-Hbl_WDVS	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	EMW-HLz_WDVS	0,076	0,548	3,042	5,672	8,368	11,322
	EMW-HLz_VHF	0,246	3,600	7,200	12,180	17,124	22,400
	ZMW-KS_WZ	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

¹⁸⁷ Aufgrund bislang fehlender normativer Regelungen zur einheitlichen Prüfung unterschiedlicher Hochwasserbarrieren fungiert die zweckfremde und häufig als Stahlwasserbaunorm verkürzt bezeichnete DIN 19569-4:2000-11 als Orientierungshilfe.

¹⁸⁸ Zu diesen Quellen zählen zum Beispiel IFT (2005), Europaverband Hochwasserschutz (2014) und FM Approvals (2013).

¹⁸⁹ Permeation beschreibt den Vorgang, bei dem ein Stoff (Permeat) einen Festkörper durchdringt beziehungsweise durchwandert (Thienel 2011).

Aufgrund eines von außen nach innen verlaufenden Druckgefälles findet, in Abhängigkeit der verwendeten Baustoffe und ihrer Füge- und Verbindungstechnik, ein Flüssigwassertransport durch die Konstruktion statt. Der Druckhöhenunterschied im Versuch beträgt 40 cm. Ein Außenwandquerschnitt wird baupraktisch als wasserundurchlässig bezeichnet, wenn das außenseitig anstehende Wasser nicht in flüssiger Form auf der dem Wasser gegenüberliegenden Seite austritt.¹⁹⁰

Über verschließbare Bohrungen im Beckenboden gelangt das Flüssigwasser in einen Messzylinder, welcher der Quantifizierung des Wasservolumens dient. Die Ablesung der Messwerte erfolgte in Zeitintervallen von jeweils 12 Stunden. Die gewonnenen Messwerte bilden die Basis für die Bestimmung des Volumenstroms¹⁹¹, welcher als Indikator für die Durchlässigkeit der untersuchten Konstruktionen dient. Die Tabelle 19 fasst die Messergebnisse zusammen. Bild 38 veranschaulicht, dass die zunehmende Versuchsdauer und der anwachsende Feuchtegehalt in den Baustoffen die Durchlässigkeit beeinflussen. Der Volumenstrom Q nimmt bei allen untersuchten Probekörpern über die Zeit zu.¹⁹²

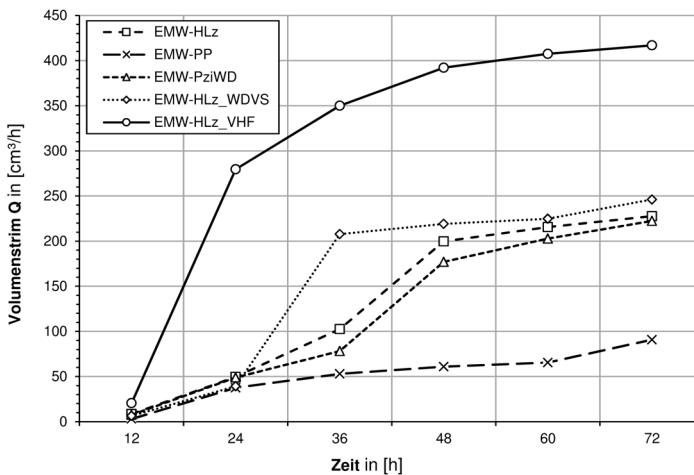


Bild 38

Zeitveränderlicher Volumenstrom Q [in cm^3/h] durch die relevanten Mauerwerkskonstruktionen.

¹⁹⁰ Vergleiche zum Beispiel Breit und Adams (2013)

¹⁹¹ Der Volumenstrom gibt an, welches Volumen eines Mediums pro Zeiteinheit durch einen festgelegten Querschnitt transportiert wird.

¹⁹² Der Volumenstrom Q ist auch mit der Gleichung $Q = k_f * \Delta h / l * A$ bestimmbar. Hierin sind: Q ... Volumenstrom [m^3/s], A ... durchströmter Querschnitt [m^2], k_f ... Kennzahl der hydraulischen Leitfähigkeit [m/s], Δh ... Druckhöhenunterschied [m Wassersäule], l ... Fließlänge / Dicke des durchströmten Körpers [m].

6.8 Interpretation der Versuchsergebnisse

Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln

Abschnitt 5.2.1 auf Seite 86 visualisiert die Schichtenfolge dieses einschaligen Mauerwerks und nennt dessen wesentlichen Eigenschaftswerte. Die dokumentierten Messwerte enthält Anlage A1 auf Seite 263. Im Gegensatz zu den anderen sieben Außenwandkonstruktionen, deren tragende Struktur ausnahmslos als Einsteinaußenwand anzusprechen war, entsprach die Konstruktionsform dieses Untersuchungsgegenstandes einem Blockverband, dessen Nettowandstärke etwas mehr als zwei Steinlängen betrug.¹⁹³ Aufgrund dieser Konstruktionsform verfügte das monolithische Mauerwerk über mindestens eine Stoßfuge im Wandquerschnitt, welche Auswirkungen auf die horizontale Feuchteverteilung hatte.

Bild 39

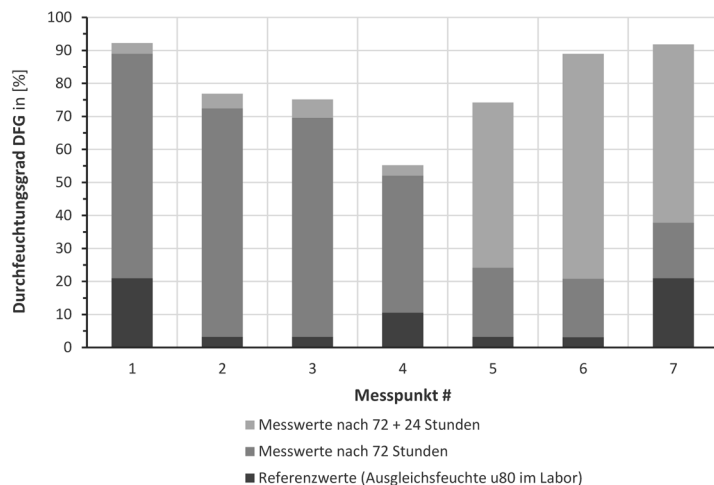
Durchfeuchtungsgrad DFG

- bei Ausgleichsfeuchte (Laborklima)
- nach 72 Stunden außenseitiger Beanspruchung
- nach weiteren 24 Stunden beidseitiger Beanspruchung

Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln

Messpunkte

- 1 Kalk-Zement-Putz
- 2 Vollziegel
- 3 Vollziegel
- 4 Kalk-Zement-Mauermörtel
- 5 Vollziegel
- 6 Vollziegel
- 7 Kalk-Zement-Putz



Die erste 72-stündige Versuchsphase umfasste die ausschließlich außenseitige Druckwasserbeanspruchung der Außenwandkonstruktion.¹⁹⁴ Die Wasseraufnahme erfolgte zunächst durch den 2 cm starken Außenputz (Kalk-Zement-Putzmörtel). Der Durchfeuchtungsgrad stieg im Versuchszeitraum um 68 % auf 89 % (Messpunkt 1). Nach Erreichen der Kontaktzone von Außenputz und Vollziegel verlangsamte sich die beobachtbare Wasserverteilung. Erkennbar

¹⁹³ Das Mauerwerk im Blockverband mit zwei Bindersteinen und einer Stoßfuge hatte eine Nettowandstärke von 49 cm.

¹⁹⁴ Der Bemessungswasserstand betrug gemäß Versuchsprogramm an der Außenseite 40 cm.

war, dass der kapillare Feuchteübergang zwischen Putzmörtel und Mauerstein verzögert wurde. Den Widerstand, der die Verringerung des Wassertransports an der hygrischen Kontaktgrenze bewirkte, erklären Holm et al. (1996) mit (i) kapillarbrechenden Mikrorissen in der Verbundfuge beziehungsweise mit (ii) der Verstopfung der Poren des Mauersteins in einer schmalen Schichtgrenze mit Salzkristallen aus der Putzschicht. Ähnliche Widerstände stellten sich beim kapillaren Feuchteausaustausch zwischen Mauerziegel und Mauermörtel an den Lager- und Stoßfugen in horizontaler und vertikaler Richtung ein.

Das Feuchteprofil in Bild 30 (oben) weist zwei Sprünge im Verlauf des Durchfeuchtungsgrades auf, die sich insbesondere zwischen denjenigen Messpunkten einstellten, in denen ein Materialwechsel erfolgte. In diesen beiden „Sprungbereichen“ nahm der Durchfeuchtungsgrad auf kurzer Weglänge innerhalb der Probe erheblich ab. Der erste Sprung war zwischen den Messpunkten 1 und 2, das heißt in der Kontaktzone von Putzmörtel und Mauerstein erkennbar. Die zweite sprunghafte Abnahme des Durchfeuchtungsgrades befand sich zwischen den Messpunkten 3 und 5, das heißt im Übergang zwischen zwei Ziegeln mit vermörtelter Stoßfuge (Messpunkt 4). Der Durchfeuchtungsgrad sank von 69,6 % am Messpunkt 3 auf 57,1 % am Messpunkt 5. Der Kalk-Zement-Mörtel in der Stoßfuge der Bindersteine (Messpunkt 4) verzögerte augenscheinlich die Verteilung des Wassers. Ursächlich schienen die gleichen Mechanismen zu sein, deren Effekte bereits in der Verbundzone von Außenputz und Vollziegel beobachtet wurden.

Innerhalb des ungestörten, homogenen Materialgefüges des Vollziegels nahm der Wassergehalt in Querschnittsrichtung langsam, jedoch kontinuierlich ab. Der Feuchtehorizont reichte etwa bis zur Konstruktionsmitte, das heißt bis zu einem Abstand von etwa 25 cm von der Bauteiloberfläche waren stark erhöhte Feuchtegehalte feststellbar. Im übrigen Wandquerschnitt (Messpunkte 5, 6 und 7) entsprach der ermittelte Wassergehalt nur noch etwa dem 1,2-fachen der raumklimabezogenen und baustoffspezifischen Ausgleichsfeuchte, die vor Versuchsbeginn als Referenzwert ermittelt worden war (siehe auch Bild 39).

Im Verlauf der 72-stündigen außenseitigen Wasserbeanspruchung gelangte kein Flüssigwasser durch die Konstruktion auf die Innenseite der Wandscheibe. Für diesen Untersuchungszeitraum war das Vollziegelmauerwerk wasserundurchlässig.

Nach anschließender, 24 Stunden andauernder beidseitiger Flutung zeigt das Feuchteprofil in Bild 30 (unten) erwartungsgemäß eine deutliche Zunahme des Durchfeuchtungsgrades des innenseitigen Wandputzes (Messpunkt 7) von 37,7 % auf 91,8 % und des darunterliegenden Ziegelmauerwerks (Messpunkt 5 und 6) von 24,1 % auf 74,2 % beziehungsweise von 20,8 % auf 88,9 %.

Einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln

Eine umfassende Beschreibung der monolithischen Einsteinauerwerkskonstruktion enthält Abschnitt 5.2.2 auf Seite 88. Anlage A2 (Seite 265) dokumentiert die festgestellten Messwerte. Die außenseitige Wasserbeanspruchung führte bereits während der 72-stündigen ersten Versuchsphase zu einer intensiven Wasseraufnahme und zu hohen Feuchtegehalten an der Mehrzahl der über den Querschnitt verteilten Messbereiche.

Die außenseitige Wandbekleidung bildete ein zweilagiges Putzsystem. Der mineralische Oberputz mit einer Schichtstärke von 1,0 cm verfügte über eine große Rohdichte und Druckfestigkeit sowie über einen kleinen Wasseraufnahmekoeffizienten A_w von weniger als $2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$. Aufgrund der geringen Schichtstärke erreichte die Feuchtefront dennoch rasch die Kontaktzone zum Unterputz. Der Durchfeuchtungsgrad stieg von 20,9 % auf 87,5 % (siehe Bild 40). Im Vergleich mit dem Normalputz verfügte der wärmedämmende Unterputz, dessen Schichtstärke 2,5 cm betrug, über eine vielfach kleinere Rohdichte und Druckfestigkeit sowie über ein höheres Wasseraufnahmevermögen von etwa $24 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$.¹⁹⁵ Der Durchfeuchtungsgrad nahm um 73 % zu.

¹⁹⁵ Die Mehrzahl der wärmedämmenden Unterputze ist der Wasseraufnahmeklasse W 1 nach DIN EN 998-1 zugeordnet. Weitere Erläuterungen hierzu enthält Abschnitt 7.4.2 auf Seite 153.

Diese Baustoffeigenschaften mündeten im Verlauf der Untersuchung in einem erhöhten Feuchtegehalt und Durchfeuchtungsgrad. Nach dem der Feuchtehorizont die Verbundfuge zwischen Wärmedämmputz und Hochlochziegel erreichte, war eine noch raschere Wasseraufnahme und Wasserverteilung in horizontaler und vertikaler Richtung im Planziegel zu beobachten. Aufgrund der mörtelfrei ausgeführten, luftgefüllten Stoßfugen waren zudem folgende Effekte feststellbar:

- das Flutwasser wirkte mehrseitig auf die Planziegel ein und führte somit zu einer größeren Kontaktfläche mit dem Wasser
- das Flutwasser gelangte schnell durch den Wandquerschnitt bis an die Rückseite des raumseitig applizierten Kalkputzes und führte dort unmittelbar zu einer intensiven Durchfeuchtung

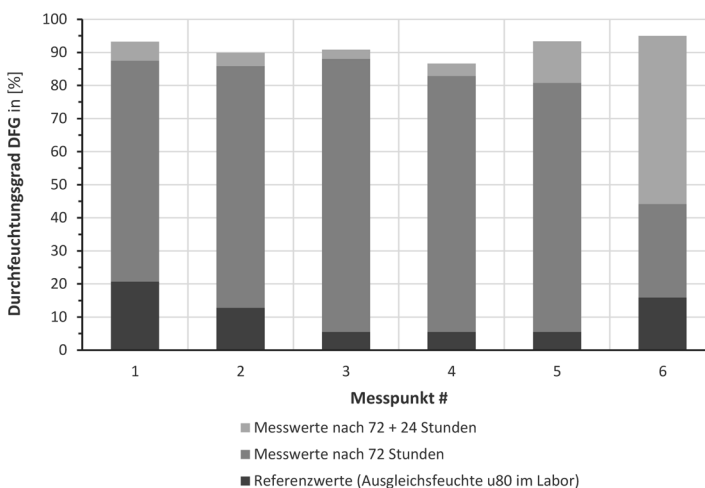


Bild 40

- Durchfeuchtungsgrad DFG
- bei Ausgleichsfeuchte (Laborklima)
 - nach 72 Stunden außen-seitiger Beanspruchung
 - nach weiteren 24 Stunden beidseitiger Beanspruchung

Einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln

Messpunkte

- 1 Kalk-Zement-Putz
- 2 Wärmedämmputz
- 3 Hochlochziegel
- 4 Hochlochziegel
- 5 Hochlochziegel
- 6 Kalkputz

Bereits nach weniger als 24 Stunden zeichneten sich während des Versuchs die vertikalen Stoßfugen auf der raumseitigen Putzoberfläche ab. Die verwendeten Planhochlochziegel verfügten über ein großes Porenvolumen im Feststoffgerüst und über einen großen Lochflächenanteil im Steinquerschnitt¹⁹⁶, woraus die geringe Mauersteindichte von etwa 700 kg/m³ und Scherbenrohddichte von etwa

¹⁹⁶ Der Porenanteil im Feststoffgerüst der Planhochlochziegel liegt etwa bei 0,28 m³/m³, der Hohlraumanteil bei etwa 0,49 m³/m³.

1.060 kg/m³ resultiert.¹⁹⁷ Über die dünnen Stege aus porierten und kapillaraktiven Scherben nahm der Planhochlochziegel schnell Wasser in sein Materialgerüst auf und transportierte es in seine Hohlräume. Am Ende der ersten Versuchsphase war die vollständige Füllung aller Hohlräume mit Wasser zu beobachten. An allen drei Messpunkten im Ziegelquerschnitt war ein vergleichbar hoher Durchfeuchtungsgrad von 88 % (Messpunkt 3) bis 80,7 % (Messpunkt 5) feststellbar. Der Feuchtegradient zwischen den Messpunkten 3, 4 und 5 verlief folglich sehr flach.

Da sich der ermittelte Durchfeuchtungsgrad jedoch lediglich auf das im Scherbengefüge eingelagerte Wasser bezog, berücksichtigte er nicht die Wassermenge, die sich während des Versuchs in den Hohlräumen der Ziegel ansammelte. Der Hohlraumanteil betrug in diesem Untersuchungsbeispiel 49 %, das heißt je Kubikmeter Hochlochziegel konnten außerhalb des Scherbengefüges bis zu 490 Liter Wasser gebunden werden. Weil das Wasser zum Teil auch über die Beanspruchungsdauer hinaus in den Hohlräumen verblieb, hat das maßgebliche Konsequenzen hinsichtlich eines wirksamen Trocknungsprozesses.

Die sehr hohe kapillare Leistungsfähigkeit des Mauersteins zeigte sich anhand der beobachteten großen Steighöhe des Wassers über den Bemessungswasserstand hinaus und anhand der hohen Sauggeschwindigkeit. Bereits nach 12 Stunden erreichte die Feuchtigkeit die Oberkante des Versuchskörpers, die sich 10 cm über dem Bemessungswasserstand befand. Welchen Einfluss die geklebte Lagerfuge zwischen den Planhochlochziegeln im Hinblick auf eine wirksame Verzögerung oder sogar Behinderung des kapillaren Aufstiegs nimmt, war aufgrund der Prüfkörpergeometrie und Versuchsanordnung nicht feststellbar.¹⁹⁸ Aufgrund der geringen Schichtstärke ist jedoch ein weitgehend ungehinderter Feuchteübergang in dieser Verbundzone anzunehmen.

Während der außenseitigen Wasserbelastung gelangte, entsprechend der Tabelle 19, ein absolutes Wasservolumen

¹⁹⁷ Die Scherbenrohddichte ist die Masse des trockenen Ziegels bezogen auf das Volumen des Ziegels abzüglich der Hohlräume mit Ausnahme der Poren. Vergleiche zum Beispiel Wendehorst (2015).

¹⁹⁸ Alle Lagerfugen befinden sich unterhalb des Bemessungswasserstandes, so dass der Einfluss der Verbundzone auf den kapillaren Aufstieg nicht feststellbar war.

von $9,6 \text{ dm}^3$ über die 2.000 cm^2 große Kontaktfläche durch den Bauteilquerschnitt auf die Innenseite. Daher war die Mauerwerkskonstruktion für die Versuchsdauer von 72 Stunden als wasserdurchlässig anzusprechen.

Die zweite Versuchsphase führte zu einem weiteren Anstieg des Durchfeuchtungsgrades in allen Messpunkten. Weil der eingesetzte Hochlochziegel bereits nach der ersten Versuchsphase über sehr hohe Wassergehalte verfügte, nahm der Durchfeuchtungsgrad an den Messpunkten 3 bis 5 nur noch graduell um 2,8 % bis 4 % zu. Der Durchfeuchtungsgrad des innenseitig aufgezogenen Kalkputzes erhöhte sich um 50,9 % auf 95 %.

Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen

Der konstruktive Aufbau des Regelquerschnitts und die relevanten Eigenschaftswerte der eingesetzten Baustoffe sind in Abschnitt 5.2.3 auf Seite 89 beschrieben. Die Dokumentation der Messwerte enthält Anlage A3 auf Seite 267. Während der ersten 72 Stunden wurde die Einsteinmauerwerkskonstruktion gemäß Versuchsprogramm zunächst nur einseitig beansprucht. Die außenseitige Bekleidung des Mauerwerks bildete analog zum Probekörper EMW-HLz erneut ein zweilagiges Putzsystem mit einem mineralischen Oberputz und einem wärmedämmenden Unterputz. Das beobachtete Feuchteverhalten entsprach erwartungsgemäß den Feststellungen, die bereits bei der zuvor betrachteten Außenwandkonstruktion EMW-HLz erläutert wurden. Der Durchfeuchtungsgrad stieg am Messpunkt 1 (Kalk-Zement-Putz) von 34,1 % auf 83,7 % und am Messpunkt 2 (Wärmedämmputz) von 12,5 % auf 85,1 % (siehe Bild 41).

Nachdem die Wasserfront den Wärmedämmputz durchdrungen hatte, nahm der hochporöse Porenbeton an den druckwasserbeanspruchten Steinoberflächen in den folgenden 24 Stunden rasch Wasser in sein Porensystem auf. Da die Mauersteine ohne planmäßig vermörtelte Stoßfugen knirsch versetzt wurden, wirkte das Flutwasser mehrseitig auf die Planziegel ein und gelangte rasch an die Rückseite des Kalk-Innenputzes. Nach weniger als 24 Stunden zeichneten sich während des Versuchs die vertikalen Stoßfugen auf der raumseitigen Putzoberfläche ab.¹⁹⁹

¹⁹⁹ Vergleiche auch Konstruktion EMW-HLz

Das Wasseraufnahmevermögen des verwendeten Porenbetons, das heißt das Gesamtvolumen aller unter Druckwasserbeanspruchung theoretisch zugänglichen Poren, lag bei etwa $850 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ beziehungsweise bei 85 V.-% (volumenbezogener Wassergehalt). Der praktische Feuchtegehalt war gemäß Produktdatenblatt kleiner als 2,5 V.-%.²⁰⁰ Das ausgeprägte Vorkommen luftgefüllter Makroporen mit Radien zwischen 10^{-4} m und 10^{-2} m und die damit verbundene schlechte kapillare Leitfähigkeit verlangsamte jedoch die Weiterleitung an die Bauteilinnenseite trotz eines wirksamen Feuchtegefälles.

Bild 41

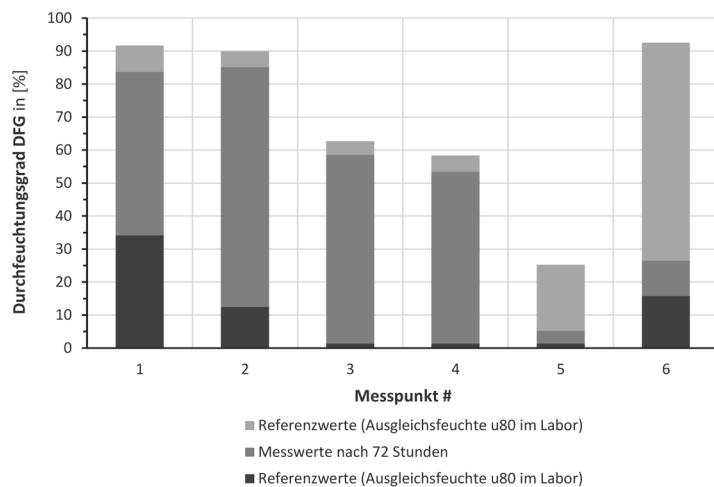
Durchfeuchtungsgrad DFG

- bei Ausgleichsfeuchte (Laborklima)
- nach 72 Stunden außen-seitiger Beanspruchung
- nach weiteren 24 Stunden beidseitiger Beanspruchung

Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen

Messpunkte

- 1 Kalk-Zement-Putz
- 2 Wärmedämmputz
- 3 Porenbeton-Planstein
- 4 Porenbeton-Planstein
- 5 Porenbeton-Planstein
- 6 Kalk-Putz



Die Wasseraufnahme und der Wassertransport waren folglich geringer, als es die hohe Porosität vermuten ließ. Die Messung der Wassergehalte in Querschnittsrichtung der 36,5 cm starken Porenbeton-Plansteine (Messpunkte 3 bis 5, Bild 32 oben) wies am Ende der ersten Versuchsphase auf

- eine erhebliche Zunahme des Durchfeuchtungsgrades um 57,2 % auf 58,6 % an der Oberfläche der Saugseite (Messpunkt 3),
- ein geringes Feuchtegefälle von der Oberfläche der Saugseite (Messpunkt 3: $DFG = 58,6 \%$) zur Querschnittsmitte (Messpunkt 4: $DFG = 53,4 \%$) sowie auf

²⁰⁰ Die Rohdichte des Porenbetons beträgt $350 \text{ kg}/\text{m}^3$. Der praktische Wassergehalt folgt DIN 4108-4, Tabelle 4.

- einen hohen Feuchtegradienten zwischen Bauteilmitte (Messpunkt 4: $DFG = 53,4 \%$) und Innenseite (Messpunkt 5: $DFG = 5,2 \%$) hin.

Der Feuchtegradient war folglich örtlich verschieden. Zwischen den Messpunkten 3 und 4 bildete sich scheinbar ein Plateau mit ähnlichem Wassergehalt und somit Durchfeuchtungsgrad aus, das heißt der Feuchtegradient war in diesem Bereich sehr flach. Zwischen den Messpunkten 4 und 5 bestand eine hohe Differenz des Durchfeuchtungsgrades, entsprechend steil verlief hier der Gradient. Die Beobachtungen zum Feuchteverhalten des Porenbeton-Plansteins sind vergleichbar mit Studien von Krus (1995) und Künzel (2003). Der Durchfeuchtungsgrad an der Innenseite des Plansteins (Messpunkt 5) lag nach der ersten Versuchsphase noch nahe an dem Durchfeuchtungsgrad von $1,4 \%$, der vor dem Experiment als Referenzwert unter Laborklimabedingungen festgestellt worden war.

Der Kalk-Innenputz mit einer Schichtstärke von 1 cm wurde aufgrund der beschriebenen Effekte nach 12 Stunden bereits frühzeitig lokal, das heißt im Bereich der Stoßfugen, sehr intensiv beansprucht. Im Vergleich aller Putzmörtel verfügte der Kalkputz über den größten Wert des Wasseraufnahmekoeffizienten ($A_w \approx 7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$). Von den vertikalen Fugen ausgehend, breitete sich das Feuchtefeld im Innenputz bereits in horizontaler Richtung aus, noch bevor die zweite Versuchsphase begann. Am Ende der 72 Stunden lag ein ungleichmäßig stark durchfeuchteter Innenputz vor. Aufgrund des gewählten Verfahrens zur Feuchtemessung konnten diese unterschiedlich feuchten Bereiche nicht mit der erforderlichen Ortsauflösung erfasst und dargestellt werden.

In dieser zweiten Versuchsphase erfolgte die zusätzliche Hochwasserbeanspruchung der Innenseite. Dies führte insbesondere zu einer Erhöhung des Durchfeuchtungsgrades des Innenputzes am Messpunkt 6 um $66,1 \%$ auf $92,6 \%$ (siehe Bild 32, unten). Der Durchfeuchtungsgrad an den Messpunkten 1 bis 5 nahm etwa um den Faktor $1,04$ bis $1,20$ zu.

Der festgestellte Wasserdurchtritt erreichte im Vergleich zu anderen Wandbildern, insbesondere gegenüber leichten Hochlochziegeln mit Stoßfugenverzahnung, moderate

Werte. Nach 24 Stunden wurde ein Wasservolumen von etwa $0,5 \text{ dm}^3$ und nach 72 Stunden von etwa $3,7 \text{ dm}^3$ gemessen und dokumentiert. Dennoch war die Konstruktion für diese Versuchsphase als wasserdurchlässig zu bezeichnen.

Einschaliges Mauerwerk aus Planhochlochziegeln mit integrierter Wärmedämmung

Die Beschreibung der einschaligen Konstruktion und die Angabe wesentlicher Materialkennwerte sind Gegenstand des Abschnitts 5.2.4 auf Seite 92. Entsprechend des Versuchsprogramms, erfolgte zunächst die hygrische Beanspruchung der Außenseite der Mauerwerkskonstruktion für die Dauer von 72 Stunden. Anlage A4 (Seite 269) beinhaltet die dazugehörigen Messdaten.

Bild 42

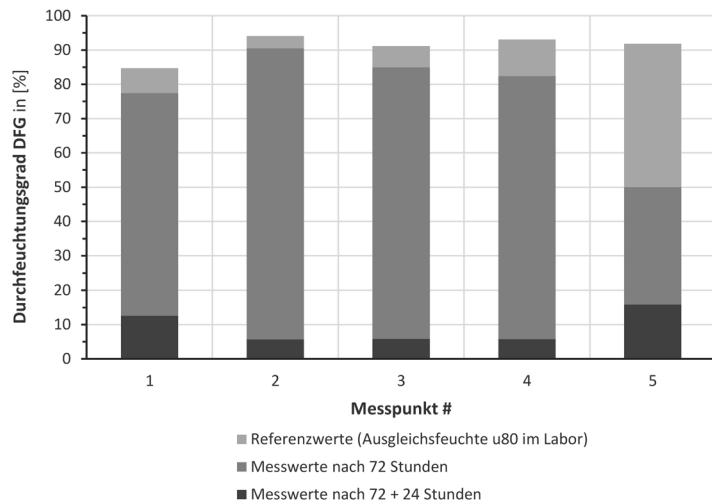
Durchfeuchtungsgrad DFG

- bei Ausgleichsfeuchte (Laborklima)
- nach 72 Stunden außenseitiger Beanspruchung
- nach weiteren 24 Stunden beidseitiger Beanspruchung

Einschaliges Mauerwerk aus Planhochlochziegeln mit integrierter Wärmedämmung

Messpunkte

- 1 Faserleichtputz
- 2 Planziegel mit integrierter Wärmedämm.
- 3 Planziegel mit integrierter Wärmedämm.
- 4 Planziegel mit integrierter Wärmedämm.
- 5 Kalkputz



Die verwendeten Planhochlochziegel mit integrierter Wärmedämmung waren außenseitig mit einem mineralischen, faserbewehrten Leichtputz mit einer Schichtstärke von 2 cm bekleidet. Die Putzmatrix enthielt zugfeste Textilglas- oder Kunststofffasern unterschiedlicher Länge, welche die auftretenden Zug- beziehungsweise Biegezugspannungen nach der Rissentstehung aufnahmen. Der Leichtputz²⁰¹ verfügte über ein großes Porenvolumen, das sich aus Luft-, Kapillar- und Gelporen zusammensetzte. Diese Eigenschaften führten infolge der intensiven hygrischen Einwirkungen zu einer schnellen Wasseraufnahme in das Materialgefüge.²⁰² Der

²⁰¹ Die Rohdichte des faserbewehrten Leichtputz' beträgt $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$.

²⁰² Der Wasseraufnahmekoeffizient hat den Wert $A_W = 0,70 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$.

Durchfeuchtungsgrad stieg am Messpunkt 1 von 12,5 % (Durchfeuchtungsgrad bei Ausgleichsfeuchte unter Laborklimabedingungen) auf 77,4 % am Ende der ersten Versuchsphase (siehe auch Bild 42). Die Verbundzone zwischen Putzmörtel und Mauerziegel führte bei diesem Versuchskörper zu keiner nennenswerten, beobachtbaren Verzögerung des Volumenstroms.

Die Ausführung der tragenden Konstruktion erfolgte als Einsteinsmauerwerk im Dünnbettverfahren. Die Stirnflächen der Planhochlochziegel verfügten über Nut-Feder-Verbindungen, so dass die Stoßfugen planmäßig nicht vermörtelt und die Planziegel mit einem tolerierten Zwischenraum von 5 mm versetzt wurden. Diese Art des Fügens der Mauerziegel führte, analog zu den bereits erörterten Schichtenfolgen EMW-HLz und EMW-PP, zu einer nachteiligen mehrseitigen Wasserbeanspruchung der Ziegel, nachdem die Feuchtefront durch den Außenputz gelangte. Die Planhochlochziegel basierten auf einem kapillarporösen Materialgerüst mit geringer Scherbenrohddichte²⁰³, welches das von der Außen- und den Stirnseiten drückende Wasser rasch aufnahm und in das Bauteilinnere weiterleitete, wo es sich anschließend in den sechs dämmstoffgefüllten Hohlräumen (Kammern) sammelte.²⁰⁴ Der in den sechs Kammerreihen der Planhochlochziegel eingearbeitete Dämmstoff aus vorkonfektionierten Mineralfaser-Formteilen war bereits nach 24 Stunden spürbar nass. Die offenporige Struktur des Dämmstoffs führte zu einer Art Schwammeffekt, der eine Wasseraufnahme begünstigte und die Wasserabgabe verzögerte. Am Ende der ersten Versuchsphase war die vollständige Füllung aller Hohlräume bis zum Bemessungswasserstand feststellbar. Wie bereits ausgeführt, bezog sich der ermittelte Durchfeuchtungsgrad lediglich auf das im Scherbengefüge eingelagerte Wasser. Die Wassermenge, die sich während des Versuchs in den Hohlräumen der Ziegel ansammelte, blieb mit dem Durchfeuchtungsgrad unberücksichtigt. Weil das Wasser zum Teil auch über die Beanspruchungsdauer hinaus in den Hohlräumen verblieb, hat das Konsequenzen hinsichtlich eines wirkamen Trocknungsprozesses.

²⁰³ $\rho_{\text{Scherben}} = 1.010 \text{ kg/m}^3$

²⁰⁴ Der Anteil des Gesamtlochquerschnitts an der Lagerfläche beträgt 60,5 %.

Bild 33 (oben) stellt den jeweiligen Durchfeuchtungsgrad für die fünf Messpunkte im Wandquerschnitt dar. Es ist erkennbar, dass sich im dämmstoffgefüllten Planziegel (Messpunkte 3, 4 und 5) sehr ähnliche Feuchtegehalte einstellten, das heißt es bildete sich lediglich ein geringer Feuchtegradient heraus. Der Durchfeuchtungsgrad schwankte mit geringer Amplitude um einen Mittelwert von 86 %.

Das beobachtete Feuchteverhalten des innenseitig applizierten Kalkputzes ähnelte dem der beiden bereits beschriebenen Schichtenfolgen EMW-HLz und EMW-PP. Der Kalk-Innenputz mit einer Schichtstärke von 1 cm wurde aufgrund der wasserdurchlässigen Stoßfugenverzahnung des Mauerwerks bereits nach 12 Stunden im Bereich der Stoßfugen sehr intensiv beansprucht. Von den vertikalen Fugen ausgehend, breitete sich das Feuchtefeld im Innenputz bereits in horizontaler Richtung sichtbar aus, noch bevor die zweite Versuchsphase begann. Am Ende der 72 Stunden lag ein ungleichmäßig stark durchfeuchteter Innenputz vor. Aufgrund des gewählten Verfahrens zur Feuchtemessung konnten diese unterschiedlich feuchten Bereiche nicht mit der erforderlichen Ortsauflösung erfasst und dargestellt werden.

Während der außenseitigen Beanspruchung gelangten circa 9 dm^3 Wasser durch den Bauteilquerschnitt auf die Innenseite, so dass zunächst von einer grundsätzlichen Wasserdurchlässigkeit auszugehen war.

Die zweite 24-stündige Versuchsphase, in der sowohl die Außen- als auch die Innenseite des Probekörpers hygrisch beansprucht wurden, führte zu einer weiteren Steigerung des Durchfeuchtungsgrades insbesondere an den Messpunkten 4 (Innenseite Planziegel) und 5 (Innenputz). Nach Beendigung des Versuchs verblieb eine große Menge Wasser in den sechs dämmstoffgefüllten Hohlkammern.

Einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung

Der Aufbau und die Eigenschaften des mehrschichtigen Einsteinsmauerwerks aus großformatigen Leichtbeton-Hohlblöcken sind im Abschnitt 5.2.5 auf Seite 94 beschrieben. Die Messwerte, welche der Auswertung zugrunde liegen, enthält Anlage A5 ab Seite 271. Die untersuchte Konstruktion war mit einem außenliegenden Wärmedämm-Verbundsystem

versehen, bestehend aus expandierten Polystyrol-Hartschaumplatten (EPS), einem mineralischen Unterputz mit eingebettetem Armierungsgewebe sowie einem organischen Dünnenschichtdeckputz. Die Dämmstoffschicht trug das Eigengewicht des Außenputzes in das Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken ein. Das Eigengewicht der Putzschicht erzeugte aufgrund ihres Abstands²⁰⁵ vom tragenden Untergrund Scherkräfte in der Scheibenebene, die der Dämmstoff auch bei erhöhtem Wassergehalt ableiten musste, ohne sich unzulässig stark zu verformen.²⁰⁶ Die Feuchteaufnahme reduziert in der Regel die dämmstoffspezifische Scherfestigkeit und die Haftscherfestigkeit zwischen Mauerstein und Dämmstoff beziehungsweise zwischen Dämmstoff und Putzschicht. In der EPS-Dämmung (Messpunkt 2) lag nach 72 Stunden ein volumenbezogener Wassergehalt von 42,2 V.-% vor.²⁰⁷

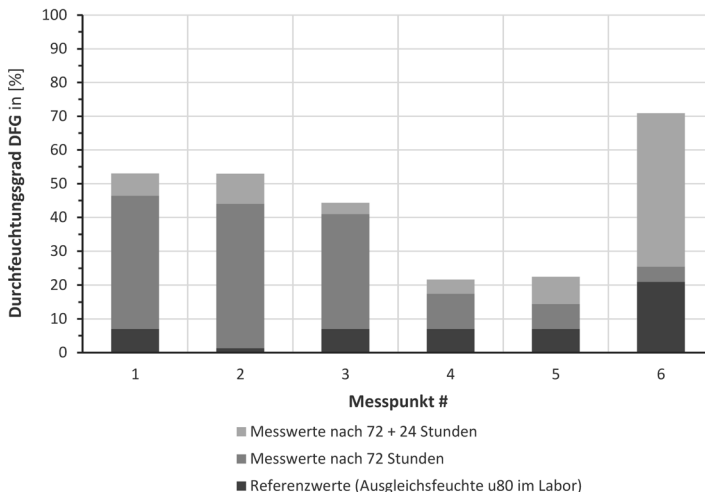


Bild 43

Durchfeuchtungsgrad DFG
 – bei Ausgleichsfeuchte (Laborklima)
 – nach 72 Stunden außen-seitiger Beanspruchung
 – nach weiteren 24 Stunden beidseitiger Beanspruchung

Einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung

Messpunkte

- 1 Kunstharzputz
- 2 Polystyrol-Hartschaum
- 3 Leichtbeton-Hohlblock
- 4 Leichtbeton-Hohlblock
- 5 Leichtbeton-Hohlblock
- 6 Kalk-Zement-Putz

Den Haftverbund an der Grenzfläche zwischen Mauerstein und Dämmstoff gewährleistete ein punktuell aufgetragener und nicht vollflächig aufgezogener Klebemörtel. Aufgrund dieser Fügetechnik gelangte während des Versuchs Wasser weitgehend ungehindert hinter die Fassadendämmplatten in die Verbundfuge und beanspruchte die Mauersteine, den

²⁰⁵ Der Abstand entspricht der Dämmstoffstärke $d = 12$ cm.

²⁰⁶ Die Größe der Schubverformungen ist von dem Schubmodul G und der Dicke d der Dämmstoffschicht abhängig.

²⁰⁷ Hinweis: das Darr-Verfahren gemäß WTA-Merkblatt 4-11-02/D für die gravimetrische Bestimmung des massebezogenen Feuchtegehaltes bezieht sich auf mineralische, poröse Baustoffe.

Mauer- und Klebemörtel sowie die Rückseite der Dämmstoffplatten.

Während des Versetzens wurden die verwendeten Hohlblöcke stirnseitig stumpf, trocken und dicht aneinander gestoßen und anschließend die Mörteltaschen verfüllt. Die Leichtbeton-Hohlblöcke waren fünfseitig geschlossene Mauersteine mit jeweils drei Luftkammern senkrecht zur Lagerfläche. In keinem der luftgefüllten Hohlräume wurde während der gesamten Versuchsdauer Wasser festgestellt. Die Baustoffmatrix des eingesetzten Leichtbeton-Hohlblocks verfügte über eine haufwerksporige Struktur, die auf dem gezielten Auslassen beziehungsweise Reduzieren einzelner Korngruppen in der Sieblinie der leichten Blähton-Gesteinskörnung basiert. Der Blähton verfügte über ein poriges Gefüge und eine raue Oberfläche. Die Rohdichte der Hohlblöcke war mit dieser Rezeptur auf 700 kg/m^3 eingestellt. Bild 34 (oben) zeigt den jeweils ermittelten Durchfeuchtungsgrad für jeden der sechs Messpunkte im Wandquerschnitt. Die Darstellung verdeutlicht, dass sich in den Leichtbeton-Hohlblöcken ein starkes Feuchtegefälle zwischen der Saugseite (Messpunkt 3) und der Bauteilmitte (Messpunkt 4) herausbildete. Der Durchfeuchtungsgrad sank auf kurzer Länge in Tiefenrichtung von 40,9 % (Messpunkt 3) auf 17,4 % (Messpunkt 4). Zwischen Bauteilmitte (Messpunkt 4) und Innenseite (Messpunkt 5) bestand hingegen lediglich ein schwach ausgeprägtes Wassergehaltsgefälle (siehe auch Bild 43). Fischer et al. (2012, S. 425) bestätigen, dass sich in der Regel in einer einseitig wasserbeanspruchten, feinporigen Baustoffschicht in der Nähe der wasserabgewandten Seite eine trockene Zone geringer Dicke einstellt. In dieser nur hygroscopisch feuchten Zone²⁰⁸ bildet die Wasserdampfdiffusion den dominierenden Feuchtetransportmechanismus, während in der dem Wasser zugewandten Zone der Flüssigwassertransport maßgebend ist.

Während der 72-stündigen außenseitigen Beanspruchung gelangte kein Wasser durch den Wandquerschnitt auf die Bauteilinnenseite. Für diesen Untersuchungszeitraum war die Mauerwerkskonstruktion wasserundurchlässig.

²⁰⁸ Der Feuchtegehalt in dieser Zone entspricht der Ausgleichsfeuchte bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 %, das heißt der oberen Grenze des hygroscopischen Bereiches.

Nach anschließender, 24 Stunden andauernder beidseitiger Flutung zeigt das Feuchteprofil in Bild 34 (unten) erwartungsgemäß eine deutliche Zunahme insbesondere des Durchfeuchtungsgrades des innenseitigen Wandputzes (Messpunkt 6, Kalk-Zement-Putz) von 25,4 % auf 70,9 %. Das Wassergehaltsgefälle trieb den Feuchtetransport in Richtung der Bauteilinnenseite weiter voran. Den Anstieg des messpunktbezogenen Durchfeuchtungsgrades veranschaulicht Bild 43.

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit außenliegender Wärmedämmung

Die Beschreibung der Einsteinmauerwerkskonstruktion und die Angabe wesentlicher Eigenschaftswerte enthält Abschnitt 5.2.6 auf Seite 96. Die Anlage A6 (Seite 273) dokumentiert die im Verlauf des Bauteilversuchs festgestellten Messwerte.

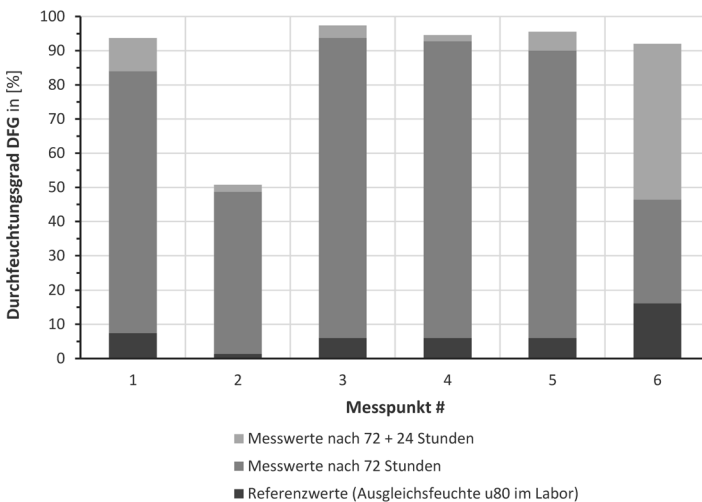


Bild 44

Durchfeuchtungsgrad DFG
 – bei Ausgleichsfeuchte (Laborklima)
 – nach 72 Stunden außen-seitiger Beanspruchung
 – nach weiteren 24 Stunden beidseitiger Beanspruchung

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit außenliegender Wärmedämmung

Messpunkte

- 1 Kunstharzoberputz
- 2 Polystyrol-Hartschaum
- 3 Hochlochziegel
- 4 Hochlochziegel
- 5 Hochlochziegel
- 6 Kalkputz

Die Wandscheibe war außenseitig mit einem Wärmedämm-Verbundsystem bekleidet, dessen Systemkomponenten, analog zur Konstruktion EMW-Hbl_WDVS, expandierte Polystyrol-Hartschaumplatten (EPS), ein mineralischer Unterputz mit eingebettetem Armierungsgewebe sowie ein organischer Dünnschichtdeckputz bildeten. Der Durchfeuchtungsgrad des Kunstharzoberputzes stieg von 7,4 % auf über 83,9 % an (siehe auch Bild 44). In der EPS-Dämmstoffschicht (Messpunkt 2) lag nach 72 Stunden ein volumenbezogener Wassergehalt von 46,7 V.-% vor, der somit etwa 4,5 V.-% über dem gemessenen Wert der Konstruktion

EMW-Hbl_WDVS reichte.²⁰⁹ Den Haftverbund an der Grenzfläche zwischen tragendem Mauerwerk und Dämmstoff gewährleistete ein punktuell aufgetragener und nicht vollflächig aufgezogener Klebemörtel. Aufgrund dieser Fügetechnik gelangte während des Versuchs, wie bereits mehrfach bei anderen Konstruktionen beobachtet, Wasser weitgehend ungehindert hinter die Fassadendämmplatten in die Verbundfuge und beanspruchte die Mauerziegel, den Mauer- und Klebemörtel sowie die Rückseite der EPS-Dämmstoffplatten.

Die einschalige Mauerwerksscheibe war aus Hochlochziegeln mit einer Ziegelrohddichte ρ von 800 kg/m^3 (Scherbenrohddichte etwa 1.080 kg/m^3) sowie einem deckelnden Dünnbettmörtel gefügt. Die großformatigen Mauerziegel verfügten an ihren Stirnflächen über ein Nut-Feder-System, welches die mörtelfreie Ausführung der Stoßfugen erlaubte. Unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus den anderen Bauteilversuchen, ist diese Form der Fugenausbildung ohne vermörtelte Ziegelflanken als systematisches Defizit im Hinblick auf die betrachtete Beanspruchung anzusprechen. Ähnlich den anderen Konstruktionen mit Hoch- beziehungsweise mit Leichthochlochziegeln stellte sich bereits bei einseitiger Wasserbelastung eine nahezu gleichmäßige Feuchteverteilung im Ziegelquerschnitt ein. Der Durchfeuchtungsgrad an der Ziegelaußenseite (Messpunkt 3) lag bei 93,7 %, während an der Ziegelinnenseite (Messpunkt 5) 90 % bestimmt wurden. Ein Wassergehaltsgefälle war somit nicht feststellbar. Eine weitere sich wiederholende Beobachtung war die erhebliche Ansammlung von Wasser in den Hohlräumen der Hochlochziegel, die nach Versuchsende und dem Ablassen des Wassers aus dem Versuchsbecken nur sehr langsam aus dem Ziegel entwich.

Im Verlauf der außenseitigen Wasserbelastung gelangte ein Wasservolumen von $0,5 \text{ dm}^3$ in 24 Stunden und $11,3 \text{ dm}^3$ in 72 Stunden über die 2.000 cm^2 große Kontaktfläche durch den Bauteilquerschnitt (siehe Tabelle 19). Die Mauerwerkskonstruktion war folglich innerhalb des Versuchszeitraums wasserdurchlässig.

²⁰⁹ Hinweis: das Darr-Verfahren gemäß WTA-Merkblatt 4-11-02/D für die gravimetrische Bestimmung des massebezogenen Feuchtegehaltes bezieht sich auf mineralische, poröse Baustoffe.

In dieser zweiten 24-stündigen Versuchsphase erfolgte die zusätzliche Wasserbeanspruchung der raumseitigen Wandbekleidung, die ein Kalkputz mit einer Schichtstärke von 1,0 cm bildete. Diese intensive hygrische Beanspruchung führte insbesondere zu einer Erhöhung des Durchfeuchtungsgrades des Innenputzes am Messpunkt 6 um 45,7 % auf 92 % (siehe Bild 35, unten). Der Durchfeuchtungsgrad an den Messpunkten 1 bis 5 nahm etwa um den Faktor 1,02 bis 1,20 zu.

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade

Den Regelquerschnitt und die Eigenschaftswerte des Probekörpers beschreibt Abschnitt 5.2.7 auf Seite 98. Die Messwerte aus der Bauteiluntersuchung enthält Anlage A7 auf Seite 275. Während der ersten Phase der Versuchsdurchführung gelangte Flutwasser über die planmäßig offenen Fugen unmittelbar hinter die außenseitigen opaken Faserzement-Fassadenpaneele und beanspruchte in der Folge direkt ihre Holzunterkonstruktion sowie die Faserdämmstoffplatten.

Aufgrund der mörtelfrei ausgeführten Stoßfugen wirkte das Flutwasser mehrseitig auf den Ziegel ein. Aufgrund dieser Ausführungsart des Mauerwerks gelangte Wasser, wie bereits dargelegt, zudem mit sehr geringem Widerstand rückseitig an den 1 cm starken Kalk-Innenputz und führte anschließend lokal zu seiner intensiven Durchfeuchtung. Bereits nach wenigen Stunden zeichneten sich während des Versuchs die vertikalen Stoßfugen auf der raumseitigen Putzoberfläche ab. Aufgrund der eingeschränkten Ortsauflösung des Feuchtemessverfahrens war der Wassergehalt in der Putzschicht nur punktuell feststellbar. Der ermittelte Durchfeuchtungsgrad des 1 cm starken Kalkputzes betrug 48,1 %, wobei im Bereich der Stoßfugen sehr wahrscheinlich höhere Feuchtekonzentrationen vorlagen.

Die hohe kapillare Leistungsfähigkeit der Hochlochziegel mündete in einer schnellen Wasseraufnahme in das Materialgefüge (Feststoffgerüst, Scherben) und zu einem schnellen horizontalen und vertikalen Feuchtetransport auch über den Bemessungswasserstand hinaus. Das Feuchteprofil in Bild 36 (oben) zeigt, dass sich bereits im Verlauf der 72-stündigen außenseitigen Hochwasserbeanspruchung ein

vergleichbar hoher Durchfeuchtungsgrad nahe der maximalen Wassersättigung an allen drei, in Tiefenrichtung über den Mauerwerksquerschnitt verteilten, Messpunkten 2, 3 und 4 einstellte. Der Durchfeuchtungsgrad betrug 92,1 % an der beanspruchten Außenseite (Messpunkt 3) und 89,9 % an der Innenseite des Ziegels. Aufgrund der Gleichverteilung der Feuchte war kein nennenswertes Wassergehaltsgefälle feststellbar. Die Hohlräume der Mauerziegel füllten sich in dieser ersten Phase bereits vollständig mit Wasser.

Bild 45

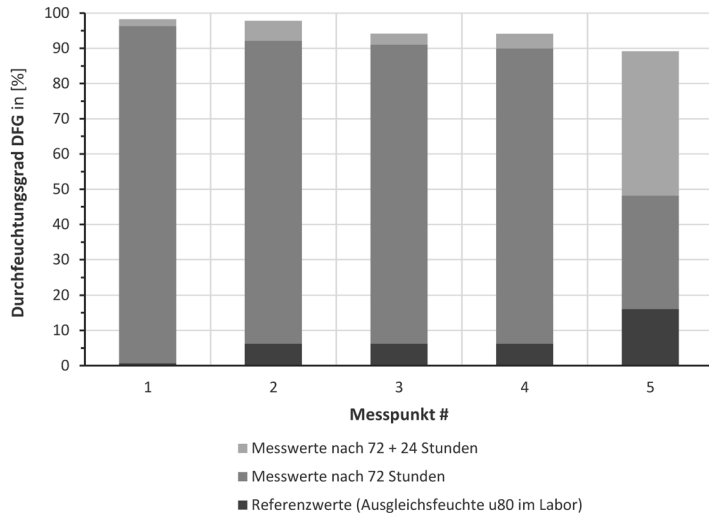
Durchfeuchtungsgrad DFG

- bei Ausgleichsfeuchte (Laborklima)
- nach 72 Stunden außenseitiger Beanspruchung
- nach weiteren 24 Stunden beidseitiger Beanspruchung

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade

Messpunkte

- 1 Mineralfaserdämmung
- 2 Hochlochziegel
- 3 Hochlochziegel
- 4 Hochlochziegel
- 5 Kalkputz



Darüber hinaus gelangte bei dem Probekörper im Vergleich mit den anderen Konstruktionen das größte Wasservolumen bei außenseitiger Wassereinwirkung bis zur Innenseite der Wandkonstruktion (siehe Tabelle 19). Insgesamt gelangte in den 72 Stunden ein Wasservolumen von 22,4 dm³ durch den Querschnitt. Die Mauerwerkskonstruktion war folglich für diesen Untersuchungszeitraum als wasserdurchlässig anzusprechen.

Nach der 24-stündigen beidseitigen Flutung zeigt das Feuchteprofil in Bild 36 (unten) eine weitere Zunahme des Durchfeuchtungsgrades der Mauerziegel und des Kalk-Innenputzes. Der Durchfeuchtungsgrad der Hochlochziegel (Messpunkte 3, 4 und 5) stieg um durchschnittlich 4 %, so dass die Ziegel nunmehr ihren maximalen Wassergehalt erreichten. Der Durchfeuchtungsgrad des Kalkputzes erhöhte sich auf 89,1 %. Nach der Evakuierung des Wassers aus dem Becken am Ende des Versuchszeitraums verblieb, von

oben sichtbar, ein erhebliches Wasservolumen in den Hohlräumen der Hochlochziegel, was Konsequenzen hinsichtlich der auszuführenden Trocknungsmaßnahmen hat.

Das Versuchsprogramm beinhaltete nicht die Analyse der Holzfeuchte der Fassadentragkonstruktion. Rückschlüsse aus dem feuchteabhängigen, anisotropen Materialverhalten führen jedoch zur Annahme, dass die Holzkonstruktion, trotz Imprägnierung, Verformungen infolge Quell- und Schwinderscheinungen unterliegt was zu einer Störung des Fugenbildes der Fassadenpaneele führt.

Zweischaliges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung

Der Probekörper bildete in der Versuchsreihe die einzige mehrschalige Mauerwerkskonstruktion. Die Schichtenfolge und die Eigenschaftswerte der verwendeten Baustoffe sind in Abschnitt 5.2.8 auf Seite 100 umfassend beschrieben. Die Messwerte der Versuchsdurchführung enthält Anlage A8 ab Seite 277. Die außenseitige Einwirkung von Flutwasser führte während der ersten 72-stündigen Versuchsphase ohne zeitliche Verzögerung zu einer direkten Beanspruchung der Kerndämmung, da Wasser unmittelbar über offene Stoßfugen in der 11,5 cm starken, steinsichtigen Vormauerschale aus normalformatigen Kalksand-Verblendsteinen (Vollsteine) in die Konstruktion eindrang und in den dämmstoffgefüllten Zwischenraum gelangte.²¹⁰ Die 14 cm starke Mineralfaser-Dämmplatte nahm das Wasser dort zugänglich in ihre Hohlraumstruktur auf, so dass die Dämmschicht nach drei Tagen nahezu vollständig wassergesättigt vorlag. Der Durchfeuchtungsgrad (Messpunkt 2) stieg von 0,7 % (Ausgleichsfeuchte bei Laborklimabedingungen) am Beginn des Versuchs bis auf 94 % am Ende des ersten Untersuchungszeitraums (siehe auch Bild 46). Darüber hinaus führte das Eindringen von Wasser in den Schalenzwischenraum zu einer beidseitigen Beanspruchung der Verblendschale sowie zu einer nahezu ungehinderten Einwirkung auf die 17,5 cm starke tragende Mauerwerksschale aus Kalksand-Lochsteinen.

²¹⁰ Flutwasser dringt in der Regel auch an freien Mauerrändern oder entlang der Anschlusslinien von Türen und Fenstern in den dämmstoffgefüllten Schalenzwischenraum ein. Diese Effekte sind jedoch nur im Großversuch überprüfbar.

Das Feuchteprofil in Bild 37 (oben) visualisiert den tiefenabhängigen Durchfeuchtungsgrad nach 72-stündiger außen-seitiger Druckwasserbelastung. Erkennbar war, dass die kapillare Wasseraufnahme des Kalksandsteins und die horizontale und vertikale Wasserverteilung in seinem Gefüge deutlich langsamer verliefen als etwa bei den untersuchten Hochlochziegelkonstruktionen. Die fünfte Steinreihe der äußeren Verblendschale befand sich stets oberhalb des Bemessungswasserstandes. Die 12 mm hohe Lagerfuge aus Normalmauermörtel zwischen der vierten und fünften Steinreihe verzögerte das kapillare Aufsteigen von Feuchtigkeit in den nicht direkt feuchtebelasteten Mauerwerksbereich. Trotz intensiver, beidseitiger Einwirkung ist der Durchfeuchtungsgrad der Kalksand-Verblendsteine (Messpunkt 1), unter anderem aufgrund ihrer größeren Rohdichte und ihres kleineren Wasseraufnahmekoeffizienten, etwa 20 % geringer als der Durchfeuchtungsgrad an der wasserbeanspruchten Seite der Kalksand-Lochsteine.

Bild 46

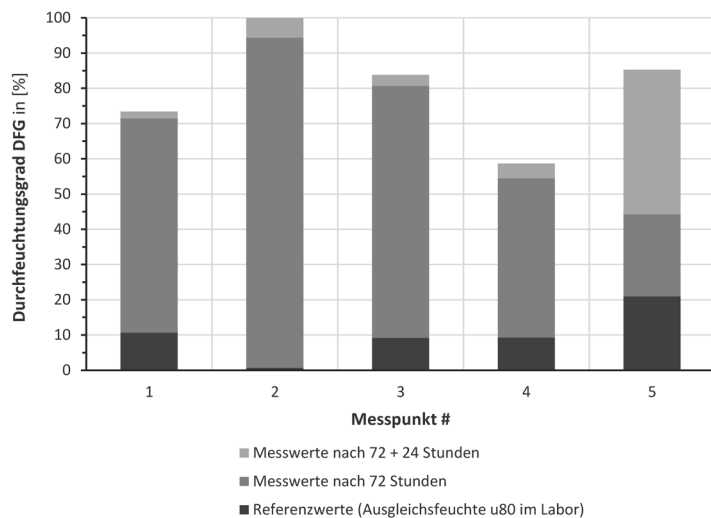
Durchfeuchtungsgrad DFG

- bei Ausgleichsfeuchte (Laborklima)
- nach 72 Stunden außen-seitiger Beanspruchung
- nach weiteren 24 Stunden beidseitiger Beanspruchung

Zweischaliges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung

Messpunkte

- 1 Kalksand-Verblendstein
- 2 Mineralfaserdämmung
- 3 Kalksand-Lochstein
- 4 Kalksand-Lochstein
- 5 Kalk-Zement-Putz



Innerhalb der tragenden Mauerschale bestand nach 72 Stunden ein hoher Wassergehaltsgradient in Querschnittsrichtung zwischen den Messpunkten 3 und 4, der den weiteren kapillaren Flüssigkeitstransport antrieb. Der Durchfeuchtungsgrad am Messpunkt 3 erreichte einen Wert von 80,7 %, während sich am Messpunkt 4 ein Wert von 54,4 % einstellte. In Saugrichtung nahm der Durchfeuchtungsgrad kontinuierlich ab.

Festzustellen war, dass während der gesamten 72-stündigen außenseitigen Flutung kein Wasser durch den Querschnitt auf die Innenseite der Außenwandkonstruktion gelangte (siehe Tabelle 19), das heißt die Konstruktion innerhalb des Versuchszeitraums wasserundurchlässig war.

Nach weiteren 24 Stunden, in denen zusätzlich auch die Innenseite der Wandkonstruktion mit drückendem Wasser beansprucht wurde, stieg der Durchfeuchtungsgrad des innenseitigen Kalk-Zement-Putzes (Messpunkt 5) um 47 % auf 91,2 % und des Kalksandsteins (Messpunkt 4) um 20,6 % (siehe Bild 37, unten). In den Hohlräumen (Lochanteil) des Kalksand-Lochsteins war während der gesamten Versuchsdauer kein Wasser beobachtbar.

7 Beurteilung der Schadensanfälligkeit

7.1 Ziele und Beschreibung der Verfahren

Die vorliegende Dissertation operationalisiert erstmalig die Beurteilung der Schadensanfälligkeit alternativer Mauerwerkskonstruktionen gegenüber Hochwassereinwirkungen, um transparent und nachvollziehbar zwischen nachteiligen und vorteilhaften Konstruktionslösungen zu differenzieren. In der Folge können Konstruktionsalternativen im Hinblick auf ihre Eignung bei Hochwasserbeanspruchung in eine Rangfolge gebracht werden.

Die Entwicklung und Implementierung bautechnischer Optionen der Hochwasservorsorge orientiert sich an den Beurteilungsergebnissen der nicht angepassten Konstruktionen, welche die maßgeblichen Defizite identifizieren und somit die Ableitung von Lösungen unterstützen. Die wiederholte Durchführung des Bewertungsalgorithmus, diesmal jedoch unter Berücksichtigung der konzipierten Anpassungsmaßnahmen, erlaubt die Abschätzung der Effektivität der gewählten bautechnischen Optionen, welche die Quantität ihrer Wirkungen im Vergleich mit den angestrebten Zielwerten charakterisiert. Die Einbeziehung monetärer Kriterien ermöglicht in einem nächsten Schritt auch die Bestimmung der ökonomischen Effizienz der Optionen.

Zu den Verfahren, welche eine umfassende und systematische Bewertung verschiedener qualitativer und quantitativer Kriterien ermöglichen, zählt die im Abschnitt 4.3.2 beschriebene Nutzwertanalyse (NWA), die auch Elemente des analytisch-hierarchischen Prozesses (AHP)²¹¹ umfasst. Eine Bewertung der Schadensanfälligkeit ist nur unter Bezug auf Werte und Ziele möglich. Daher werden einerseits allgemein anerkannte Regeln der Technik sowie fachliche Standards aus technischen Regelwerken, wie zum Beispiel DIN-Normen, herangezogen andererseits aber auch Forschungsergebnisse der Ingenieurwissenschaften. Dieses Vorgehen gewährleistet die Legitimität und Praxisrelevanz der Bewertung.

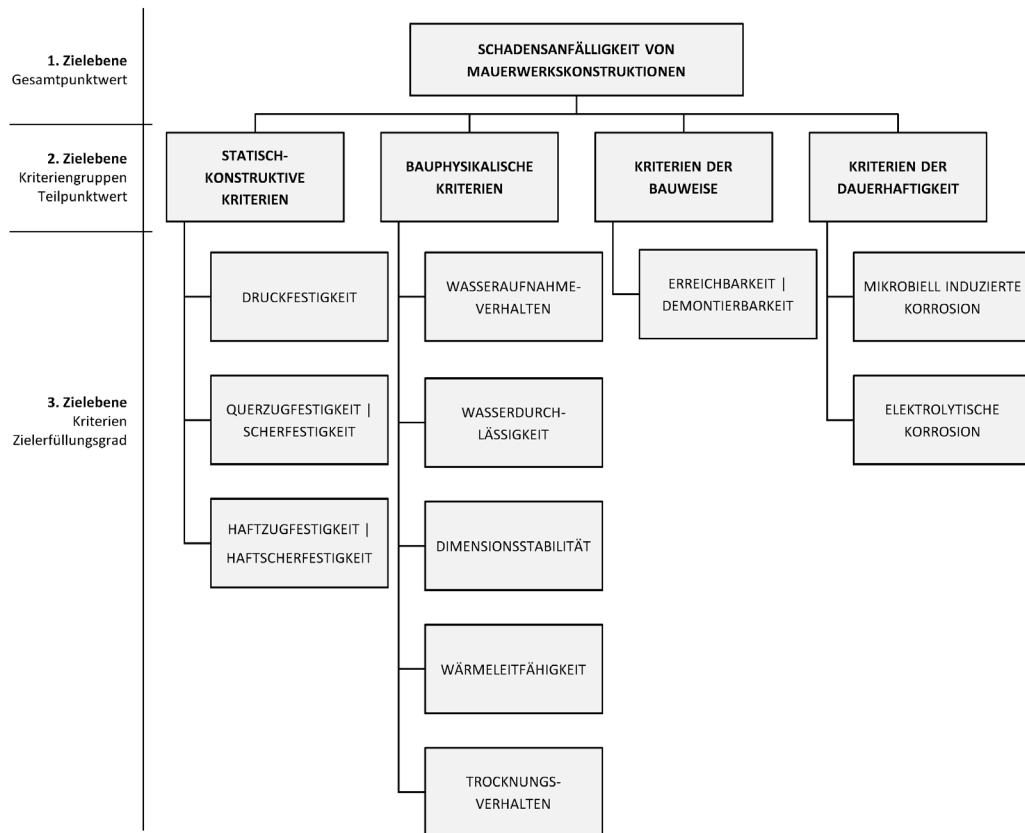
²¹¹ siehe Abschnitt 4.3.3

7.2 Kriterien und Indikatoren

Die Bewertung der Schadensanfälligkeit basiert auf der Aggregation der nachfolgend vorgestellten Kriterien und ihren jeweiligen Wertausprägungen, deren Definition sich auf die formulierten Ziele stützt. Die möglichen Folgen stark erhöhter Feuchtegehalte in Baukonstruktionen sind ohne einen normativen Kontext jedoch zunächst als wertneutral zu verstehen. Zum Beispiel ist der nach einem Hochwasserereignis gemessene Wassergehalt in einem Mauerstein von 40 M.-% weder positiv noch negativ. Erst der Bezug zu den Zielgrößen kann zu einer Bewertung des Wassergehaltes, etwa als negativ im Hinblick auf die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit, führen.

Bild 47

Taxonomie der Kriterien zur multikriteriellen Bewertung der Schadensanfälligkeit von Konstruktionsalternativen gegenüber Hochwassereintritten (Kriterienhierarchie)



Teilziele

Die Analyse und Bewertung der Schadensanfälligkeit mit Hilfe des NWA-Verfahrens basiert auf folgenden vier hierarchisch untergeordneten Teilzielen:

- Erhalt der statisch-konstruktiven Integrität

- Beständigkeit bauphysikalischer Eigenschaften
- Eignung der Bauweise
- Dauerhaftigkeit des Bauteils, das heißt Widerstandsfähigkeit gegenüber biologischen und chemischen Korrosionsprozessen

Die vier unterschiedlichen Teilziele werden in den Abschnitten 7.3 bis 7.6 anhand geeigneter, klar formulierter Kriterien vertiefend charakterisiert. Die Festlegung eines Kriterienensembles dient dem Zweck, die Schadensanfälligkeit von Mauerwerkskonstruktionen gegenüber Hochwassereinwirkungen zu analysieren und anschließend vergleichend zu bewerten. Dies ermöglicht die betrachteten Konstruktionsalternativen im Hinblick auf ihre Schadensanfälligkeit in eine Präferenzenrelation zu bringen.

Die Entwicklung von Kriterien für die Bewertung der Konstruktionslösungen orientiert sich sowohl an ihrer inhaltlichen Relevanz, der Datenverfügbarkeit als auch an ihrer methodischen Handhabbarkeit. Grundsätzlich können Kriterien unterschieden werden, deren Ausprägungen entweder qualitativ beschreibbar oder quantitativ bestimmbar, das heißt messbar, sind. Ein qualitativ beschreibbares Kriterium ist die Demontierbarkeit der Komponenten eines Bauteils nach einem Hochwasserereignis. Die Effekte dieses Kriteriums in Bezug auf das Teilziel sind nicht direkt messbar, sondern lediglich auf der Basis vorhandener Erkenntnisse interpretierbar. Ein quantitativ bestimmbares Kriterium ist die feuchteabhängige Änderung der Querkzugfestigkeit von Baustoffen. Hier ist ein funktionaler Zusammenhang (Wirkmodell) zwischen Feuchtegehalt und den temporären oder dauerhaften Eigenschaftsänderungen herstellbar.²¹²

**qualitative und
quantitative Kriterien**

Für bestimmte Kriterien gelten Mindestanforderungen, wie zum Beispiel für die Veränderung der Druckfestigkeit statisch relevanter Bauteilschichten. Deren Nichterfüllung beziehungsweise Unterschreiten ist nicht akzeptabel und führt daher zum Ausschluss einer Variante aus dem weiteren Bewertungsverfahren führen kann.

**Mindest- beziehungs-
weise Ausschlusswerte**

²¹² Völkner (2003, S. 2-27) charakterisiert die „Auswirkungen von Mauerwerksfeuchtigkeit auf einige Baustoffe und Metalle“ anhand von sieben Kriterien. Hierzu zählt er die Wärmeleitfähigkeit, den Salztransport, die Druckfestigkeit, Frosteinwirkungen, die hygrische Dehnung, die Korrosion und Schimmelpilze.

Jedem quantitativ bestimmbaren Kriterium wird eine so bezeichnete Nutzenfunktion (Indikator) zugeordnet. Indikatoren erlauben folglich die objektiv nachvollziehbare Messung, wie gut ein Kriterium das mit ihm verknüpfte Ziel erfüllt. Für jedes Kriterium können grundsätzlich mehrere Indikatoren existieren. Jeder Indikator kann als geeignet angesprochen werden, wenn er klar formuliert und operationalisierbar ist.²¹³

Bild 47 enthält eine Taxonomie, welche jedem der vier Teilziele, die zu berücksichtigenden Kriterien zuordnet. Aus der Beurteilung der Summe dieser Kriterien werden mit Hilfe eines geeigneten Methodensets (i) die Schadensanfälligkeit der nicht angepassten Konstruktionen sowie (ii) die Effektivität²¹⁴ und (iii) Effizienz²¹⁵ baukonstruktiver Optionen zur Minderung der Schadensanfälligkeit bestimmt.

7.3 Statisch-konstruktive Kriterien

7.3.1 Übersicht

Die Beurteilung der statisch-konstruktiven Integrität hochwasserbeanspruchter Mauerwerkskonstruktionen basiert auf den in Tabelle 20 beschriebenen Kriterien. Sie umfassen wesentliche mechanische Eigenschaftswerte, deren feuchtebedingte Änderungen quantifiziert und anhand von Schwellenwerten bewertet werden. Dazu zählen die Druckfestigkeit, Querzug- beziehungsweise Scherfestigkeit sowie die Haftzug- beziehungsweise Haftscherfestigkeit.

Tabelle 20

Kriterien für die Bewertung der statisch-konstruktiven Integrität hochwasserbeanspruchter Mauerwerkskonstruktionen.

²¹³ Der Deutschen Gesellschaft für Technischen Zusammenarbeit (GTZ) folgend, sind Indikatoren „Kenngößen, die zur Abbildung eines bestimmten, nicht messbaren und oftmals komplexen Sachverhalts herangezogen werden. Sie beschreiben, woran das Eintreten einer geplanten Veränderung beobachtet oder gemessen werden kann. Sie können quantitativ oder qualitativ sein. Um die Erreichung eines Ziels mithilfe eines Indikators bewerten zu können, benötigt man Indikatorwerte. Diese definieren den Erwartungshorizont, bei dessen Eintreten das Ziel als erreicht gelten soll. Ein Indikatorwert kann quantitativ oder qualitativ sein; in letzterem Fall besteht er aus einem objektiv nachprüfbareren Qualitätsmerkmal“ (GTZ 2003, S. 119).

²¹⁴ Die Effektivität einer Anpassungsmaßnahme wird durch die Quantität ihrer Wirkung im Vergleich mit den angestrebten Zielwerten charakterisiert.

²¹⁵ Die Effizienz einer Anpassungsmaßnahme wird durch den Quotienten aus den erzielten Wirkungen und den dafür notwendigen Aufwendungen beschrieben. Dieser Untersuchungsschritt ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Hinsichtlich der Effizienzbewertung besteht weiterer Forschungsbedarf.

Kriterium	Akronym	Beschreibung
Druckfestigkeit	DrFe	Das Kriterium beschreibt im Allgemeinen die Änderung der Druckfestigkeit feuchtebelasteter Baustoffe. Die Zunahme der Festigkeit wird als positive Folge (Chance), eine Abnahme als negative Folge (Risiko) angesehen. Bei der Bewertung des Kriteriums werden zwei Zustände unterschieden: (i) die Festigkeitseigenschaften des feuchten Baustoffes, die in Abhängigkeit vom Wassergehalt variieren können sowie (ii) die Festigkeitseigenschaften des bis zur Ausgleichsfeuchte ²¹⁶ rückgetrockneten Baustoffes. Mit Hilfe verschiedener Indikatoren berücksichtigt das Kriterium sowohl reversible als auch irreversible Festigkeitsänderungen, welche die Eigenschaftswerte des gesamten Bauteils beeinflussen können (siehe Abschnitt 7.3.2).
Querzugfestigkeit Scherfestigkeit	QzFe	Das Kriterium kennzeichnet die Neigung von Baustoffen ihre Querzugfestigkeit bei intensiver Feuchtebeanspruchung zu ändern. Die Querzugfestigkeit gemäß DIN EN 1607 (Wärmedämmstoffe für das Bauwesen; Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene), die dort als Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene bezeichnet ist, stellt eine unter definierten Prüfbedingungen ermittelte Werkstoffeigenschaft dar. Wenn auftretende Zugspannungen den charakteristischen Festigkeitswert übersteigen, wird der Versagensmechanismus als Kohäsionsbruch bezeichnet. Als Indikatoren für die Charakterisierung der Querzugfestigkeitsänderung infolge erhöhter Feuchtegehalte fungieren die beiden in Abschnitt 7.3.3 beschriebenen Quotienten. Die Indikatoren berücksichtigen sowohl reversible als auch irreversible Festigkeitsänderungen, welche die Eigenschaftswerte des gesamten Bauteils beeinflussen können.
Haftzugfestigkeit Haftscherfestigkeit	HzzFe	Das Kriterium charakterisiert die Neigung gefügter Bauteile ihre Haftzugfestigkeit bei intensiver Feuchtebeanspruchung zu ändern. Die Haftzugfestigkeit (auch Abreißfestigkeit oder Verbundfestigkeit) ist als Zugfestigkeit eines unter baupraktischen Bedingungen ermittelten Verbunds zu verstehen. Der im Zusammenhang mit der Haftzugfestigkeit stehende Schadenmechanismus (zum Beispiel das Ablösen von Wandbekleidungen wie etwa Putz oder Wärmedämm-Verbundsystemen) wird als Adhäsionsversagen (Versagen der Haftung in der Verbundfuge) bezeichnet. Adhäsionsversagen kennzeichnet zum Beispiel das Ablösen des Klebers von den Füge-teilen, während das zuvor beschriebene Kohäsionsversagen die Überlastung der Klebeschicht oder der Füge-teile selbst kennzeichnet. Analog zur Querzugfestigkeit dienen zwei Quotienten als Indikatoren für die Ermittlung des Einflusses erhöhter Feuchtegehalte auf die Eigenschaftswerte der Konstruktion. Die Indikatoren berücksichtigen sowohl reversible als auch irreversible Festigkeitsänderungen, welche die Eigenschaftswerte des gesamten Bauteils beeinflussen können (siehe Abschnitt 7.3.4). DIN EN 998-1 formuliert eine Mindesthaftzugfestigkeit von 80 kN/m ² , die für die üblichen Anwendungsfälle ausreichend ist.

²¹⁶ Ausgleichsfeuchte bei Normklima nach DIN 4108-2: Raumlufttemperatur 20 °C, relative Raumluftfeuchtigkeit 50 %.

7.3.2 Druckfestigkeit

Mauersteine

Eine Vielzahl kapillarporöser Baustoffe ändern ihre Festigkeitseigenschaften in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes, wobei die Minderung der Druckfestigkeit als nachteilige Folge einer Überflutung anzusprechen ist. In diesem Zusammenhang können reversible und irreversible Festigkeitsverluste infolge erhöhter Feuchtegehalte und anschließender Rücktrocknung unterschieden werden. Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich auf die in den untersuchten Außenwandkonstruktionen verwendeten Mauersteinarten Vollziegel (Mz), Hochlochziegel (HLz), Porenbeton-Plansteine (PP), Leichtbeton-Hohlblöcke (Hbl) und Kalksandsteine (KS). Die zwei Indikatoren (siehe Bild 48) für die Beurteilung der Druckfestigkeitsänderungen der Mauersteinarten sind in Anlehnung an den Forschungsbericht von Brameshuber und Graubohm (2007, S. B1 ff.)

Bild 48

Veränderung der mittleren Druckfestigkeit β_{PR} der betrachteten Mauersteinarten während und nach intensiver Hochwasserbeanspruchung nach Brameshuber und Graubohm (2004).

Zeitpunkt t_2 :

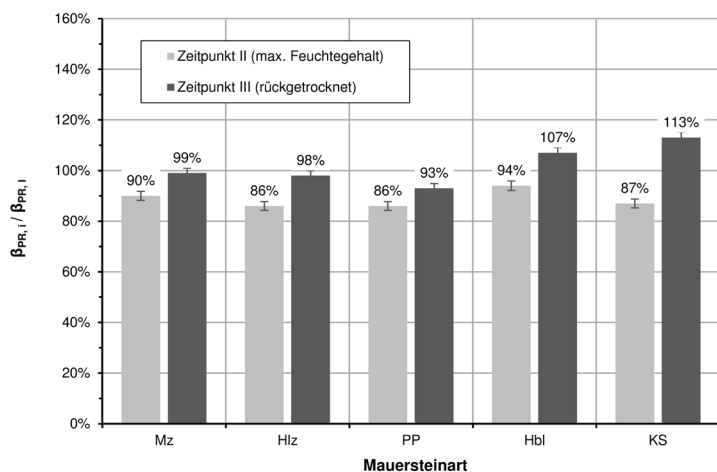
Quotient $\beta_{PR,2} / \beta_{PR,1}$ entspricht Druckfestigkeit bei Sättigungsfeuchte / Druckfestigkeit bei Ausgleichsfeuchte vor der Einwirkung

Zeitpunkt t_3 :

Quotient $\beta_{PR,3} / \beta_{PR,1}$ entspricht Druckfestigkeit bei Sättigungsfeuchte nach der Einwirkung / Druckfestigkeit bei Ausgleichsfeuchte vor der Einwirkung

Mz Vollziegel
 HLz Hochlochziegel
 PP Porenbeton-Plansteine
 Hbl Leichtbeton-Hohlblöcke
 KS Kalksandstein

- der Quotient der Druckfestigkeit $\beta_{PR,2}$ während der Hochwasserbeanspruchung (sich maximal einstellender Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_2) und der Druckfestigkeit $\beta_{PR,1}$ vor der Hochwasserbeanspruchung (Ausgleichsfeuchte zum Zeitpunkt t_1) sowie
- der Quotient der Druckfestigkeit $\beta_{PR,3}$ nach Rücktrocknung des Baustoffes auf den ursprünglichen Feuchtegehalte (Zeitpunkt t_3) und der Druckfestigkeit $\beta_{PR,1}$ vor der Hochwasserbeanspruchung (Ausgleichsfeuchte zum Zeitpunkt t_1).



Indikator	Druckfestigkeit der Mauersteine bei Sättigungsfeuchte	
	Akronym	DrFe_SF
	Kategorie I	Statisch-konstruktive Kriterien
	Kategorie II	Druckfestigkeit
Beschreibung	<p>Der Indikator misst den Quotienten der Druckfestigkeit $\beta_{PR,2}$ bei Sättigungsfeuchte (sich maximal einstellender Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_2 infolge Hochwasserbeanspruchung) und der Druckfestigkeit $\beta_{PR,1}$ bei Ausgleichsfeuchte (Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_1 vor der Hochwasserbeanspruchung) eines Mauersteins. Betrachtet werden die Mauersteinarten Mz, HLz, PP, Hbl und KS. Der Quotient $\beta_{PR,2} / \beta_{PR,1}$ (in Prozent) ist für die genannten Mauersteinarten im nachstehenden Diagramm (Bild 49) dargestellt. Allgemein gilt: Je kleiner der Quotient ist, desto nachteiliger ist das jeweilige Bau-stoffverhalten im Hinblick auf die Druckfestigkeitseigenschaften bei Hochwassereinwirkungen zu bewerten. Die absoluten Druckfestigkeitswerte der Mauersteinarten enthält Brameshuber und Graubohm (2008, Seite B4 ff).</p>	
Funktion	<p>The bar chart shows the ratio $\beta_{PR,2} / \beta_{PR,1}$ for five brick types: Mz (90%), HLz (86%), PP (86%), Hbl (94%), and KS (87%). The line graph shows the target fulfillment degree (Zielerfüllungsgrad) for different ratio ranges: $\geq 100\%$ (1.0), $> 95\%$ (0.8), $> 90\%$ (0.6), $> 85\%$ (0.4), $> 80\%$ (0.2), and $\leq 80\%$ (0.0).</p>	
Literatur / Datenbasis	Brameshuber und Graubohm (2008)	

Tabelle 21

Kennblatt für den Indikator Druckfestigkeit der Mauersteine bei Sättigungsfeuchte

Bild 49

Veränderung der mittleren Druckfestigkeit der betrachteten Mauersteinarten bei Sättigungsfeuchte nach Brameshuber und Graubohm (2004). Der Fehlerindikator zeigt die Schwankungsbreite des Quotienten von $\pm 5\%$.

- Mz Vollziegel
- HLz Hochlochziegel
- PP Porenbeton-Plansteine
- Hbl Leichtbeton-Hohlblöcke
- KS Kalksandstein

Tabelle 22

Kennblatt für den Indikator Druckfestigkeit der rückgetrockneten Mauersteine

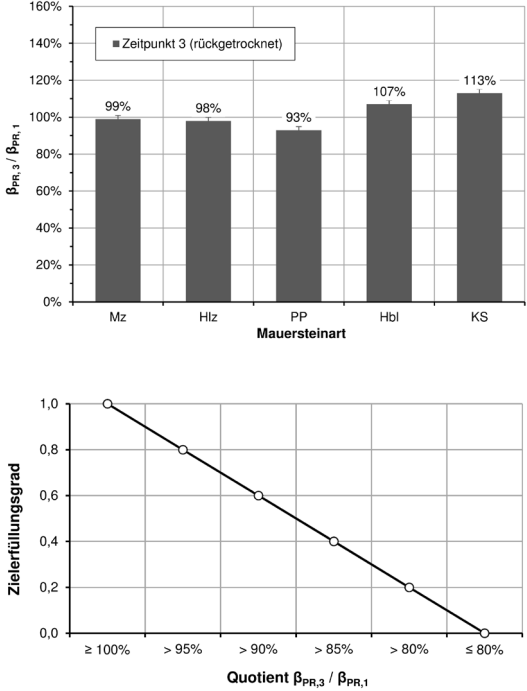
Indikator	Druckfestigkeit der rückgetrockneten Mauersteine	
	Akronym	DrFe_AF
	Kategorie I	Statisch-konstruktive Kriterien
	Kategorie II	Druckfestigkeit
Beschreibung	<p>Der Indikator misst den Quotienten der Druckfestigkeit $\beta_{PR,3}$ bei Ausgleichsfeuchte (rückgetrockneter Mauerstein zum Zeitpunkt t_3 nach Hochwasserbeanspruchung) und der Druckfestigkeit $\beta_{PR,1}$ bei Ausgleichsfeuchte (Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_1 vor der Hochwasserbeanspruchung) eines Mauersteins. Betrachtet werden die Mauersteinarten Mz, HLz, PP, Hbl und KS. Der Quotient $\beta_{PR,3} / \beta_{PR,1}$ (in Prozent) ist für die genannten Mauersteinarten in Bild 50 dargestellt. Allgemein gilt: Je kleiner der Quotient ist, desto nachteiliger ist das jeweilige Baustoffverhalten im Hinblick auf die Druckfestigkeitseigenschaften bei Hochwassereinwirkungen zu bewerten. Die absoluten Druckfestigkeitswerte der Mauersteinarten enthält Brameshuber und Graubohm (2008, Seite B4 ff).</p>	
Funktion		
Literatur / Datenbasis	Brameshuber und Graubohm (2008)	

Bild 50

Veränderung der mittleren Druckfestigkeit der betrachteten Mauersteinarten nach Rücktrocknung (Brameshuber und Graubohm 2004). Der Fehlerindikator zeigt die Schwankungsbreite des Quotienten von $\pm 5\%$.

- Mz Vollziegel
- HLz Hochlochziegel
- PP Porenbeton-Plansteine
- Hbl Leichtbeton-Hohlblöcke
- KS Kalksandstein

7.3.3 Querzugfestigkeit | Scherfestigkeit

Mauersteine

Neben den Druckfestigkeitseigenschaften der Mauersteinarten beeinflusst der Feuchtegehalt auch die Querzugfestigkeit, deren Minderung als nachteilige Folge einer Überflutung anzusprechen ist. In diesem Zusammenhang sind erneut reversible und irreversible Festigkeitsverluste infolge erhöhter Feuchtegehalte und anschließender Rücktrocknung differenzierbar. Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich auf die in den untersuchten Außenwandkonstruktionen verwendeten Mauersteinarten Mz, HLz, PP, Hbl und KS. Die zwei Indikatoren (siehe Bild 51) für die Beurteilung der Querzugfestigkeitsänderungen der Mauersteinarten sind in Anlehnung an den Forschungsbericht von Brameshuber und Graubohm (2008, S. B7 ff.)

- der Quotient der Querzugfestigkeit $\beta_{Z,2}$ während der Hochwasserbeanspruchung (sich maximal einstellender Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_2) und der Querzugfestigkeit $\beta_{Z,1}$ vor der Hochwasserbeanspruchung (Ausgleichsfeuchte zum Zeitpunkt t_1) sowie
- der Quotient der Querzugfestigkeit $\beta_{Z,3}$ nach Rücktrocknung des Baustoffes auf den ursprünglichen Feuchtegehalte (Zeitpunkt t_3) und der Querzugfestigkeit $\beta_{Z,1}$ vor der Hochwasserbeanspruchung (Ausgleichsfeuchte zum Zeitpunkt t_1).

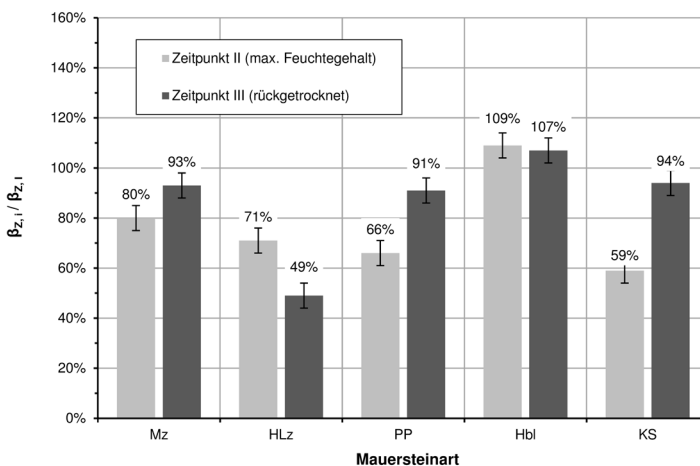


Bild 51

Veränderung der mittleren Querzugfestigkeit β_Z der betrachteten Mauersteinarten während und nach intensiver Hochwasserbeanspruchung nach Brameshuber und Graubohm (2004).

Zeitpunkt t_2 :

Quotient $\beta_{Z,2} / \beta_{Z,1}$ entspricht Querzugfestigkeit bei Sättigungsfeuchte / Querzugfestigkeit bei Ausgleichsfeuchte vor der Einwirkung

Zeitpunkt t_3 :

Quotient $\beta_{Z,3} / \beta_{Z,1}$ entspricht Querzugfestigkeit bei Sättigungsfeuchte nach der Einwirkung / Querzugfestigkeit bei Ausgleichsfeuchte vor der Einwirkung

Mz Vollziegel
 HLz Hochlochziegel
 PP Porenbeton-Plansteine
 Hbl Leichtbeton-Hohlblöcke
 KS Kalksandstein

Tabelle 23

Kennblatt für den Indikator Querkzugfestigkeit der Mauersteine bei Sättigungsfeuchte

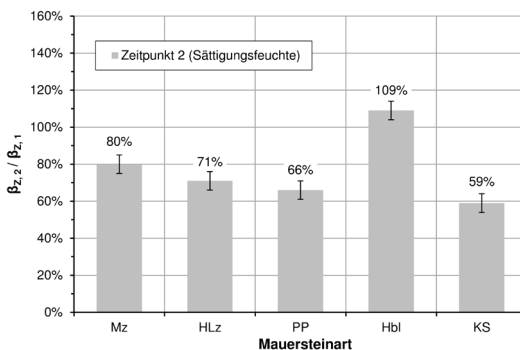
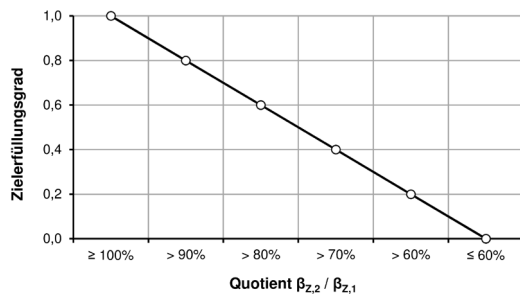
Indikator	Querkzugfestigkeit der Mauersteine bei Sättigungsfeuchte	
	Akronym	QzFe_SF
	Kategorie I	Statisch-konstruktive Kriterien
	Kategorie II	Querkzugfestigkeit
Beschreibung	<p>Der Indikator misst den Quotienten der Querkzugfestigkeit $\beta_{z,2}$ bei Sättigungsfeuchte (sich maximal einstellender Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_2 infolge Hochwasserbeanspruchung) und der Querkzugfestigkeit $\beta_{z,1}$ bei Ausgleichsfeuchte (Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_1 vor der Hochwasserbeanspruchung) eines Mauersteins. Betrachtet werden die Mauersteinarten Mz, HLz, PP, Hbl und KS. Der Quotient $\beta_{z,2} / \beta_{z,1}$ (in Prozent) ist für die genannten Mauersteinarten in Bild 52 dargestellt. Allgemein gilt: Je kleiner der Quotient ist, desto nachteiliger ist das jeweilige Baustoffverhalten im Hinblick auf die Querkzugfestigkeitseigenschaften bei Hochwasserereignissen zu bewerten. Die absoluten Querkzugfestigkeitswerte der Mauersteinarten enthält Brameshuber und Graubohm (2008, Seite B7 ff.).</p>	
Funktion	 	
Literatur / Datenbasis	Brameshuber und Graubohm (2008)	

Bild 52

Veränderung der mittleren Querkzugfestigkeit der betrachteten Mauersteinarten bei Sättigungsfeuchte nach Brameshuber und Graubohm (2004). Der Fehlerindikator zeigt die Schwankungsbreite des Quotienten von $\pm 5\%$.

- Mz Vollziegel
- HLz Hochlochziegel
- PP Porenbeton-Plansteine
- Hbl Leichtbeton-Hohlblöcke
- KS Kalksandstein

Indikator	Querzugfestigkeit der rückgetrockneten Mauersteine	
	Akronym	QzFe_MW_AF
	Kategorie I	Statisch-konstruktive Kriterien
	Kategorie II	Querzugfestigkeit
Beschreibung	<p>Der Indikator misst den Quotienten der Querzugfestigkeit $\beta_{z,3}$ bei Ausgleichsfeuchte (rückgetrockneter Mauerstein zum Zeitpunkt t_3 nach Hochwasserbeanspruchung) und der Querzugfestigkeit $\beta_{z,1}$ bei Ausgleichsfeuchte (Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_1 vor der Hochwasserbeanspruchung) eines Mauersteins. Betrachtet werden die Mauersteinarten Mz, HLz, PP, Hbl und KS. Der Quotient $\beta_{z,3} / \beta_{z,1}$ (in Prozent) ist für die genannten Mauersteinarten in Bild 53 dargestellt. Allgemein gilt: Je kleiner der Quotient ist, desto nachteiliger ist das jeweilige Baustoffverhalten im Hinblick auf die Querzugfestigkeitseigenschaften bei Hochwassereinwirkungen zu bewerten. Die absoluten Querzugfestigkeitswerte der Mauersteinarten enthält Brameshuber und Graubohm (2008, Seite B7 ff.).</p>	
Funktion	<p>The top chart is a bar graph showing the quotient $\beta_{z,3} / \beta_{z,1}$ for five brick types: Mz (93%), HLz (49%), PP (91%), Hbl (107%), and KS (94%). The bottom chart is a line graph showing the target fulfillment degree (Zielerfüllungsgrad) on the y-axis (0.0 to 1.0) against the quotient $\beta_{z,3} / \beta_{z,1}$ on the x-axis (≥ 100%, > 90%, > 80%, > 70%, > 60%, ≤ 60%). The line shows a decreasing trend from 1.0 at ≥ 100% to 0.0 at ≤ 60%.</p>	
Literatur / Datenbasis	Brameshuber und Graubohm (2008)	

Tabelle 24

Kennblatt für den Indikator Querzugfestigkeit der rückgetrockneten Mauersteine

Bild 53

Veränderung der mittleren Querzugfestigkeit der betrachteten Mauersteinarten nach Rücktrocknung (Brameshuber und Graubohm 2004). Der Fehlerindikator zeigt die Schwankungsbreite des Quotienten von $\pm 5\%$.

- Mz Vollziegel
- HLz Hochlochziegel
- PP Porenbeton-Plansteine
- Hbl Leichtbeton-Hohlblöcke
- KS Kalksandstein

Dämmstoffe

Den Einfluss von Feuchte auf den charakteristischen Kennwert der Zugfestigkeit rechtwinkelig zur Plattenrichtung von mineralfaser- beziehungsweise polystyrolbasierten Dämmstoffen untersuchte Fechner (2008). Die Ergebnisse dieser Versuche dienen zur Beurteilung der Zuverlässigkeit feuchtebelasteter Dämmstoffplatten bei Querkzugbeanspruchung. Die zwei Indikatoren (siehe Bild 54) für die Beurteilung der Querkzugfestigkeitsänderungen sind

- der Quotient der Querkzugfestigkeit $\beta_{Z,2}$ während der Hochwasserbeanspruchung (sich maximal einstellender Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_2) und der Querkzugfestigkeit $\beta_{Z,2}$ vor der Hochwasserbeanspruchung (Ausgleichsfeuchte zum Zeitpunkt t_1) sowie
- der Quotient der Querkzugfestigkeit $\beta_{Z,3}$ nach Rücktrocknung des Baustoffes auf den ursprünglichen Feuchtegehalte (Zeitpunkt t_3) und der Querkzugfestigkeit $\beta_{Z,1}$ vor der Hochwasserbeanspruchung (Ausgleichsfeuchte zum Zeitpunkt t_1).

Bild 54

Veränderung der mittleren Querkzugfestigkeit β_Z der betrachteten Dämmstoffplatten während und nach intensiver Hochwasserbeanspruchung nach Fechner (2008).

Zeitpunkt t_2 :

Quotient $\beta_{Z,2} / \beta_{Z,1}$ entspricht Querkzugfestigkeit bei Sättigungsfeuchte / Querkzugfestigkeit bei Ausgleichsfeuchte vor der Einwirkung

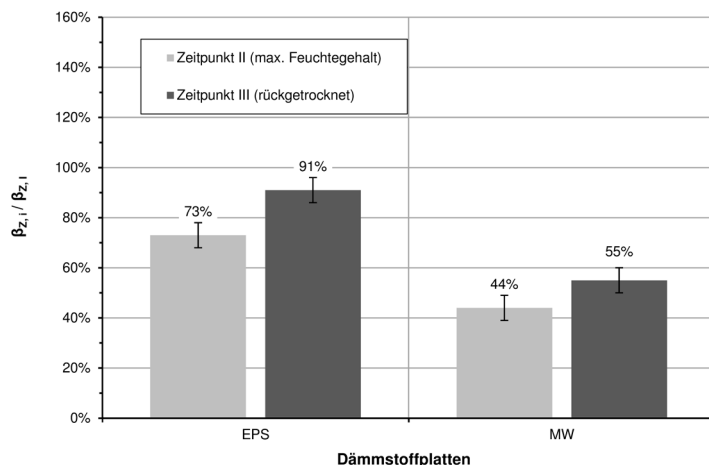
Zeitpunkt t_3 :

Quotient $\beta_{Z,3} / \beta_{Z,1}$ entspricht Querkzugfestigkeit bei Sättigungsfeuchte nach der Einwirkung / Querkzugfestigkeit bei Ausgleichsfeuchte vor der Einwirkung

EPS Dämmstoffplatte aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum

MW Dämmstoffplatte aus mineralischen, kunstharzgebundenen Fasern (Steinwolle)

Bild 54 verdeutlicht die relative Minderung der Querkzugfestigkeit für den expandierten Polystyrol-Hartschaum (EPS) und für die Steinwolle bei Sättigungsfeuchte. Erkennbar ist in Bild 54 zudem, dass ein Teil dieses Festigkeitsverlustes reversibel ist, das heißt nach der Rücktrocknung nimmt die Querkzugfestigkeit beider Dämmstoffe wieder zu. Da die Ausgangsfestigkeit jedoch nicht wieder erreicht wird, ist bereits mit der einmaligen intensiven Durchfeuchtung eine irreversible Festigkeitsminderung verbunden.



Indikator	Querzugfestigkeit der Dämmstoffe bei Sättigungsfeuchte	
	Akronym	QzFe_DS_SF
	Kategorie I	Statisch-konstruktive Kriterien
	Kategorie II	Querzugfestigkeit
Beschreibung	<p>Der Indikator misst den Quotienten der Querzugfestigkeit $\beta_{z,2}$ bei Sättigungsfeuchte (sich maximal einstellender Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_2 infolge Hochwasserbeanspruchung) und der Querzugfestigkeit $\beta_{z,1}$ bei Ausgleichsfeuchte (Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_1 vor der Hochwasserbeanspruchung) des Dämmstoffes. Betrachtet werden Dämmstoffplatten aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum (EPS) sowie aus mineralischen, kunstharzgebundenen Fasern (Steinwolle). Der Quotient $\beta_{z,2}/\beta_{z,1}$ (in Prozent) ist für die genannten Dämmstoffplatten in Bild 55 dargestellt. Allgemein gilt: Je kleiner der Quotient ist, desto nachteiliger ist das jeweilige Baustoffverhalten im Hinblick auf die Querzugfestigkeitseigenschaften bei Hochwassereinwirkungen zu bewerten. Die absoluten Querzugfestigkeitswerte der Dämmstoffplatten enthält Fechner (2008).</p>	
Funktion	<p>The top chart is a bar graph showing the ratio $\beta_{z,2}/\beta_{z,1}$ for two types of insulation plates: EPS and MW. The y-axis ranges from 0% to 160%. The EPS bar is at 73% and the MW bar is at 44%. The bottom chart is a line graph showing the 'Zielerfüllungsgrad' (target fulfillment degree) on the y-axis (0.0 to 1.0) against the 'Quotient $\beta_{z,2}/\beta_{z,1}$' on the x-axis. The x-axis categories are $\geq 100\%$, $> 90\%$, $> 80\%$, $> 70\%$, $> 60\%$, and $\leq 60\%$. The line starts at 1.0 for $\geq 100\%$ and decreases linearly to 0.0 for $\leq 60\%$.</p>	
Literatur / Datenbasis	Fechner (2008)	

Tabelle 25

Kennblatt für den Indikator Querzugfestigkeit der Dämmstoffe bei Sättigungsfeuchte

Bild 55

Veränderung der mittleren Querzugfestigkeit der betrachteten Dämmstoffplatten bei Sättigungsfeuchte nach Fechner (2008). Der Fehlerindikator zeigt die Schwankungsbreite des Quotienten von $\pm 5\%$.

- EPS Dämmstoffplatte aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum
- MW Dämmstoffplatte aus mineralischen, kunstharzgebundenen Fasern (Steinwolle)

Tabelle 26

Kennblatt für den Indikator Querkzugfestigkeit der rückgetrockneten Dämmstoffe

Indikator	Querkzugfestigkeit der rückgetrockneten Dämmstoffe	
	Akronym	QzFe_DS_AF
	Kategorie I	Statisch-konstruktive Kriterien
	Kategorie II	Querkzugfestigkeit
Beschreibung	<p>Der Indikator misst den Quotienten der Querkzugfestigkeit $\beta_{z,3}$ bei Ausgleichsfeuchte (rückgetrockneter Dämmstoff zum Zeitpunkt t_3 nach Hochwasserbeanspruchung) und der Querkzugfestigkeit $\beta_{z,1}$ bei Ausgleichsfeuchte (Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_1 vor der Hochwasserbeanspruchung) des Dämmstoffes. Betrachtet werden Dämmstoffplatten aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum (EPS) sowie aus mineralischen, kunstharzgebundenen Fasern (Steinwolle). Der Quotient $\beta_{z,3} / \beta_{z,1}$ (in Prozent) ist für die genannten Dämmstoffplatten in Bild 56 dargestellt. Allgemein gilt: Je kleiner der Quotient ist, desto nachteiliger ist das jeweilige Baustoffverhalten im Hinblick auf die Querkzugfestigkeitseigenschaften bei Hochwassereinwirkungen zu bewerten. Die absoluten Querkzugfestigkeitswerte der Dämmstoffplatten enthält Fechner (2008).</p>	
Funktion	<p>The top chart is a bar graph titled 'Zeitpunkt 3 (rückgetrocknet)' showing the ratio $\beta_{z,3} / \beta_{z,1}$ for two types of insulation: EPS (91%) and MW (55%). The y-axis ranges from 0% to 160%.</p> <p>The bottom chart is a line graph showing the 'Zielerfüllungsgrad' (target fulfillment degree) on the y-axis (0.0 to 1.0) against the 'Quotient $\beta_{z,3} / \beta_{z,1}$' on the x-axis. The x-axis categories are $\geq 100\%$, $> 90\%$, $> 80\%$, $> 70\%$, $> 60\%$, and $\leq 60\%$. The line shows a decreasing trend from 1.0 at $\geq 100\%$ to 0.0 at $\leq 60\%$.</p>	
Literatur / Datenbasis	Fechner (2008)	

Bild 56

Veränderung der mittleren Querkzugfestigkeit der betrachteten Dämmstoffplatten nach Rücktrocknung (Fechner 2008). Der Fehlerindikator zeigt die Schwankungsbreite des Quotienten von $\pm 5\%$.

EPS Dämmstoffplatte aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum

MW Dämmstoffplatte aus mineralischen, kunstharzgebundenen Fasern (Steinwolle)

7.3.4 Haftzugfestigkeit | Haftscherfestigkeit

Die Festigkeit adhäsiver Baustoffverbindungen steht häufig in Wechselwirkung mit der Intensität der Feuchtebelastung. Unterschreitet die Haftzugfestigkeit infolge Hochwasserbeanspruchung einen kritischen Wert können auftretende mechanische Einwirkungen²¹⁷ zur lokalen Zerstörung des adhäsiven Kontakts, das heißt zum Bindungsbruch an der Grenzfläche, führen. Die Kontaktzerstörung beginnt in der Regel an baupraktisch nicht vermeidbaren, strukturellen Mikrodefekten an den Grenzflächen, das heißt in der Verbundfuge zwischen zwei Baustoffen.²¹⁸ Folgende Arten des Adhäsionsversagens sind für die betrachteten Mauerwerkskonstruktionen relevant:

- Adhäsionsbruch in der Fuge (Grenzfläche) zwischen Mauerstein und Putzmörtel (Fassadenputz)
- Adhäsionsbruch in der Verbundfuge zwischen Dämmstoff und Kleber beziehungsweise in der Kontaktfläche zwischen Mauerstein und Kleber (zum Beispiel für geklebte Wärmedämm-Verbundsysteme)
- Adhäsionsbruch in der Verbundfuge zwischen Unterputz und Dämmstoff (bei Wärmedämm-Verbundsystemen)

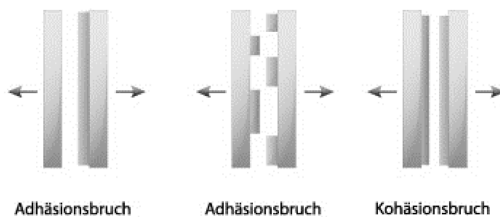


Bild 57

Versagensarten gefügter Materialien bei Zugbeanspruchung.

Quelle: www.riewoldt.de

Neben dem Adhäsionsbruch in der Verbundfuge kann aber auch der Kohäsionsbruch, das heißt das Überschreiten der Querkzugfestigkeit der verwendeten Materialien, den maßgebenden Versagensmechanismus bilden. Haftzugversuche an Verbundproben feuchtebelasteter Wärmedämmverbundsysteme von Fechner (2008) zeigen, dass

²¹⁷ Die wesentlichen Beanspruchungen der Wandbekleidung resultieren aus feuchtebedingt erhöhten Eigenlasten sowie aus Windsog.

²¹⁸ Um zwei aneinander haftende Körper zu trennen, benötigt man eine mechanische Kraft, die als Adhäsionskraft (auch pull-off force, tearing off force, Abreißkraft, Haftkraft) bezeichnet wird. (Dutschk 2000, S. 19)

- bei Probekörpern mit Dämmplatten aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum (EPS) aufgrund der wesentlich größeren Querkzugfestigkeiten des Materials „öfter ein Versagen [...] in der Ebene des Bewehrungsgewebes (Unterputz) festzustellen“ ist, so dass das Adhäsionsversagen maßgebend wird,
- bei Probekörpern mit Mineralwolle-Putzträgerplatten, bei denen die Mineralfasern parallel zur Plattenebene verlaufen, häufig Kohäsionsversagen in der Mitte des Dämmstoffes die Versagensursache bildet (Querkzugfestigkeit $\beta_z > 15 \text{ kN/m}^2$ nach DIN EN 1607) und dass
- bei Probekörpern mit Mineralwolle-Lamellenplatten, bei denen die Mineralfasern senkrecht zur Plattenebene angeordnet sind, höhere Reserven im Hinblick auf die Festigkeit in Beanspruchungsrichtung (Querkzugfestigkeit $\beta_z > 80 \text{ kN/m}^2$ nach DIN EN 1607) bestehen und höhere reversible Festigkeitsanteile nach Rücktrocknung vorliegen.

Verbund Mauerstein – Putzmörtel

Das Kriterium dient der Beurteilung der feuchteinduzierten Änderung der Verbundeigenschaften β_{HZ} zwischen Putzmörtel und Mauerstein. Tabelle 22 enthält eine Übersicht über die betrachteten Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen. Die Beurteilung basiert auf Untersuchungen von Brameshuber und Graubohm (2008) zum „Einfluss einer Wasserbeaufschlagung auf Eigenschaften von Mauerwerk und Bauteilbekleidungen“. Ihr Forschungsbericht enthält neben den Ergebnissen auch den zugrundeliegenden Prüfaufbau und das Prüfprotokoll.

Tabelle 27
Betrachtete Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen (i, j) für die Bewertung der Haftzugfestigkeit.

i ... Mauerstein
j ... Putzmörtel

Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen (i, j)	Kalk-Zement-Putz	Wärmedämmputz ²¹⁹	Kalkputz	Faserleichtputz
Mz	(1.1)	–	–	–
Hlz	–	(2.2)	(2.3)	(2.4)
PP	–	(3.2)	(3.3)	(3.4)
Hbl	(4.1)	–	–	–
KS	(5.1)	–	–	–

²¹⁹ Zweilagige Ausführung des Wärmedämmputzes.

**Haftzugfestigkeit
Wärmedämmputz**

Untersuchungen von Wärmedämm-Putzsystemen (zweila-
gige Ausführung mit weichem Unterputz und härterem Ober-
putz) hinsichtlich ihrer Haftzugfestigkeit auf verschiedenen
Mauersteinen und zur Querkzugfestigkeit (Eigenfestigkeit) be-
legen, dass der maßgebende Versagensmechanismus stets
der Kohäsionsbruch im Unterputz selbst und nicht der Adhäs-
ionsbruch in der Verbundfuge zwischen Putzgrund und Unter-
putz beziehungsweise zwischen Unter- und Oberputz ist.
Fitz und Künzel (2009) führen aus, dass aus diesem Grund
keine Messungen der Haftzugfestigkeit mehr gefordert, son-
dern nur Mindestwerte der Druckfestigkeit des Wärme-
dämmputzes festgelegt werden. Die für Wärmedämmputze
geforderte Mindestdruckfestigkeit von 400 kN/m² entspricht
einer Mindestzugfestigkeit von 40 kN/m² (Zugfestigkeit
~ 1/10 der Druckfestigkeit). Die zwei Indikatoren (siehe Bild
58) für die Beurteilung der Haftzugfestigkeitsänderungen der
Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen sind

- der Quotient der Haftzugfestigkeit $\beta_{HZ,2}$ während der
Wasserbeanspruchung (sich maximal einstellender
Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_2) und der Haftzugfestig-
keit $\beta_{HZ,1}$ vor der Hochwasserbeanspruchung (Aus-
gleichsfeuchte zum Zeitpunkt t_1) sowie
- der Quotient der Haftzugfestigkeit $\beta_{HZ,3}$ nach Rücktrock-
nung des Baustoffes auf den ursprünglichen Feuchte-
gehalte (Zeitpunkt t_3) und der Haftzugfestigkeit $\beta_{HZ,1}$ vor
der Hochwasserbeanspruchung (Ausgleichsfeuchte zum
Zeitpunkt t_1).

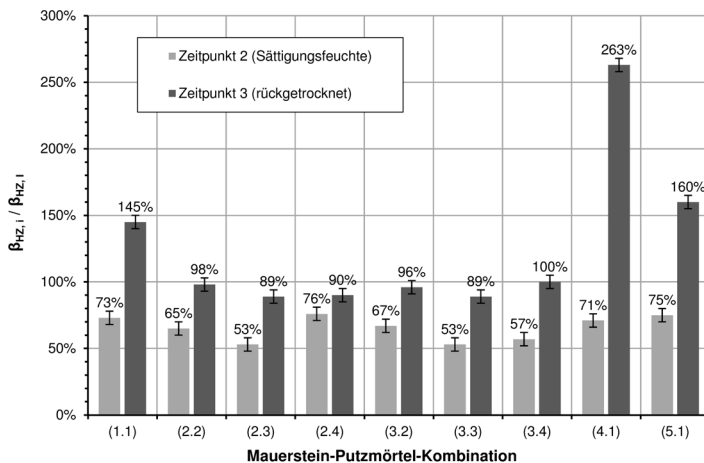


Bild 58

Veränderung der mittleren
Haftzugfestigkeit ausge-
wählter Mauerstein-Putz-
mörtel-Kombinationen wäh-
rend und nach intensiver
Hochwasserbeanspruchung
nach Fechner (2008).

- 1.1 Vollziegel mit Kalk-
Zement-Putz
- 2.2 Hochlochziegel mit
Wärmedämmputz
- 2.3 Hochlochziegel mit
Kalkputz
- 2.4 Hochlochziegel mit
Faserleichtputz
- 3.2 Porenbeton-Planstein
mit Wärmedämmputz
- 3.3 Porenbeton-Planstein
mit Kalkputz
- 3.4 Porenbeton-Planstein
mit Faserleichtputz
- 4.1 Leichtbeton-Hohl-
block mit Kalk-Ze-
ment-Putz
- 5.1 Kalksandstein mit
Kalk-Zement-Putz

Tabelle 28

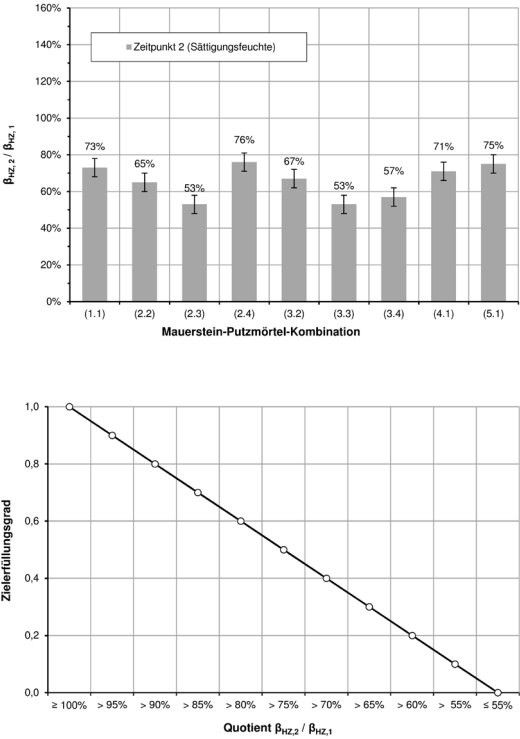
Kennblatt für den Indikator Haftzugfestigkeit der Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen bei Sättigungsfeuchte

Bild 59

Veränderung der mittleren Haftzugfestigkeit β_{HZ} ausgewählter Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen während intensiver Wasserbeanspruchung nach Brameshuber und Graubohm (2004, Seite B11 ff.). Der Fehlerindikator zeigt die Schwankungsbreite des Quotienten von $\pm 10\%$.

Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen:

- 1.1 Vollziegel mit Kalk-Zement-Putz
- 2.2 Hochlochziegel mit Wärmedämmputz
- 2.3 Hochlochziegel mit Kalkputz
- 2.4 Hochlochziegel mit Faserleichtputz
- 3.2 Porenbeton-Planstein mit Wärmedämmputz
- 3.3 Porenbeton-Planstein mit Kalkputz
- 3.4 Porenbeton-Planstein mit Faserleichtputz
- 4.1 Leichtbeton-Hohlblock mit Kalk-Zement-Putz
- 5.1 Kalksandstein mit Kalk-Zement-Putz

Indikator	Haftzugfestigkeit der Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen bei Sättigungsfeuchte	
	Akronym	HzFe_SF
	Kategorie I	Statisch-konstruktive Kriterien
	Kategorie II	Haftzugfestigkeit
Beschreibung	<p>Der Indikator basiert auf dem Quotienten der Haftzugfestigkeit $\beta_{HZ,2}$ bei Sättigungsfeuchte (sich maximal einstellender Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_2 infolge Hochwasserbeanspruchung) und der Haftzugfestigkeit $\beta_{HZ,1}$ bei Ausgleichsfeuchte (Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_1 vor der Hochwasserbeanspruchung) der jeweiligen Mauerstein-Putzmörtel-Kombination. Der Quotient $\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1}$ (in Prozent) ist für die genannten Kombinationen in Bild 59 dargestellt. Allgemein gilt: Je kleiner der Quotient ist, desto nachteiliger ist das jeweilige Baustoffverhalten im Hinblick auf die Haftzugfestigkeits-eigenschaften bei Hochwassereinwirkungen zu bewerten. Die absoluten Haftzugfestigkeitswerte der Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen enthält zum Beispiel Brameshuber und Graubohm (2008, Seite B11 ff.).</p>	
Funktion	 <p>The top chart is a bar graph showing the ratio $\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1}$ for nine combinations. The y-axis ranges from 0% to 160%. The x-axis lists combinations (1.1) to (5.1). The ratios are: (1.1) 73%, (2.2) 65%, (2.3) 53%, (2.4) 76%, (3.2) 67%, (3.3) 53%, (3.4) 57%, (4.1) 71%, (5.1) 75%. The bottom chart is a line graph showing the target fulfillment degree (Zielerfüllungsgrad) on the y-axis (0.0 to 1.0) versus the ratio $\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1}$ on the x-axis (100% to 55%). The data points are: (100%, 1.0), (>95%, 0.9), (>90%, 0.8), (>85%, 0.7), (>80%, 0.6), (>75%, 0.5), (>70%, 0.4), (>65%, 0.3), (>60%, 0.2), (>55%, 0.1), (55%, 0.0).</p>	
Literatur	Brameshuber und Graubohm (2008)	

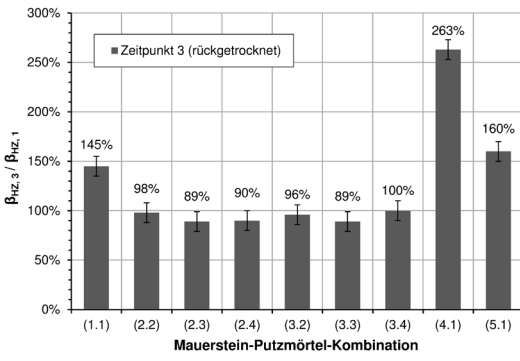
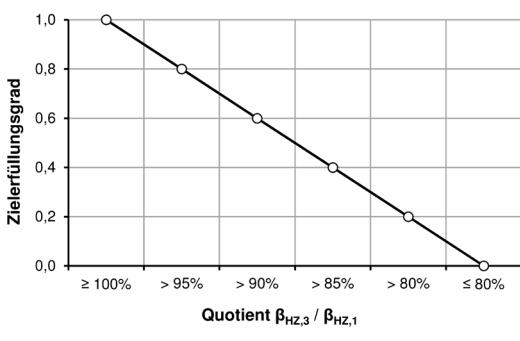
Indikator	Haftzugfestigkeit der Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen bei Ausgleichsfeuchte	
	Akronym	HZFe_AF
	Kategorie I	Statisch-konstruktive Kriterien
	Kategorie II	Haftzugfestigkeit
Beschreibung	<p>Der Indikator ermittelt den Quotienten der Haftzugfestigkeit $\beta_{HZ,3}$ bei Ausgleichsfeuchte (rückgetrocknete Baustoffkombination zum Zeitpunkt t_3 nach Hochwasserbeanspruchung) und der Haftzugfestigkeit $\beta_{HZ,1}$ bei Ausgleichsfeuchte (Feuchtegehalt zum Zeitpunkt t_1 vor der Hochwasserbeanspruchung) der jeweiligen Mauerstein-Putzmörtel-Kombination. Der Quotient $\beta_{HZ,3} / \beta_{HZ,1}$ (in Prozent) ist für die genannten Kombinationen in Bild 60 dargestellt. Allgemein gilt: Je kleiner der Quotient ist, desto nachteiliger ist das jeweilige Baustoffverhalten im Hinblick auf die Haftzugfestigkeitseigenschaften bei Hochwassereinwirkungen zu bewerten. Die absoluten Haftzugfestigkeitswerte der Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen enthält Brameshuber und Graubohm (2008, Seite B11 ff.).</p>	
Funktion	 	
Literatur	Brameshuber und Graubohm (2008)	

Tabelle 29

Kennblatt für den Indikator Haftzugfestigkeit der Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen bei Sättigungsfeuchte

Bild 60

Veränderung der mittleren Haftzugfestigkeit β_{HZ} ausgewählter Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen nach Rücktrocknung (Brameshuber und Graubohm 2004, S.11 ff.). Der Fehlerindikator zeigt die Schwankungsbreite des Quotienten von $\pm 10\%$.

Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen:

- 1.1 Vollziegel mit Kalk-Zement-Putz
- 2.2 Hochlochziegel mit Wärmedämmputz
- 2.3 Hochlochziegel mit Kalkputz
- 2.4 Hochlochziegel mit Faserleichtputz
- 3.2 Porenbeton-Planstein mit Wärmedämmputz
- 3.3 Porenbeton-Planstein mit Kalkputz
- 3.4 Porenbeton-Planstein mit Faserleichtputz
- 4.1 Leichtbeton-Hohlblock mit Kalk-Zement-Putz
- 5.1 Kalksandstein mit Kalk-Zement-Putz

Verbund Mauerstein – Kleber / Kleber – Dämmstoff

Bei geklebten Dämmstoffplatten ohne zusätzliche mechanische Befestigung führt die nachteilige Minderung der Verbundfestigkeit in der Fuge zwischen Mauerstein und Kleber beziehungsweise in der Fuge zwischen Kleber und Dämmstoff bis zur Gefährdung der Standsicherheit des Wärmedämm-Verbundsystems.²²⁰

In Abhängigkeit der Materialeigenschaften führt die intensive Feuchtebelastung der Verbundzone zur Plastifizierung und zur hygrysch bedingten Längenänderung (Quell- und Schwindverformung) des verwendeten Klebemittels²²¹. Infolge von Verformungsdifferenzen zwischen Klebemittel und Mauerstein entstehen jedoch Schubspannungen, die zum Ablösen des Klebemittels (Adhäsionsbruch) führen, wenn die Verbundfestigkeit überschritten wird. Häufig wird der Klebemörtel auch als glasfasergewebewehrter Unterputz eingesetzt, auf dem anschließend ein dünner Oberputz aufgezogen wird.²²²

Derzeit liegen keine belastbaren empirischen Untersuchungsergebnisse über das Verbundverhalten von Mauerstein-Kleber beziehungsweise von Kleber-Dämmstoff bei sehr hoher Feuchtebelastung vor, die in das Bewertungsverfahren einbezogen werden könnten. Der Fokus verfügbarer Quellen bezieht sich vorrangig auf das hygrothermische Verhalten der Verbundkonstruktion bei klimatisch bedingter Feuchtebeanspruchung (Bewitterung).²²³

Verbund Dämmstoff – Putzmörtel (Unterputz)

Hohe hygrysche Beanspruchungen führen bei Wärmedämm-Verbundsystemen in vielen Fällen zu einer Minderung der Haftzugfestigkeit in der Verbundfuge zwischen Unterputz

²²⁰ Zur Befestigung der Dämmstoffplatten auf dem tragenden Untergrund dient ein voll- oder teilflächig aufgezogener Kleber. Je nach Gebäudehöhe und der vorhandenen Windsogbeanspruchung sichern Dübel zusätzlich die Standsicherheit des WDVS.

²²¹ Hierzu zählen insbesondere kunststoffgebundene Klebemörtel, mineralisch gebundene Klebemörtel mit Kunststoffvergütung sowie Mischklebemörtel (kunststoffgebundene Klebemörtel mit einer Portlandzementzugabe bis zu 20 M.-%).

²²² Der Außenputz (Unterputz mit Glasfaserarmierung, Oberputz, Egalisationsanstrich) muss der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung des Wärmedämm-Verbundsystems entsprechen.

²²³ Vergleiche zum Beispiel Röder (2007), Fitz und Künzel (2009)

und Dämmstoff und deren Folge zum Adhäsionsbruch an der Kontaktfläche. Die feuchtebedingte Änderung der Querkzugfestigkeit des Dämmstoffes beleuchtet Abschnitt 7.3.3. Den Einfluss von Feuchte auf den Haftverbund zwischen Putzmörtel (Unterputz) und mineralfaser- beziehungsweise polystyrolbasierten Dämmstoffen untersuchte Fechner (2008).

7.4 Bauphysikalische Kriterien

7.4.1 Übersicht

Die Beurteilung der Änderung bauphysikalischer Eigenschaften hochwasserbeanspruchter Mauerwerkskonstruktionen basiert auf den in Tabelle 22 beschriebenen Kriterien. Das Kriterienensemble umfasst das Wasseraufnahmeverhalten, die Wasserdurchlässigkeit, die Dimensionsstabilität, die Wärmeleitfähigkeit sowie das Trocknungsverhalten.

Tabelle 30

Indikatoren für die Bewertung bauphysikalischer Eigenschaften hochwasserbeanspruchter Mauerwerkskonstruktionen.

Kriterium	Akronym	Beschreibung
Wasseraufnahmeverhalten	WaAuf	Das Kriterium beschreibt, wieviel Wasser ein Baustoff über die Benetzungsfläche je Zeiteinheit in sein Gefüge aufnehmen kann. Als Indikator zur Quantifizierung des kapillaren Saugvermögens fungiert der materialspezifische Wasseraufnahmekoeffizient A_W . Der A_W -Wert repräsentiert folglich die Aufnahmegeschwindigkeit von flüssigem Wasser durch den Baustoff. Plagge et al. (2005) definieren den A_W -Wert als anfängliche Steigung der kumulativen Wasseraufnahmekurve. Bei Materialien mit unveränderlicher Porenstruktur erfolgt die kapillare Wasseraufnahme in der Regel linear mit der Wurzel der Zeit. Der Wasseraufnahmekoeffizient ist – je nach Baustoff – nach DIN EN ISO 15148 (Bau- und Dämmstoffe), DIN EN 771-11 (Ziegel, Betonwerksteine, Porenbeton, Naturstein) oder nach DIN EN 1015-18 (Putz, Sanierputz) experimentell bestimmbar (Standardverfahren). ²²⁴
Wasserdurchlässigkeit	WaDu	Das Kriterium bewertet das Flüssigwasservolumen, das bei außenseitig hochwasserbeanspruchten Mauerwerkskonstruktionen in einem definierten Zeitintervall durch die Schichtenfolgen auf die Innenseite der Konstruktion gelangt. Das Kriterium repräsentiert somit die Dichtigkeit der Konstruktion gegenüber durchdringendem Hochwasser. Es hängt maßgeblich vom Druckgradienten ab, der wiederum von der Wasserstandsdifferenz zwischen Außen- und Innenseite beeinflusst wird.

²²⁴ Fitz und Krus (2004) führen aus, dass im Zuge der europäischen Harmonisierung eine Vielzahl von Normen für die Bestimmung von feuchte-technischen Materialkennwerten entstanden sind, so dass nunmehr für jeden Baustoff produktspezifische Verfahren existieren anstatt wie früher produktübergordnete Normen. Dies mündet in verschiedenen Prüfalgorithmen und in einer erschwerten Vergleichbarkeit der Kennwerte.

Kriterium	Akronym	Beschreibung
<i>Fortsetzung</i>		Das Kriterium wird unter anderem von den Wassertransporteigenschaften der verwendeten Baustoffschichten charakterisiert. ²²⁵ Als Indikator für die Wasserdurchlässigkeit fungiert die tatsächlich im Verlauf der Laboruntersuchungen gemessene Wassermenge auf der Innenseite der Wandkonstruktion.
Dimensionsstabilität	DiSta	Das Kriterium kennzeichnet die Neigung von Baustoffen ihre Länge beziehungsweise ihr Volumen in Abhängigkeit ihres Feuchtegehaltes zu verändern (Quellen und Schwinden). Das hygrische Formänderungsverhalten wird vom Anteil quellfähiger Bestandteile im Baustoffgefüge und vom Feuchtebereich (hygroskopisch, überhygroskopisch) bestimmt. Die Mehrzahl der Baustoffe zeigen ein reversibles Quellen und Schwinden infolge wechselnder Wassergehalte. ²²⁶ Das Feuchtedehnverhalten vieler Baustoffe ist richtungsabhängig. An Grenzflächen gefügter Materialien können Scherspannungen entstehen, welche die Ablösung von Schichten führen. Die hygrische Dehnung ist als materialspezifische Funktion der Stofffeuchte darstellbar. Bei ungleichmäßiger Verteilung des Wassergehaltes im Querschnitt neigen Bauteile zu hygrisch bedingten Krümmungen, die bei behinderter Verformung zu Biegespannungen und zur Rissbildung führen können.
Wärmeleitfähigkeit	WL	Die Wärmeleitfähigkeit üblicher Baustoffe nimmt mit ansteigendem Feuchtegehalt zu. Zwischen den beiden Parametern besteht in der Regel eine positiv lineare Korrelation. Die negativen energetischen Konsequenzen sind erhöhte Transmissionswärmeverluste durch das betroffene Bauteil. Der Indikator charakterisiert diesen funktionalen Zusammenhang. Der Einfluss des Wassergehaltes auf die Dämmeigenschaften ist berechenbar, sofern zuverlässige hygrothermische Stoffkennwerte vorliegen. Die Berechnung des Wärmetransfers, das heißt der Wärmeleitung in Abhängigkeit vom Wassergehalt, basiert auf einem Algorithmus der in DIN EN 15026 beschrieben ist. Der Latentwärmehtransport infolge Dampfdiffusion mit Phasenwechsel bleibt hierbei unberücksichtigt. ²²⁷
Trocknungsverhalten	TrVer	Das Kriterium bezieht sich vorrangig auf die Geschwindigkeit, mit der ein Baustoff akkumulierte Feuchtigkeit wieder an die Umgebung abgeben kann. Die Diffusionswiderstandszahl μ und die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d bilden neben dem Wasseraufnahmekoeffizienten A_W bauphysikalische Standardkennwerte zur Charakterisierung des Feuchteverhaltens von Baustoffen, wobei die beiden erstgenannten Parameter das Trocknungsverhalten infolge Diffusion kennzeichnen.

²²⁵ Die Wassertransporteigenschaften, hier die Wasserdurchlässigkeit, sind mit dem baustoffspezifischen Durchlässigkeitsbeiwert (auch hydraulische Leitfähigkeit) k_f abbildbar. Der k_f -Wert hängt von Baustoffmatrix (Porengefüge) ab. Darüber hinaus ist das Hohlraumvolumen für die Wasserdurchlässigkeit relevant.

²²⁶ Vergleiche zum Beispiel Möller (1993), Fischer et al. (2012, S. 436)

²²⁷ Der Enthalpietransfer infolge Dampfdiffusion mit Phasenwechsel (Latentwärmehtransport) ist insbesondere für diffusionsoffenen Baustoffe relevant. Dieser Effekt bleibt hier unberücksichtigt.

Kriterium	Akronym	Beschreibung
<i>Fortsetzung</i>		Die Abgabe von Wasser erfolgt in den überwiegenden Fällen langsamer als die Wasseraufnahme. Der Einfluss der kapillaren Leitfähigkeit wird bei dieser Betrachtung jedoch vernachlässigt. ²²⁸ Daher führen Scheffler und Plagge (2009) einen Trocknungskoeffizienten D ein, der als Indikator für die Unterscheidung und Beurteilung des Trocknungsverhaltens dient und kapillare Transportmechanismen berücksichtigt. Diesen Einzahlen-Materialkennwert leiten die Autoren aus dem baustoffspezifischen Trocknungsverlauf ab und ermöglichen somit auch den einfachen praktischen Vergleich alternativer Baustoffe, was insbesondere bei feuchteempfindlichen Materialien von Relevanz ist. Die Erkenntnisse basieren auf einem numerischen Simulationsverfahren. Die Dauer und der Verlauf der Trocknung poröser Baustoffe hängt bei gleichen klimatischen Verhältnissen (Temperatur und Luftfeuchte) sowie bei gleichen Übergangsbedingungen an der Trocknungsoberfläche (Luftgeschwindigkeit, Oberflächenrauigkeit) erheblich von den Materialeigenschaften (Feuchtespeicherung und Feuchtetransport) ab. Ein wichtiger Parameter ist der Anfangsfeuchtegehalt, der im Laborexperiment bestimmt wurde.

7.4.2 Wasseraufnahmeverhalten

Als messbarer Indikator für die kapillare Wasseraufnahme poröser mineralischer Baustoffe fungiert das so bezeichnete \sqrt{t} -Gesetz. Zahlreiche Studien (Aufsaugversuche) belegen, dass die überwiegende Zahl kapillarporöser Baustoffe Wasser weitgehend linear mit der Wurzel der Zeit in ihr Gefüge aufnehmen.²²⁹

Abweichungen vom linearen Verhalten sind nach Hohmann et al. (2004, S. 159) insbesondere am Beginn der Wasseraufnahme zum Beispiel durch Quelleffekte, andere Transportphänomene oder aufgrund der Oberflächenstruktur des Baustoffs möglich. Auffällig ist in diesem Zusammenhang, dass die baustoffspezifischen Werte für den Wasseraufnahmekoeffizienten auch innerhalb einer Literaturquelle in erheblichem Maße schwanken. Ursächlich hierfür scheinen eine starke Streuung einiger Baustoffparameter bei der Versuchsdurchführung, wie etwa der Rohdichte, Porosi-

²²⁸ Vergleiche zum Beispiel Krus et al. (2007)

²²⁹ Fischer et al. (2008, S. 379) führen dazu aus, dass der an den Menisken saugfähiger Baustoffe erzeugte Kapillardruck Wasser in die Poren hineinzieht. Mit zunehmender Eindringtiefe steigt jedoch der viskose Fließwiderstand des Wassers, so dass die Eindringtiefe immer langsamer zunimmt.

tät und Porengrößenverteilung, oder unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung des Kennwertes zu sein.²³⁰ Die in der Fachliteratur angegebenen Zahlenwerte für den Wasseraufnahmekoeffizienten sind folglich mit einiger Unsicherheit behaftet und bieten daher lediglich eine Orientierungshilfe bei der Quantifizierung des Kriteriums. Diese Feststellung wird innerhalb des Bewertungsverfahrens berücksichtigt, indem ein reduziertes Kriteriengewicht für den Wasseraufnahmekoeffizienten in die Nutzenwertanalyse einfließt.

Tabelle 31

Wasseraufnahmekoeffizient A_w ausgewählter Mauersteine, ermittelt nach DIN EN ISO 15148. Die Werte schwanken zum Teil erkennbar stark. Sie sind insbesondere von der Rohdichte des Baustoffes abhängig.

Quellen:

Jäger (2012, S. 27), Fischer et al. (2008, S. 381), Hohmann et al. (2004, S. 384), Lohmeyer (2001, S. 285)

Mauersteine	Rohdichte ρ in [kg/m ³]	Wasseraufnahmekoeffizient A_w	
		in [kg/(m ² * h ^{0,5})]	in [kg/(m ² * min ^{0,5})]
Vollziegel	2.200 ... 1.750	4 ... (20) ... 22	0,067 ... 0,367
Kalksandstein	1.920 ... 1.635	1,5 ... (13) ... 14	0,025 ... 0,217
Porenbeton-Plansteine	640 ... 530	3 ... (3,4) ... 10	0,050 ... 0,167
Leichtbeton-Hohlblöcke	700	1 ... (1,5) ... 2	0,017 ... 0,034
Hochlochziegel	1.100 ²³¹	7 ... (5,8) ... 9	0,117 ... 0,150

Die Steigung dieser linearen Funktion entspricht dem Wasseraufnahmekoeffizienten A_w . Die nachstehenden Tabellen 23 und 24 beinhalten die Bandbreite des spezifischen A_w -Kennwertes für ausgewählter Mauersteine und Putzmörtel. Die Werte in den Klammern entsprechen den verwendeten Koeffizienten.

Tabelle 32

Wasseraufnahmekoeffizient A_w ausgewählter Putzmörtel.

Quellen:

Jäger (2012, S. 27), Fischer et al. (2008, S. 381), Hohmann et al. (2004, S. 384), Lohmeyer (2001, S. 285)

Putzmörtel	Rohdichte ρ in [kg/m ³]	Wasseraufnahmekoeffizient A_w	
		in [kg/(m ² * h ^{0,5})]	in [kg/(m ² * min ^{0,5})]
Kalk-Zement-Putz	1.900	1 ... (1,8) ... 4	0,017 ... 0,067
Kalkputz	1.200	7	0,117
Faserleichtputz	900	0,5	0,008
Wärmedämmputz	600	3	0,050
Kunstharzoberputz	1.100	0,1	0,002

²³⁰ Die Aufsaugversuche zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten können etwa auf DIN EN 1015-18 oder DIN V 18550 basieren.

²³¹ Die Scherbenrohddichte ist zum Beispiel durch Tauchwägung bestimmbar.

Die Abgrenzung von Wertebereichen des Wasseraufnahmekoeffizienten dient der Klassifizierung (verbale Charakterisierung) des kapillaren Saugvermögens von Baustoffen (siehe Tabelle 25).

Wertebereich des Wasseraufnahmekoeffizient A_W in $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})]$	Verbale Charakterisierung
$A_W < 0,1$	wasserundurchlässig
$0,1 \leq A_W < 0,5$	wasserabweisend
$0,5 \leq A_W < 2,0$	wasserhemmend
$2,0 \leq A_W$	wasserdurchlässig, stark saugend

Tabelle 33

Wertebereiche des Wasseraufnahmekoeffizienten und deren verbale Charakterisierung

Quelle:

Fischer et al. (2008, S. 382)

Die DIN EN 998-1 klassifiziert die kapillare Wasseraufnahme c von Putzmörteln mit anorganischen Bindemitteln auf der Basis eines europäisch genormten Prüfverfahrens (DIN EN 1015-18) anhand eines dreistufigen Ansatzes. Die Klasse W 0 repräsentiert alle Putze, die keine Anforderungen im Hinblick auf die kapillare Wasseraufnahme erfüllen müssen. Eine Zuordnung in die Klasse W 1 erfolgt, wenn die kapillare Wasseraufnahme des Putzmörtel kleiner ist als $0,4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$. Putze mit einer kapillaren Wasseraufnahme von weniger als $0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ gehören zur Klasse W 2. Gleichwohl ist c nicht mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten A_W gleichzusetzen, der nach der in Deutschland anzuwendenden DIN V 18550, Anhang A, bestimmt und in der Einheit $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ angegeben wird.

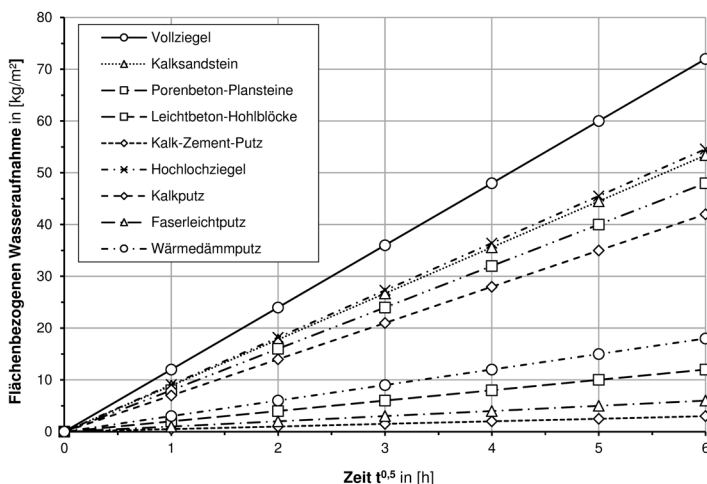
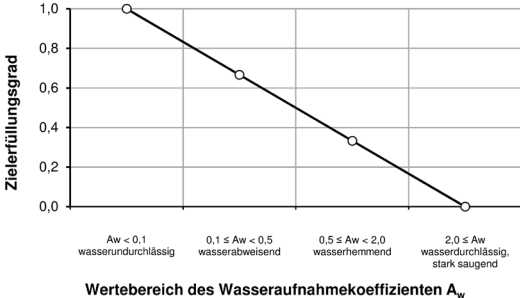


Bild 61

Grafische Darstellung des Wasseraufnahmekoeffizienten für untersuchungsrelevante Baustoffe

Tabelle 34
 Kennblatt für den Indikator
 Zeitabhängige Flüssigwasser-
 aufnahme

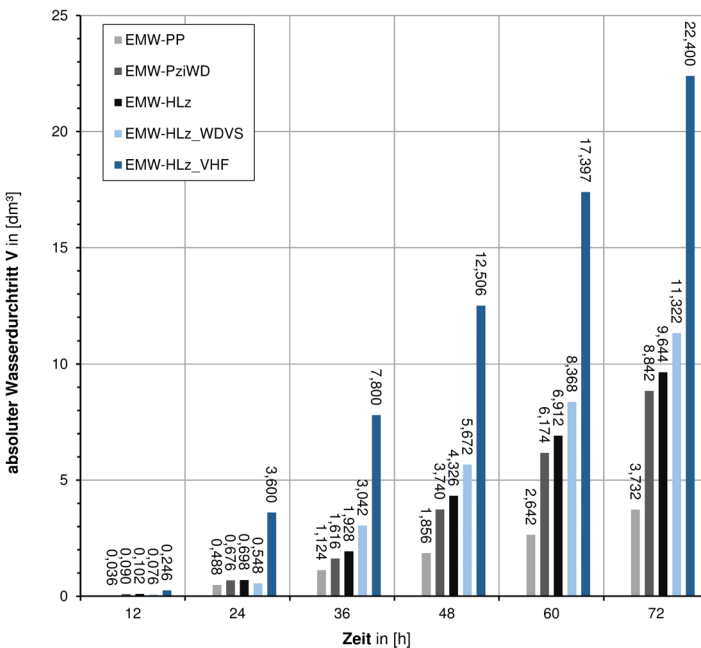
Indikator	Zeitabhängige Flüssigwasseraufnahme \sqrt{t} - Gesetz	
	Akronym	WaAuf
	Kategorie I	Bauphysikalische Kriterien
	Kategorie II	Wasseraufnahmeverhalten
Beschreibung	<p>Der Indikator quantifiziert, welche Wassermenge m_{Wasser} (in [kg]) ein poriger Baustoff über die Benetzungsfläche A (in [m²]) je Zeiteinheit t (in [h]) in sein Gefüge aufnehmen kann.²³² Mit zunehmender Eindringtiefe nimmt der viskose Fließwiderstand des Wassers zu. Daher erfolgt in der Regel die kapillare Wasseraufnahme poröser mineralischer Baustoffe linear mit der Wurzel der Zeit. Die funktionalen Zusammenhänge werden im Wasseraufnahmeexperiment untersucht, das für verschiedene Baustoffe entsprechend den unten stehenden Normen geregelt ist.²³³ Die Steigung dieser linearen Funktion entspricht dem Wasseraufnahmekoeffizienten A_w. Den funktionalen Zusammenhang stellt die nachfolgende Gleichung her:</p> $A_w = \frac{d^2 m_{liquid}}{dA * d\sqrt{t}}$ <p>Der Zahlenwert des Wasseraufnahmekoeffizienten dient unter anderem der Klassifizierung (siehe Tabelle 25) und dem Vergleich der kapillaren Saugfähigkeit verschiedener Baustoffe.</p>	
Funktion	 <p style="text-align: center;">Wertebereich des Wasseraufnahmekoeffizienten A_w</p>	
Literatur / Datenbasis	<p>Krus und Künzel (1995), Plagge et al. (2005), DIN EN ISO 15148 (Bau- und Dämmstoffe), DIN EN 771-11 (Ziegel, Betonwerksteine, Porenbeton, Naturstein), DIN EN 1015-18 (Putz, Sanierputz)</p>	

²³² Siehe auch Tabelle 22 auf Seite 151.

²³³ Zu beachten ist, dass die Prüfbedingungen und die Ergebnisse zum Teil unterschiedlich, das heißt nicht vergleichbar sind (Fischer et al. 2008, S. 381).

7.4.3 Wasserdurchlässigkeit

Den Ausführungen und Ergebnissen in Abschnitt 6.7 (Tabelle 19) auf Seite 124 folgend, gelangte während der ersten 72-stündigen Versuchsphase mit einseitiger Wasserbeanspruchung in Abhängigkeit der jeweiligen Mauerwerkskonstruktion ein bestimmtes Flüssigwasservolumen V [in dm^3] über die definierte Kontaktfläche $A = 0,2 \text{ m}^2$ durch den Querschnitt der Versuchskörper auf die Innenseite der Wandkonstruktion. Ursächlich ist die Druckdifferenz zwischen der Außen- und der Innenseite infolge unterschiedlicher Wasserstandshöhen. Aus den jeweils in einem zeitlichen Abstand von 12 Stunden gemessenen absoluten Wasservolumina V leitet sich der Volumenstrom Q [in cm^3/h] ab, der als Indikator für die Wasserdurchlässigkeit der Konstruktion fungiert (siehe Bild 62).²³⁴



²³⁴ Die durchströmte Querschnittsfläche A [in m^2] ist bei allen Untersuchungsgegenständen gleich groß ($A = 40 \text{ cm} \cdot 50 \text{ cm} = 2.000 \text{ cm}^2$). Die Messung der Wasservolumens V [in dm^3], welches durch den Querschnitt gelangte, erfolgte zeitdiskret aller 12 Stunden. Daraus ist der Volumenstrom Q [in cm^3/h] ableitbar. Die absoluten Zahlenwerte der Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit sind statistisch nicht hinreichend abgesichert, da die Anzahl der Versuchswiederholungen zu gering sind. Die Ergebnisse zeigen aber Tendenzen an.

Bild 62

Kumuliertes Wasservolumen V in [dm^3], das innerhalb der ersten 72 Stunden der Versuchsdurchführung durch den Querschnitt auf die Innenseite der Wandkonstruktion gelangt. Die wasserbeanspruchte Fläche der Probekörper beträgt 2.000 cm^2 .

EMW-Mz

Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln

EMW-Hbl_WDVS

Einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung

ZMW-KS_WZ

Zweischaliges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung

EMW-PP

Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen

EMW-PziWD

Einschaliges Mauerwerk aus Planhochlochziegeln mit integrierter Wärmedämmung

EMW-HLz_WDVS

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit außenliegender Wärmedämmung

EMW-HLz

Einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln

EMW-HLz_VHF

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade

Erkennbar ist, dass bei den untersuchten einschaligen Mauerwerkskonstruktionen aus traditionellen Vollziegeln (EMW-Mz) und aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung (EMW-Hbl_WDVS) sowie die zweischalige Mauerwerkskonstruktion aus Kalksandstein mit Kerndämmung (ZMW-KS_WZ) kein Wasser durch den Querschnitt auf die Innenseite der Wandkonstruktion gelangte. Die übrigen fünf Konstruktionsformen waren wasserdurchlässig, wobei insbesondere die Außenwandquerschnitte mit Hochlochziegeln ein nachteiliges Bauteilverhalten zeigten. Die Ursachen sind in Abschnitt 6.8 erläutert.

Tabelle 35
Kennblatt für den Indikator
Zeitabhängige Flüssigwasser-
aufnahme

Indikator	Volumenstrom																									
	Akronym	VoStro																								
	Kategorie I	Bauphysikalische Kriterien																								
	Kategorie II	Wasserdurchlässigkeit																								
Beschreibung	<p>Der Indikator misst und bewertet den Wasservolumenstrom Q [in cm^3/h], das heißt das Wasservolumen V, welches bei außenseitig hochwasserbeanspruchten Mauerwerkskonstruktionen durch die Schichtenfolgen auf die Innenseite gelangt. Die Messung erfolgte in diskreten Zeitabständen (12 Stunden), während der 72-stündigen ersten Versuchsphase. Die Querschnittsfläche A beträgt bei allen Probekörpern 2.000 cm^2. Der Feuchtegehalt der Baustoffe beeinflusst die Höhe des Volumenstroms, dessen Maximalwert daher in der Regel am Ende der Versuchsdauer lag. Auf der Grundlage dieses Maximalwertes des Volumenstroms basiert die Zuordnung des Zielerfüllungsgrades.</p>																									
Funktion	<table border="1"> <caption>Data points for the Zielerfüllungsgrad vs. Volumenstrom Q graph</caption> <thead> <tr> <th>Volumenstrom Q [in cm^3/h]</th> <th>Zielerfüllungsgrad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>≤ 50</td><td>0.9</td></tr> <tr><td>≤ 100</td><td>0.8</td></tr> <tr><td>≤ 150</td><td>0.7</td></tr> <tr><td>≤ 200</td><td>0.6</td></tr> <tr><td>≤ 250</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>≤ 300</td><td>0.4</td></tr> <tr><td>≤ 350</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>≤ 400</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>≤ 450</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>≥ 450</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>		Volumenstrom Q [in cm^3/h]	Zielerfüllungsgrad	0	1.0	≤ 50	0.9	≤ 100	0.8	≤ 150	0.7	≤ 200	0.6	≤ 250	0.5	≤ 300	0.4	≤ 350	0.3	≤ 400	0.2	≤ 450	0.1	≥ 450	0.0
Volumenstrom Q [in cm^3/h]	Zielerfüllungsgrad																									
0	1.0																									
≤ 50	0.9																									
≤ 100	0.8																									
≤ 150	0.7																									
≤ 200	0.6																									
≤ 250	0.5																									
≤ 300	0.4																									
≤ 350	0.3																									
≤ 400	0.2																									
≤ 450	0.1																									
≥ 450	0.0																									
Literatur / Datenbasis	Fischer et al. (2008)																									

7.4.4 Dimensionsstabilität

Die verschiedenen Mauersteine können aufgrund unterschiedlicher Effekte ihre Länge in alle drei Raumrichtungen verändern. Bild 63 zeigt, in Ergänzung zu den Ausführungen in Tabelle 22, Minima und Maxima potentieller Längenänderungen als Folge vier möglicher Ursachen.²³⁵ Eine dieser Ursachen ist die hygrische Dehnung, deren Minimal- und Maximalwerte maßgeblich vom Wassergehalt abhängen, ohne den Einfluss einer äußeren Last. Hygrisch bedingte, lastunabhängige Längenänderungen künstlicher Mauersteine infolge Quellen und Schwinden sind in der Regel weitgehend reversible positive beziehungsweise negative Dehnungen.²³⁶ Da die Feuchtedehnung etwa die Rissicherheit von Mauerwerkskonstruktionen oder die Scherspannungen an der Grenzfläche gefügter Materialien wesentlich bestimmt, ist die Beurteilung des Zusammenhangs zwischen Feuchtigkeitsgehalt und hygri-scher Dehnung bedeutend.

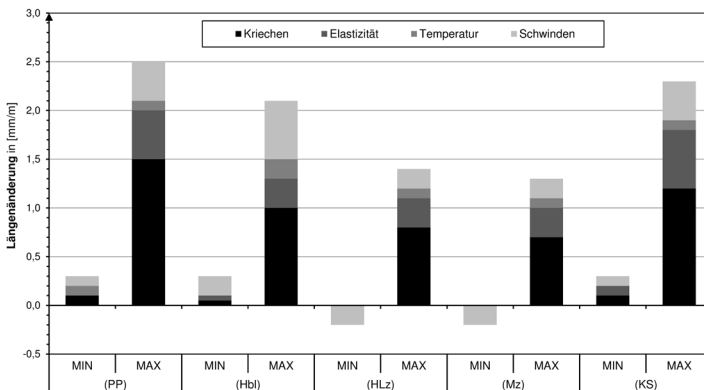


Bild 63

Minima und Maxima der Längenänderung für verschiedene Mauersteine als Folge vier möglicher Ursachen nach Fischer et al. (2012, S. 436). Positive Werte der Längenänderung entsprechen einer Verkürzung, negative Werte einer Verlängerung in [mm/m].

PP

Porenbeton-Planstein

Hbl

Leichtbeton-Hohlblock

HLz

Hochlochziegel

Mz

Vollziegel

KS

Kalksandstein

Für baupraktische Belange genügt in der Regel die Betrachtung eines eindimensionalen, linearen Schwindmaßes. Die Längenänderung Δl verhält sich demnach proportional zur Ausgangslänge l_0 . Die hygri-sche Dehnung ist über die Gleichung $\varepsilon_h = \Delta l/l_0$ beschreibbar. Bild 63 verdeutlicht zudem, dass die Mauersteine über ein stark unterschiedliches Feuchtedehnverhalten verfügen. Mauerziegel (Vollziegel

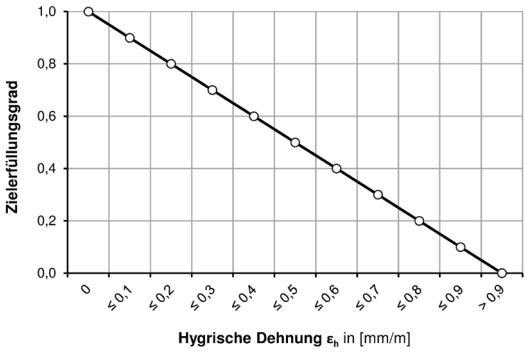
²³⁵ Vergleiche zum Beispiel Fischer et al. (2012, S. 436).

²³⁶ Vergleiche zum Beispiel Möller (2003). Siehe auch Tabelle 22 auf der Seite 151. Die Feststellung, dass ein Teil des Schwindens irreversibel ist, führt Czernin (1977) unter anderem darauf zurück, dass beim ersten Austrocknen neue Berührungsflächen zwischen den Partikeln zu neuen Bindungen führen, die nicht wieder aufgebrochen werden.

und Hochlochziegel) schwinden kaum und neigen zum Quellen. Kalksandsteine haben Endschwindmaße von bis zu 0,4 mm/m, Leichtbetonsteine von bis zu 0,6 mm/m und Porenbeton-Plansteine von bis zu 0,15 mm/m. Möller (1993) und Völkner (2003) ordnen den genannten Endschwindmaßen die Feuchtegehalte zu. Demnach sind für Porenbeton ab einem massenbezogenen Feuchtigkeitsgehalt von etwa 5 M.-%, für Kalksandstein ab etwa 3 M.-% und für Vollziegel ab etwa 0,5 M.-% die größten hygrischen Dehnungen zu erwarten.²³⁷

Tabelle 36

Kennblatt für den Indikator
Zeitabhängige Flüssigwasser-
aufnahme

Indikator	Hygrische Dehnung																									
	Akronym	HyDe																								
	Kategorie I	Bauphysikalische Kriterien																								
	Kategorie II	Dimensionsstabilität																								
Beschreibung	Der Indikator misst hygrisch bedingte Verformungen ε_h und dient somit der Beurteilung der Dimensionsstabilität künstlicher Mauersteine. Geringe Quell- und Schwindmaße führen zu einem hohen Zielerfüllungsgrad.																									
Funktion	 <table border="1" data-bbox="606 896 1135 1249"> <caption>Data points from the graph in the 'Funktion' cell</caption> <thead> <tr> <th>Hygrische Dehnung ε_h [mm/m]</th> <th>Zielerfüllungsgrad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>≤ 0,1</td><td>0,9</td></tr> <tr><td>≤ 0,2</td><td>0,8</td></tr> <tr><td>≤ 0,3</td><td>0,7</td></tr> <tr><td>≤ 0,4</td><td>0,6</td></tr> <tr><td>≤ 0,5</td><td>0,5</td></tr> <tr><td>≤ 0,6</td><td>0,4</td></tr> <tr><td>≤ 0,7</td><td>0,3</td></tr> <tr><td>≤ 0,8</td><td>0,2</td></tr> <tr><td>≤ 0,9</td><td>0,1</td></tr> <tr><td>-0,9</td><td>0,0</td></tr> </tbody> </table>		Hygrische Dehnung ε_h [mm/m]	Zielerfüllungsgrad	0	1.0	≤ 0,1	0,9	≤ 0,2	0,8	≤ 0,3	0,7	≤ 0,4	0,6	≤ 0,5	0,5	≤ 0,6	0,4	≤ 0,7	0,3	≤ 0,8	0,2	≤ 0,9	0,1	-0,9	0,0
Hygrische Dehnung ε_h [mm/m]	Zielerfüllungsgrad																									
0	1.0																									
≤ 0,1	0,9																									
≤ 0,2	0,8																									
≤ 0,3	0,7																									
≤ 0,4	0,6																									
≤ 0,5	0,5																									
≤ 0,6	0,4																									
≤ 0,7	0,3																									
≤ 0,8	0,2																									
≤ 0,9	0,1																									
-0,9	0,0																									
Literatur / Datenbasis	Möller (1993), ETHZ (2002), Völkner (2003)																									

²³⁷ Die größte hygrische Dehnung ε_h erfahren die genannten Baustoffe bei einer relativen Luftfeuchtigkeit φ_{Luft} von 95 %. Oberhalb dieser relativen Luftfeuchtigkeit und die Füllung von Poren im Feststoffgerüst mit einem Radius von mehr als 10^{-7} m führen in der Regel nicht zu einer weiteren Längenänderung.

7.4.5 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist ein baustoffspezifischer Kennwert.²³⁸ Bei üblichen kapillarporösen Baustoffen nimmt der λ -Wert unter anderem mit ansteigendem Feuchtegehalt zu.²³⁹ Die negativen energetischen Konsequenzen sind erhöhte Transmissionswärmeverluste durch das betroffene Bauteil. Ursächlich für die Zunahme des Wärmetransfers ist vereinfacht die vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit des in den Poren des Festkörpergerüsts vorhandenen Wassers.²⁴⁰ Zwischen der effektiven Wärmeleitfähigkeit und dem Wassergehalt eines Baustoffs besteht ein funktionaler Zusammenhang, welcher in einer Vielzahl empirischer Untersuchungen zum wärme- und feuchtetechnischen Verhalten von Bauteilen beschrieben ist.²⁴¹

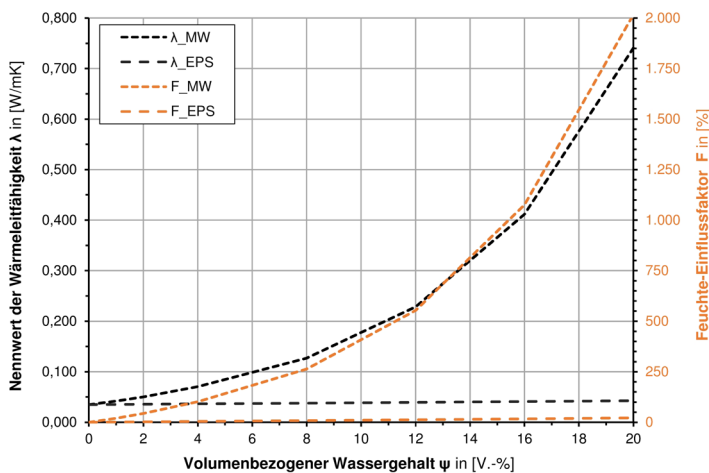


Bild 64

Einfluss des volumenbezogenen Feuchtegehalts ψ auf die Wärmeleitfähigkeit λ und den Feuchte-Einflussfaktor F für ausgewählter Dämmstoffe.

- EPS Dämmstoffplatte aus expandiertem Polystyrol Hartschaum
- MW Dämmstoffplatte aus mineralischen, kunstharzgebundenen Fasern (Steinwolle)

²³⁸ Die Wärmeleitfähigkeit ist definiert als Wärmestrom in Watt, der pro Zeiteinheit durch einen ein Meter dicken Stoff auf einer Fläche von einem Quadratmeter bei einem Temperaturgefälle von einem Kelvin hindurchgeht. Da die Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffs von der Temperatur und von seinem Feuchtegehalt abhängt, bezieht sich die angegebene Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,dry}$ in den Technischen Informationen der Produkthersteller stets auf eine Mitteltemperatur von 10 °C und einen trockenen Zustand. Dieser Bezug dient der besseren Vergleichbarkeit.

²³⁹ Eine fundierte Zusammenstellung aller Einflüsse auf die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen enthält Cammerer (1995).

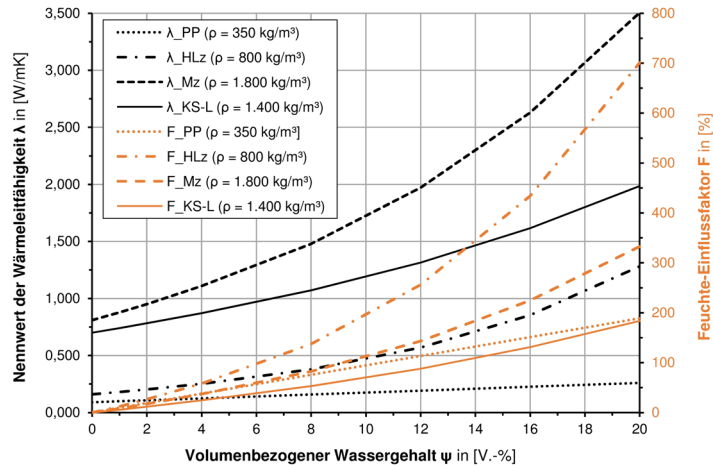
²⁴⁰ Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser λ_{H_2O} beträgt 0,5984 W/(m*K) (20 °C, 0,1 MPa). Sie ist somit etwa um den Faktor 25 größer als die Wärmeleitfähigkeit von Luft.

²⁴¹ Vergleiche zum Beispiel Künzel (1994). Normative Regelungen für numerische Simulationen enthält zum Beispiel DIN EN 15026.

Bild 65

Einfluss des volumenbezogenen Feuchtegehalts ψ auf die Wärmeleitfähigkeit λ und den Feuchte-Einflussfaktor F ausgewählter Mauersteine.

Mz Vollziegel
 PP Porenbeton-Planstein
 HLz Hochlochziegel
 KS-L Kalksand-Lochstein



Als quantitativ bestimmbarer Indikator zur Bewertung des Kriteriums fungiert der „Feuchte-Einflussfaktor F “, der zeitabhängig die Änderung der Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs $\lambda_{u,\psi}$ bezogen auf die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffs $\lambda_{10,dry}$ beschreibt.²⁴² Der Feuchte-Einflussfaktor kennzeichnet folglich die Wirkung der Feuchte auf die Wärmeleitung. Die Bestimmung des Indikators basiert auf der Gleichung:

Gleichung 13

$$F = \frac{\lambda_{u,\psi} - \lambda_{10,dry}}{\lambda_{10,dry}} * 100\%$$

mit:

F Feuchte-Einflussfaktor in [%]
 $\lambda_{u,\psi}$ Wärmeleitfähigkeit in [W/(m*K)] als Funktion des masse- oder volumenbezogenen Feuchtegehalts
 $\lambda_{10,dry}$ Wärmeleitfähigkeit in [W/(m*K)] des darrtrockenen Baustoffe bei einer Temperatur von 10 °C

Einen Ansatz für die Bestimmung des Feuchteinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit enthält DIN EN ISO 10456.²⁴³ Demnach ist die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{u,\psi}$ von der massen- oder volumenbezogenen Baustofffeuchte abhängig. Den Zusammenhang erfasst die Gleichung:

Gleichung 14

$$\lambda_{u,\psi} = \lambda_{10,dry} * F_m$$

²⁴² Vergleiche zum Beispiel Gertis und Holm (2014a), Gertis und Holm (2014b)

²⁴³ Vergleiche zum Beispiel Pfeiffer et al. (2001)

Dabei wird die bei einer Lufttemperatur von 10 °C bestimmte Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,dry}$ eines trockenen Baustoffes durch einen Korrekturfaktor F_m an die jeweilige Baustofffeuchte angepasst. Der Korrekturfaktor F_m ist nach Gleichung

$$F_m = e^{f_u \cdot (u_2 - u_1)}$$

Gleichung 15

beziehungsweise

$$F_m = e^{f_\psi \cdot (\psi_2 - \psi_1)}$$

Gleichung 16

bestimmbar. Dieser hängt wiederum von einem Umrechnungsfaktor $f_{u,\psi}$ sowie dem praktischen Feuchtegehalt (Gleichgewichtsfeuchtegehalt) u beziehungsweise ψ des Baustoffes nach DIN 4108-4 (Tabelle 3) oder DIN EN 12524 ab. Für die baustoffspezifischen Umrechnungsfaktoren F_m siehe auch Hohmann et al. (2004, S. 382).

Baustoff	Rohdichte ρ in [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ_{dry} in [W/(m*K)]	Feuchtebedingte Zunahme der Wärmeleitfähigkeit in [%/M.-%]
Kunsthazoberputz	1.100	0,700	0
Kalk-Zement-Putz	1.900	0,800	8
Kalkputz	1.600	0,700	8
Faserleichtputz	900	0,380	8
Wärmedämmputz	600	0,070	8
Vollziegel	1.800	0,600	15
Hochlochziegel	600	0,120	10
Porenbeton	400	0,100	3,7
Leichtbeton	700	0,320	8
Kalksandstein	1.900	1,000	8

Tabelle 37

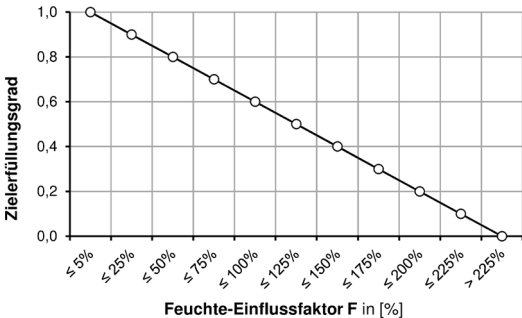
Feuchtebedingte Zunahme der Wärmeleitfähigkeit

Quelle:
Hohmann et al. (2004,
S. 384)

Künzel (1985) beschreibt den Zusammenhang zwischen der feuchtebedingten Zunahme der Wärmeleitfähigkeit poröser Mauersteine und ihrem für die Wärmedämmeigenschaften wirksamen Hohlraumanteil. Der Autor verdeutlicht, dass der Wassergehalt im Diffusionsfeuchtebereich einen geringeren Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit von Mauersteinen mit kleiner Steinrohichte und großem Lochflächenanteil ausübt, wie etwa Hochlochziegel, als auf massive Steinen mit hoher Rohdichte, wie etwa Vollziegel oder Kalksandvollziegel. Er

argumentiert, dass bei den klimatischen Randbedingungen ($\vartheta_{Luft} = 23 \text{ °C}$, $\varphi_{Luft} = 80 \%$) im Wesentlichen noch kein kapillarer Feuchtetransport vorliegt und die somit der Lochflächenanteil der Mauersteine hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit weitgehend wirksam bleibt und unabhängig von Feuchtegehalt der Feststoffmatrix ist. Im Verlauf der Laboruntersuchungen wurde deutlich, dass sich aufgrund der intensiven hygrischen Beanspruchung die Hohlräume der häufig eingesetzten Lochziegel vollständig mit Wasser füllten. Daraus ist ableitbar, dass von einer weiteren Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit auszugehen ist.

Tabelle 38
Kennblatt für den Indikator
Feuchte-Einflussfaktor

Indikator	Feuchte-Einflussfaktor																									
	Akronym	FEF																								
	Kategorie I	Bauphysikalische Kriterien																								
	Kategorie II	Wärmeleitfähigkeit																								
Beschreibung	<p>Der Feuchte-Einflussfaktor F kennzeichnet die Wirkung erhöhter Feuchtegehalte auf die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{u,\psi}$ von Baustoffen. Der Faktor wird mit der Gleichung 13 ermittelt. $\lambda_{10,dry}$ entspricht der Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffs nach Tabelle 28. $\lambda_{u,\psi}$ basiert auf baustoffbezogenen Analysen, die den Zusammenhang zwischen masse- beziehungsweise volumenbezogenen Feuchtegehalten und Wärmeleitfähigkeit herstellen. Diese Zusammenhänge für untersuchungsrelevante Baustoffe zeigen die Diagramme in Bild 64 und Bild 65. Die vor und nach den Versuchen ermittelten Feuchtegehalte in den Baustoffen bilden die Eingangsgrößen zur Bestimmung der jeweils zugehörigen Wärmeleitfähigkeit, die anschließend in die genannte Formel für die Bestimmung des Feuchte-Einflussfaktors einfließen.</p>																									
Funktion	 <table border="1"> <caption>Data points for the graph in the 'Funktion' row</caption> <thead> <tr> <th>Feuchte-Einflussfaktor F in [%]</th> <th>Zielerfüllungsgrad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>≤ 5%</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>≤ 25%</td><td>0.9</td></tr> <tr><td>≤ 50%</td><td>0.8</td></tr> <tr><td>≤ 75%</td><td>0.7</td></tr> <tr><td>≤ 100%</td><td>0.6</td></tr> <tr><td>≤ 125%</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>≤ 150%</td><td>0.4</td></tr> <tr><td>≤ 175%</td><td>0.3</td></tr> <tr><td>≤ 200%</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>≤ 225%</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>> 225%</td><td>0.0</td></tr> </tbody> </table>		Feuchte-Einflussfaktor F in [%]	Zielerfüllungsgrad	≤ 5%	1.0	≤ 25%	0.9	≤ 50%	0.8	≤ 75%	0.7	≤ 100%	0.6	≤ 125%	0.5	≤ 150%	0.4	≤ 175%	0.3	≤ 200%	0.2	≤ 225%	0.1	> 225%	0.0
Feuchte-Einflussfaktor F in [%]	Zielerfüllungsgrad																									
≤ 5%	1.0																									
≤ 25%	0.9																									
≤ 50%	0.8																									
≤ 75%	0.7																									
≤ 100%	0.6																									
≤ 125%	0.5																									
≤ 150%	0.4																									
≤ 175%	0.3																									
≤ 200%	0.2																									
≤ 225%	0.1																									
> 225%	0.0																									
Literatur / Datenbasis	Gertis und Holm (2014a), Gertis und Holm (2014b)																									

7.4.6 Trocknungsverhalten

Scheffler und Plagge (2009) beschreiben die Trocknung als dreidimensionales Wärme- und Feuchtetransportproblem, da sich aufgrund der Verdunstungskühlung die Temperatur- und damit auch die Feuchtetransportverhältnisse räumlich ändern. Weiterhin führen die Autoren aus, dass das Trocknungsverhalten poröser Baustoffe allgemein beeinflusst wird von

- den Materialeigenschaften (Feuchtespeicherung und Feuchtetransport),
- den klimatischen Verhältnissen (Temperatur und Luftfeuchte) sowie
- von den Übergangsbedingungen an der Trocknungs-oberfläche (Luftgeschwindigkeit, Oberflächenrauigkeit).

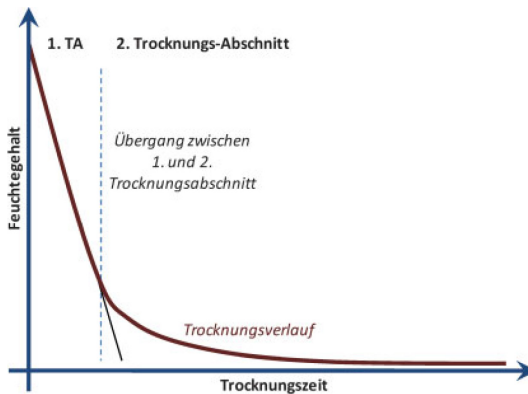


Bild 66

Allgemeiner Trocknungsverlauf poröser Baustoffe nach Scheffler und Plagge (2007).

Die baustoffspezifischen Feuchtetransporteigenschaften bestimmen maßgeblich das Trocknungsverhalten. Die Transporteigenschaften bedingen, wie schnell und in welcher Form Wasser an die Oberfläche geleitet wird. Die Randbedingungen als Zusammenfassung der Klima- und Übergangsbedingungen andererseits bestimmen, wieviel Feuchtigkeit an die Umgebung abgegeben werden kann.

Im Allgemeinen ist der Flüssigtransport sehr viel leistungsfähiger als der Dampftransport, weshalb ein Baustoff mit einer hohen Flüssigwasserleitfähigkeit um einiges schneller austrocknen wird als ein Baustoff mit geringer Leitfähigkeit.²⁴⁴

²⁴⁴ Vergleiche Scheffler und Plagge (2005)

Bild 66 stellt den allgemeinen Trocknungsverlauf poröser Baustoffe dar. Scheffler und Plagge (2005) erklären, dass der Verlauf des ersten Trocknungsabschnittes durch eine weitgehend lineare Abnahme des Feuchtegehaltes über der Zeit gekennzeichnet ist. Aufgrund der hohen Flüssigwasserleitfähigkeit des Baustoffs kann mehr Wasser an die Oberfläche transportiert werden, als dort verdunsten kann. Im Wesentlichen limitieren in diesem Abschnitt die Rand- und Übergangsbedingungen die Trocknungsrate und nicht die Materialeigenschaften.

Im zweiten Trocknungsabschnitt kehrt sich dieser Effekt um. Aufgrund des mit abnehmendem Feuchtegehalt auch geringer werdenden Feuchtetransportes im Material kann ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr so viel Feuchtigkeit an die Verdunstungsebene transportiert werden, wie dort infolge der Randbedingungen abgegeben werden könnte. Die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt ab, der erste geht in den zweiten Trocknungsabschnitt über. Die Materialeigenschaften bestimmen maßgeblich den weiteren Trocknungsverlauf.

Bild 67

Trocknungsverlauf ausgewählter poröser Baustoffe nach Scheffler und Plagge (2005).

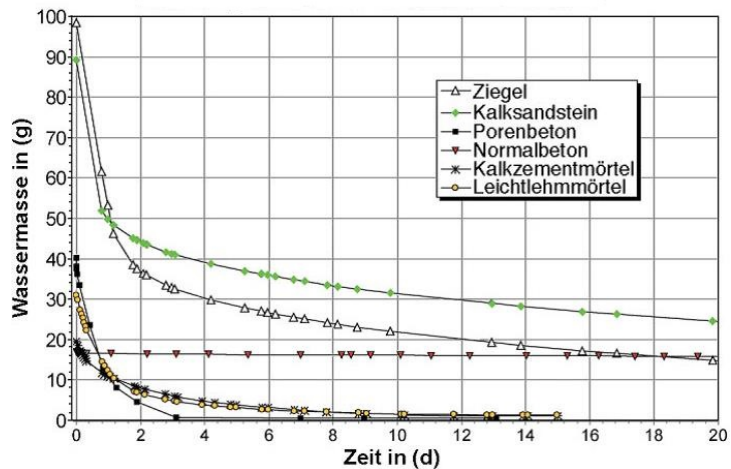


Bild 67 enthält Informationen zum Trocknungsverlauf ausgewählter poröser Baustoffe.²⁴⁵ Aufgrund seiner geringen Flüssigwasserleitfähigkeit verfügt zum Beispiel Beton über einen sehr kurzen ersten Trocknungsabschnitt. Es dauert jedoch Monate, bis er vollständig ausgetrocknet ist.

²⁴⁵ Vergleiche Scheffler und Plagge (2005)

Baustoff	Ziegel	Porenbeton	Leichtbeton	Kalksandstein
Trocknungskoeffizient D in [\sqrt{d}/m]	107	105	183	268

Für die Quantifizierungen des Trocknungsverhaltens fungiert ein Indikator, der als Einzahlen-Kennwert ein Maß für die Trocknungsgeschwindigkeit eines wassergesättigten Baustoffes darstellt (siehe Tabelle 28). Der so bezeichnete Trocknungskoeffizient D basiert auf einem Ansatz von Scheffler und Plagge (2009), der es ermöglicht, den Trocknungsverlauf verschiedener Mauerwerksbaustoffe vergleichen und beurteilen zu können.²⁴⁶

Tabelle 39
Trocknungskoeffizient D verschiedener Mauerwerksbaustoffe nach Scheffler und Plagge (2009)

Indikator	Trocknungskoeffizient	
	Akronym	TrKoeff
	Kategorie I	Trocknungsverhalten
	Kategorie II	Bauphysikalische Kriterien
Beschreibung	Einen Ansatz für die vergleichende Beurteilung des Trocknungsverhaltens von Baustoffen beschreiben Scheffler und Plagge (2009). Auf dieser Grundlage leiten die Autoren den Trocknungskoeffizienten D als einen einfachen Materialkennwert ab. Dieser Kennwert fungiert nachfolgend als Indikator für die Quantifizierung des Trocknungsverhaltens.	
Funktion		
Literatur / Datenbasis	Scheffler und Plagge (2005), Scheffler und Plagge (2009)	

Tabelle 40
Kennblatt für den Indikator Trocknungskoeffizient

²⁴⁶ Einem anderen vereinfachten Ansatz folgend, ist die Austrocknungszeit (in Tagen) für Vergleichszwecke nach Roger Cadiergues näherungsweise mit der Formel $t = s * d^2$ abschätzbar. Hierin ist: d = Wanddicke in cm, s = Baustoffkenngröße in Tagen/cm². Typische Werte für den baustoffspezifischen Parameter s enthält zum Beispiel in Wienerberger (2012).

7.5 Kriterien der Bauweise

7.5.1 Übersicht

Tabelle 41

Kriterien der Bauweise für die Bewertung der Schadensanfälligkeit gegenüber Hochwasserbeanspruchung.

Im Gegensatz zu den Kriterien der anderen Gruppen besteht zwischen dem hier bewerteten Kriterium der Erreichbarkeit beziehungsweise der Demontierbarkeit von Konstruktionselementen und dem Wassergehalt der Elemente der Schichtenfolge kein direkter Bezug (siehe Tabelle 28). Die Bauweise, das heißt die Anordnung, das Fügen und Verbinden von Konstruktionselementen, beeinflusst jedoch den Aufwand für bauliche Wiederherstellungsleistungen und somit indirekt die Schadensanfälligkeit von Außenwänden bei Hochwasserbeanspruchung.

Kriterium	Akronym	Beschreibung
Erreichbarkeit Demontierbarkeit	EuD	<p>Für die Trocknung feuchtebelasteter beziehungsweise den Austausch feuchtegeschädigter Baustoffe ist deren Erreichbarkeit und Zugänglichkeit im bautypischen Einbauzustand von erheblicher Relevanz. Um etwa die zügige Trocknung feuchtebelasteter Konstruktionen zu ermöglichen, sind in Abhängigkeit der betroffenen Schichtenfolgen gegebenenfalls umfangreiche und komplexe Demontagemaßnahmen notwendig, wie zum Beispiel das Entfernen verschiedenartiger Wandbekleidungen. Gleiches gilt für den Austausch feuchtegeschädigter Baustoffe.</p> <p>Der Begriff Demontierbarkeit umfasst in diesem Kontext die einfache, eindeutige und sichere Trennung mehrteiliger beziehungsweise mehrschichtiger Konstruktionen. Als Grundsätze einer demontagerechten Gestaltung von Bauteilen („Design for Disassembly“) gelten hierbei, (i) die Minimierung der verwendeten Werkstoffe, (ii) die Reduzierung und Vereinheitlichung der Füge- und Verbindungsstellen sowie (iii) die Verwendung einfach lösbarer Verbindungsmittel, deren Funktionsfähigkeit über eine definierte Nutzungsdauer erhalten bleibt.²⁴⁷</p> <p>Aus diesen Grundsätzen leiten sich zwei Indikatoren für die Bewertung des Kriteriums ab: (i) ein direkt messbarer Indikator, welcher die Anzahl n der verwendeten Baustoffe in der Schichtenfolge und somit auch die Anzahl m der Füge- und Verbindungsstellen ($m = n - 1$) berücksichtigt sowie (ii) ein qualitativ beschreibbarer Indikator, der den Zusammenhang zwischen der Art der Verbindungsmittel und deren Lösbarkeit herstellt.</p>
Optische Beeinträchtigungen	opBe	<p>Das Kriterium bewertet den Grad der optischen Abweichungen, die nach einem Überflutungsereignis auf den sichtbaren Bauteiloberflächen zu erwarten sind. Das Kriterium umfasst den baulichen Aufwand zur Herstellung einer optisch einwandfreien Oberfläche. Die Bewertung basiert auf einer von Oswald (2000) entwickelten Matrix zur Hinnehmbarkeit optischer Mängel. Als Indikatoren fungieren (i) Verschmutzung, (ii) Farbabweichung und (iii) Ausblühungen. Das Kriterium bleibt in dieser Arbeit bei der Bewertung der Schadensanfälligkeit zunächst unberücksichtigt.</p>

²⁴⁷ Vergleiche zum Beispiel Jäger et al. (2013)

7.5.2 Erreichbarkeit und Demontierbarkeit

Das Kriterium Erreichbarkeit und Demontierbarkeit wird mit Hilfe der Indikatoren (i) Anzahl der verwendeten Baustoffe (Anzahl der Füge- und Verbindungsstellen) sowie (ii) Art der Verbindungsmittel bewertet.

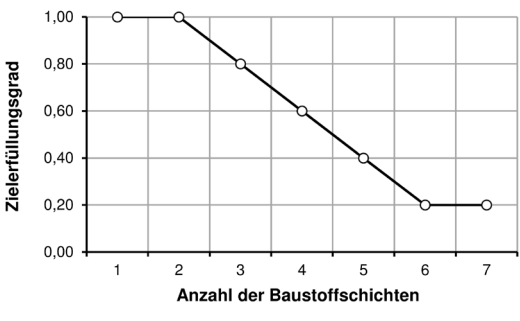
Indikator	Anzahl der verwendeten Baustoffe, Füge- und Verbindungsstellen in der Schichtenfolge																	
	Akronym	AnzBau																
	Kategorie I	Bauweise																
	Kategorie II	Erreichbarkeit und Demontierbarkeit																
Beschreibung	<p>Der Indikator misst die Anzahl n der verwendeten Baustoffe über den Querschnitt der Schichtenfolge. Je höher die Anzahl der Materialfolgen ist, desto schwieriger ist in der Regel die Erreichbarkeit und Demontierbarkeit einzelner Baustoffe. Die Anzahl m der Füge- und Verbindungsstellen ist von der Anzahl n der Baustoffe abhängig und beträgt in den überwiegenden Fällen $m = n - 1$.</p> <p>Ist ein Bauteil aus mehr als drei Schichten gefügt, wird mindestens ein Baustoff eingeschlossen, so dass die Demontage einer Schicht erforderlich sein kann, um den darunterliegenden Baustoff zu erreichen.</p>																	
Funktion	 <table border="1"> <caption>Data for Zielerfüllungsgrad vs Anzahl der Baustoffschichten</caption> <thead> <tr> <th>Anzahl der Baustoffschichten</th> <th>Zielerfüllungsgrad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1,00</td></tr> <tr><td>2</td><td>1,00</td></tr> <tr><td>3</td><td>0,80</td></tr> <tr><td>4</td><td>0,60</td></tr> <tr><td>5</td><td>0,40</td></tr> <tr><td>6</td><td>0,20</td></tr> <tr><td>7</td><td>0,20</td></tr> </tbody> </table>		Anzahl der Baustoffschichten	Zielerfüllungsgrad	1	1,00	2	1,00	3	0,80	4	0,60	5	0,40	6	0,20	7	0,20
Anzahl der Baustoffschichten	Zielerfüllungsgrad																	
1	1,00																	
2	1,00																	
3	0,80																	
4	0,60																	
5	0,40																	
6	0,20																	
7	0,20																	
Literatur / Datenbasis	Jäger et al. (2013)																	

Tabelle 42

Kennblatt für den Indikator Anzahl der verwendeten Baustoffe

Tabelle 43

Kennblatt für den Indikator
Art der Verbindungsmittel

Indikator	Art der Verbindungsmittel																							
	Akronym	VerArt																						
	Kategorie I	Bauweise																						
	Kategorie II	Erreichbarkeit und Demontierbarkeit																						
Beschreibung	<p>Der Indikator identifiziert die Art der Verbindung und charakterisiert den Aufwand, um sie zu Lösen. Grundsätzlich können Verbindungen lösbar oder nicht lösbar ausgeführt sein. Zu den lösbaren Verbindungen mit Relevanz im Bauingenieurwesen zählen insbesondere Schraubverbindungen, Nut-Feder-Verbindungen und Schwalbenschwanzverbindungen, Verbindungsbeschläge und Passverzahnungen. Die nicht lösbaren Verbindungen umfassen zum Beispiel die stoffschlüssigen Niet-, Schweiß- und Lötverbindungen sowie Klebungen.</p>																							
Funktion	<table border="1"> <caption>Zielerfüllungsgrad nach Art der Verbindungsmittel</caption> <thead> <tr> <th>Art der Verbindungsmittel</th> <th>Zielerfüllungsgrad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Schraubverbindungen</td> <td>1,00</td> </tr> <tr> <td>Nut-Feder-Verbindungen</td> <td>0,80</td> </tr> <tr> <td>Schwalbenschwanzverbindungen</td> <td>0,80</td> </tr> <tr> <td>Verbindungsbeschläge</td> <td>0,80</td> </tr> <tr> <td>Passverzahnungen</td> <td>0,80</td> </tr> <tr> <td>Nagelverbindungen</td> <td>0,40</td> </tr> <tr> <td>Klebeverbindungen</td> <td>0,40</td> </tr> <tr> <td>Nietverbindungen</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td>Lötverbindungen</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td>Schweißverbindungen</td> <td>0,00</td> </tr> </tbody> </table>		Art der Verbindungsmittel	Zielerfüllungsgrad	Schraubverbindungen	1,00	Nut-Feder-Verbindungen	0,80	Schwalbenschwanzverbindungen	0,80	Verbindungsbeschläge	0,80	Passverzahnungen	0,80	Nagelverbindungen	0,40	Klebeverbindungen	0,40	Nietverbindungen	0,00	Lötverbindungen	0,00	Schweißverbindungen	0,00
Art der Verbindungsmittel	Zielerfüllungsgrad																							
Schraubverbindungen	1,00																							
Nut-Feder-Verbindungen	0,80																							
Schwalbenschwanzverbindungen	0,80																							
Verbindungsbeschläge	0,80																							
Passverzahnungen	0,80																							
Nagelverbindungen	0,40																							
Klebeverbindungen	0,40																							
Nietverbindungen	0,00																							
Lötverbindungen	0,00																							
Schweißverbindungen	0,00																							
Literatur / Datenbasis	Jäger et al. (2013)																							

7.6 Dauerhaftigkeit

7.6.1 Übersicht

Die Dauerhaftigkeit von Bauteilen wird in der Literatur als deren genügende Beständigkeit gegenüber Betriebs- und Umwelteinwirkungen innerhalb der vorgesehenen Nutzungsdauer bei ausreichender Wartung und Instandhaltung beschrieben.²⁴⁸ Hochwasser zählt zu den intensivsten äußeren Umwelteinwirkungen, welche die Dauerhaftigkeit exponierter Konstruktionen erheblich beeinträchtigen können. Die Beurteilung der Dauerhaftigkeit, das heißt die Widerstandsfähigkeit von Bauteilen gegenüber dieser äußeren Einwirkung, basiert nicht auf einem einheitlichen Mess- oder Kennwert, sondern auf der Quantifizierung verschiedener Kriterien. Diese Bewertungskriterien sind stets baustoffbezogen und orientieren sich zudem an der Funktion und der Beanspruchung des jeweiligen Bauteils.²⁴⁹

Als Folge eines Hochwassers und der Einlagerung erhöhter Wassermengen in das Baustoffgefüge können verschiedenartige Korrosionsprozesse ausgelöst werden, welche die Dauerhaftigkeit eines Bauteils nachteilig mindern. Hierzu zählen unter anderem biologische und elektrochemische Korrosionsvorgänge, die in der nachstehenden Tabelle 29 sowie in den Abschnitten 7.6.2 und 7.6.3 erläutert sind.

Tabelle 44

Kriterien für die Bewertung der Dauerhaftigkeit hochwasserbeanspruchter Mauerwerkskonstruktionen.

Kriterium	Akronym	Beschreibung
Mikrobieller Befall und mikrobiell induzierte Korrosion (MIC)	MiBe	Das Kriterium beinhaltet den sichtbaren Befall der Bauteiloberfläche beziehungsweise des verdeckten Befall des Bauteilinneren durch Mikroorganismen (Pilze, Bakterien) als Folge eines Hochwasserereignisses. Der mikrobielle Befall kann zu einer biogenen Belastung betroffener Bauteile führen, welche über die vor dem Hochwasserereignis üblicherweise vorhandene Hintergrundbelastung hinausgeht. Das Kriterium dient zur Bewertung der (i) Gefahr mikrobiellen Wachstums sowie der (ii) Widerstandsfähigkeit des Bauteils und seiner Komponenten gegenüber der Zerstörung durch Stoffwechselprodukte von Mikroorganismen. Zu den wesentlichen wachstumsfördernden Faktoren für Mikroorganismen zählen, neben den hygrothermischen Bedingungen, das heißt der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit auf der Bauteiloberfläche, eines geeigneten <i>pH</i> -Werts sowie einer adhäsiven und hydrophilen Oberflächenstruktur, vor allem die vorhandene Nährstoffkonzentration. ²⁵⁰

²⁴⁸ Vergleiche zum Beispiel Stark und Wicht (2013)

²⁴⁹ Eine Aufzählung von Kriterien für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen enthält Stark und Wicht (2013, S. 5 ff).

²⁵⁰ Vergleiche zum Beispiel Bagda (2000), Sedlbauer (2001, S. 21), Krus et al. (2014)

Kriterium	Akronym	Beschreibung
Fortsetzung		<p>Insbesondere auf raumseitigen Bauteiloberflächen aus leicht verwertbarem, organischem Substrat, welches nach einer Überflutung noch nicht hinreichend ausgetrocknet ist und folglich über erhöhte Feuchtegehalte verfügt, besteht eine grundsätzlich erhöhte Wahrscheinlichkeit für den mikrobiellen Befall.</p> <p>Erhöhte Feuchtegehalte beeinflussen zudem die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen negativ und begünstigen somit die Unterschreitung der Taupunkttemperatur an Bauteiloberflächen. Infolge dessen nimmt die Oberflächenfeuchtigkeit durch Bildung von Kondensat weiter zu, die das Wachstum von Algen und Schimmelpilzen fördert. Neben gesundheitlichen Aspekten für die Gebäudenutzer (Hygiene, Toxikologie, Allergien)²⁵¹ sind im Zusammenhang mit dem mikrobiellen Befall insbesondere Schadensprozesse bedeutsam, bei denen Baustoffe durch Stoffwechselumsetzungen korrosiv, das heißt chemisch, angegriffen oder mechanisch-physikalisch verändert werden.²⁵² Grundsätzlich besteht für die Mehrzahl aller Baustoffe (zum Beispiel mineralische Baustoffe, Kunststoffe, Metalle) die Gefahr der mikrobiell induzierten Korrosion. Biofilme binden Wasser und (hygroskopische) Salze und können zum Beispiel an Mauerwerksoberflächen zur Gefügezerstörung führen. Ein Berechnungsverfahren für die Prognose und Bewertung des Schimmelpilzwachstumsrisikos enthält zum Beispiel WTA (2006).</p> <p>Als Indikator für den mikrobiellen Befall, das heißt für die Sporenauskeimung und das sichtbare Myzelwachstum, fungiert in dieser Untersuchung insbesondere die Substratgüte.²⁵³</p>
Elektrolytische (Metall-)Korrosion	Kor	<p>Das Kriterium umfasst in diesem Kontext die elektrochemische Sauerstoffkorrosion²⁵⁴ von Eisenmetallen, welche die Dauerhaftigkeit von Bauteilen nachweislich stark begrenzen können. Kaesche (2011) bezeichnet in Anlehnung an die DIN EN ISO 8044:1999-11 Korrosion als die von der Oberfläche ausgehende messbare Veränderung (Korrosionserscheinung), das heißt Auflösung beziehungsweise Umwandlung metallischer Bauteile infolge elektrochemischer Reaktionen des Metalls mit Bestandteilen der Umgebung. Die Folgen der Veränderung können die Funktion des Bauteils oder des gesamten Systems erheblich beeinträchtigen (Korrosionsschaden). Nach Völkner (2003) ist zu beachten, dass Korrosionserscheinungen zunächst nicht mit Korrosionsschäden gleichzusetzen sind. Erst wenn die Korrosionserscheinung einen tolerierbaren Grenzwert</p>

²⁵¹ Vergleiche zum Beispiel Sedlbauer (2001, S. 12 ff.)

²⁵² Der skizzierte Zerstörungsprozess der Baustoffmatrix wird auch als „Bikorrosion“ oder mikrobielle Korrosion bezeichnet.

²⁵³ Das Vorhandensein ausreichender Feuchtigkeit gilt als vorausgesetzt.

²⁵⁴ Kaesche (2011) verwendet den Begriff „elektrolytische Korrosion“ anstelle „elektrochemischer Korrosion“. Er argumentiert, dass die Korrosion an der Phasengrenze Metall – Elektrolytlösung (Flüssigkeit, die in Anionen und Kationen dissoziierte Substanzen gelöst enthält) mit diesem Begriff deutlicher beschrieben werden.

Kriterium	Akronym	Beschreibung
Fortsetzung		<p>überschreitet und dadurch die Funktion eines Bauteils beeinträchtigt, spricht Völkner (2003) von einem Korrosionsschaden. Voraussetzungen für die baupraktisch relevante Sauerstoff-Korrosion sind (i) eine wässrige Elektrolytlösung mit gelöstem Luftsauerstoff und (ii) dass das Metall-Redoxpaar ein geringeres Redoxpotential unter Standardbedingungen besitzt als das Oxidationsmittel (hier Sauerstoff).²⁵⁵ Effekte infolge Kontaktkorrosion oder spannungsinduzierter Korrosion werden hier nicht weiter untersucht.²⁵⁶ Der Korrosionsprozess wird stets von den Eigenschaften des Systems Metall/Elektrolyt bestimmt. Weiterhin sind die Temperatur und der <i>pH</i>-Wert für den Korrosionsprozess bedeutsam. Die Korrosionsgeschwindigkeit zum Beispiel von Eisen erhöht sich im Winter gegenüber dem Sommer etwa um den Faktor drei. Der Indikator misst daher die Differenz zwischen dem Redoxpotential des Oxidationsmittels und des metallischen Werkstoffs. Die Potentialdifferenz korreliert positiv linear mit der Höhe korrosionsfördernder Triebkräfte. Wenn die Potentialdifferenz (Potentialsprung) größer als Null ist, dann läuft ein Redoxprozess ab, gleichwohl bei kleinen positiven Potentialdifferenzen die korrosionsauslösenden Triebkräfte noch gering sind. Beispiel: Das unedle Metall Eisen (Reduktionsmittel $Fe \leftrightarrow$ Oxidationsmittel $Fe^{2+} + 2e^-$) verfügt, gemäß elektrochemischer Spannungsreihe, über ein Standardpotential von $E_{Anode} = -0,447$ V. In Wasser gelöster Sauerstoff (neutrale oder alkalische Elektrolytlösung, <i>pH</i>-Wert ≥ 7) hat hingegen ein Standardpotential von $E_{Kathode} = 0,401$ V. Die Potentialdifferenz ergibt sich aus $0,401$ V - $(-0,447$ V) = $0,808$ V > 0, das heißt eine Reaktion läuft ab. Wenn der <i>pH</i>-Wert der Elektrolytlösung kleiner als 7 ist, nimmt ihr Standardpotential zu ($E_{Kathode} = 1,23$ V). Aufgrund $1,230$ V - $(-0,447$ V) = $1,677$ V $\gg 0$ läuft die anodische Metallauflösung in Gegenwart der sauren Elektrolytlösung deutlich schneller ab. Bei einem <i>pH</i>-Wert $\leq 4,5$ spricht man vom Wasserstoff-Korrosionstyp.</p>

7.6.2 Mikrobiell induzierte Korrosion

Das Kriterium dient der Bewertung der Widerstandsfähigkeit des Bauteils und seiner Komponenten gegenüber der Zerstörung durch Stoffwechselprodukte von Mikroorganismen. Die Gefahr eines mikrobiellen Befalls, in dessen Folge mikrobiell induzierte Korrosionsprozesse ausgelöst werden können, steht unter anderem im Zusammenhang mit dem im

²⁵⁵ Der Korrosionsprozess lässt sich durch eine Redox-Gleichung beschreiben. In der Gegenwart von Wasser (Elektrolytlösung mit gelöstem Sauerstoff, Luftfeuchtigkeit) oxidiert ein Metall durch Sauerstoff. In diesem Fall wird das Oxidationsmittel Sauerstoff reduziert. Eine Auflistung von Redox-Paaren nach ihrem Standardelektrodenpotential (Redoxpotential unter Standardbedingungen) enthält die elektrochemische Spannungsreihe

²⁵⁶ Korrosionsprozesse bei gleichzeitiger mechanischer Belastung führen zur Spannungsrisskorrosion (statische mechanische Belastung) oder zur Schwingungsrisskorrosion (zyklische mechanische Beanspruchung).

Gefüge beziehungsweise an der Oberfläche des Materials zur Verfügung stehenden Wassers und der Qualität des vorhandenen Nährstoffangebotes.²⁵⁷ Das heißt, unter der Voraussetzung einer ausreichenden Feuchtebelastung bestimmt vor allem auch die Substratgüte das mikrobielle Wachstum. Eine Zusammenstellung weiterer, allgemeiner Randbedingungen für das Wachstum enthält Tabelle 31.

Tabelle 45

Allgemeine Einflussgrößen für das mikrobielle Wachstum nach Völkner (2003, S. 2-37).

Einflussgröße / Randbedingung	Einfluss auf das Wachstum
Feuchte	Das Wachstum der meisten Schimmelpilzarten beginnt bei einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 80 % und 85 %, beziehungsweise der entsprechenden Ausgleichsfeuchte an der Baustoffoberfläche u_{80} . ²⁵⁸ Die für das Wachstum optimale relative Luftfeuchtigkeit liegt bei 90 % bis 98 %. Schimmelpilze wachsen nicht bei einer relativen Luftfeuchtigkeit unter 70 %, überleben jedoch auch bei Trockenheit (Trockenstarre).
Temperatur	Schimmelpilze können unterhalb der Frostgrenze nicht wachsen. Gute Wachstumsbedingungen liegen jedoch bei Temperaturen zwischen 15 °C und 40 °C vor, also auch bei Raumtemperatur.
pH-Wert	Die meisten Schimmelpilze bevorzugen einen neutralen pH-Wert zwischen 4,5 und 6,5. Einige Arten wachsen jedoch auch außerhalb dieses Bereiches bei pH-Werten zwischen 2 und 8.
Nährstoff / Substrat	Als Nährstoffe fungieren im Allgemeinen Mineralien und Proteine. Diese enthält zum Beispiel Hausstaub in Form von organischen Kohlenstoffen oder Stickstoff, dessen Vorhandensein folglich ausreichend ist für das Wachstum von Schimmelpilzen.
Sauerstoff	Zum Wachstum benötigen Schimmelpilze ein ausreichendes Maß an Sauerstoff.
Licht	Schimmelpilze wachsen unabhängig von dem zur Verfügung stehenden Licht.
Dauer	Schimmelpilze benötigen je nach Randbedingung und Art zwischen einer und vier Wochen zum Wachstum, wobei Tag-Nacht-Zyklen von klimatischen Randbedingungen innerhalb von Räumen kaum Einfluss auf das Wachstum haben.

²⁵⁷ Sedlbauer und Krus (2003) führen aus, dass Baustoffe trotz gleicher Wassergehalte Feuchtigkeit für Mikroorganismen sehr unterschiedlich zur Verfügbarkeit stellen. Die Biologie beschreibt diesen Effekt allgemein als Wasseraktivität.

²⁵⁸ Vergleiche zum Beispiel die aktuell gültigen Anforderungen an den Mindestwärmeschutz im Bereich von Wärmebrücken gemäß DIN 4108-2 beziehungsweise gemäß DIN EN ISO 13788.

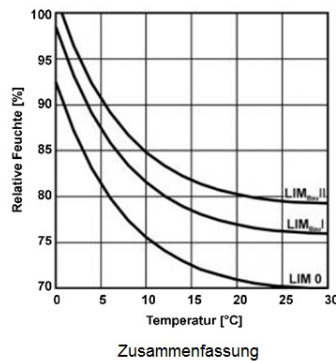
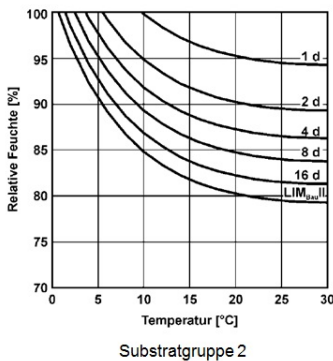
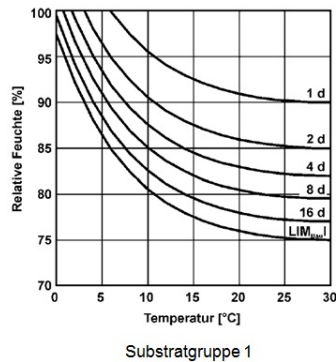
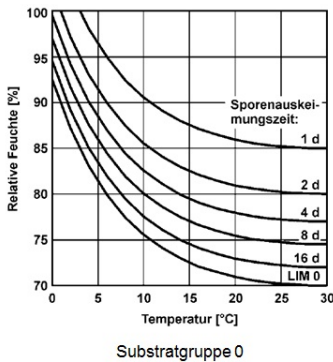


Bild 68

Allgemeines Isolethenmodell für mikrobielles Wachstum nach Sedlbauer (2001). Die angegebenen Werte charakterisieren die Zeitdauer in Tagen, nach welcher eine Keimung abgeschlossen ist.

Links oben:
Substratgruppe 0
(optimales Substrat)

Rechts oben:
Substratgruppe 1

Links unten:
Substratgruppe 2

Rechts unten:
Zusammenfassende Darstellung der Grenzwerte für die drei Substratgruppen (LIM = Lowest Isoleth for Mould)

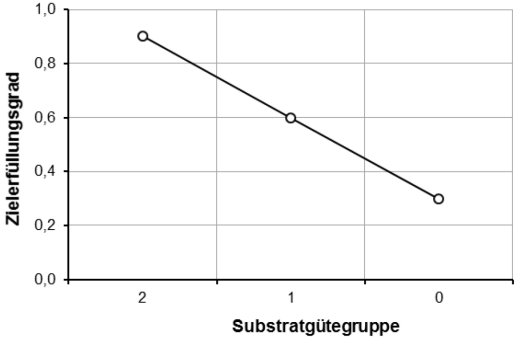
Nach Sedlbauer und Krus (2003) sind die folgenden drei Substratgütegruppen abgrenzbar:

- Substratgütegruppe 0: Das Substrat ist ein biologisches Vollmedium²⁵⁹, welches einen optimalen Nährboden bildet und somit das mikrobielle Wachstum bereits bei geringen Feuchtwerten ermöglicht.
- Substratgütegruppe 1: Die Gruppe bilden biologisch gut verwertbare Substrate, wie etwa Tapeten, Gipskarton, dauerelastische Fugenmaterialien oder stark verschmutztes Material.
- Substratgütegruppe 2: Die Gruppe umfasst biologisch kaum verwertbare Substrate, wie etwa mineralische Baustoffe mit porigem Gefüge oder anorganische Wärmedämmstoffe.

²⁵⁹ Vergleiche zum Beispiel Bludau et al. (2010)

Tabelle 46

Kennblatt für den Indikator
Substratgüte / Nährmedium

Indikator	Substratgüte / Nährmedium									
	Akronym	OrgSub								
	Kategorie I	Dauerhaftigkeit								
	Kategorie II	Mikrobieller Befall und mikrobiell induzierte Korrosion								
Beschreibung	<p>Der Indikator qualifiziert auf Basis eines Isoplethenmodells das organische Substrat, welches für den Pilzmetabolismus, das heißt für die Sporenauskeimungszeiten und die Myzelausbildung, erforderlich ist.²⁶⁰ Das Isoplethenmodell nach Sedlbauer (2001) ist ein Berechnungsverfahren, das die Vorhersage der Schimmelpilzbildung unter Berücksichtigung von Temperatur, Feuchte und Substratgüte ermöglicht. Die Ergebnisse stammen aus experimentellen Untersuchungen.²⁶¹ Nach Sedlbauer und Krus (2003) sind drei Substratgütegruppen abgrenzbar (siehe Bild 68). Ein alternatives empirisches Modell zur Bewertung des mikrobiellen Wachstums ist das im skandinavischen Bereich etablierte, sechstufige Viitanen-Bewertungsmodell (VTT-Modell), welches auf dem Mould-Index basiert.²⁶²</p>									
Funktion	 <table border="1" data-bbox="615 910 1134 1264"> <caption>Data points from the graph in the 'Funktion' row</caption> <thead> <tr> <th>Substratgütegruppe</th> <th>Zielerfüllungsgrad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0.6</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0.3</td> </tr> </tbody> </table>		Substratgütegruppe	Zielerfüllungsgrad	2	0.9	1	0.6	0	0.3
Substratgütegruppe	Zielerfüllungsgrad									
2	0.9									
1	0.6									
0	0.3									
Literatur / Datenbasis	Sedlbauer (2001), Sedlbauer und Krus (2003), WTA (2006)									

²⁶⁰ Isoplethen sind im Allgemeinen Linien gleicher Zahlenwerte. Sie dienen der Darstellung der Abhängigkeit einer Größe von zwei anderen Variablen, zum Beispiel in Diagrammen. Das biohygrothermische Isoplethenmodell verknüpft Temperatur, Feuchte und Substratgüte zur Beurteilung der Wachstumsrate von Schimmelpilzen.

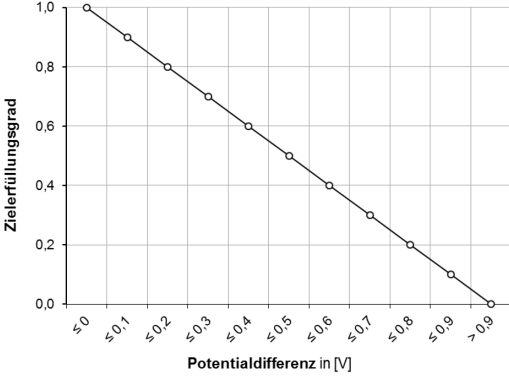
²⁶¹ Vergleiche zum Beispiel Sedlbauer (2001)

²⁶² Vergleich Viitanen und Ritschkoff (1991)

7.6.3 Elektrolytische (Metall-)Korrosion

Die Oxidation von Metallen, etwa von nicht hinreichend geschützten Elementen für die Befestigung von vorgehängten hinterlüfteten Fassaden oder Entwässerungseinrichtungen, wird bei nicht hinreichendem Schutz durch ein Medium mit elektrolytischer Leitfähigkeit verursacht.²⁶³ Als Indikator für die Bewertung elektrolytischer Korrosionsprozesse fungiert vereinfacht die Potentialdifferenz zwischen den Kontaktpartnern Metall und Elektrolyt.²⁶⁴ Die Potentialdifferenz korreliert mit der Höhe korrosionsfördernder Triebkräfte.

Tabelle 47
Kennblatt für den Indikator
Potentialdifferenz

Indikator	Potentialdifferenz																									
	Akronym	PotDiff																								
	Kategorie I	Dauerhaftigkeit																								
	Kategorie II	Elektrolytische (Metall-)Korrosion																								
Beschreibung	Der Indikator misst und bewertet die Potentialdifferenz zwischen dem Oxidations- und dem Reduktionsmittel, das heißt dem metallischen Werkstoff. Ist die Differenz positiv läuft ein Redoxprozess ab, gleichwohl bei kleinen Potentialdifferenzen die Triebkräfte noch gering sind.																									
Funktion	 <table border="1" data-bbox="383 923 896 1304"> <caption>Data points from the graph in Table 47</caption> <thead> <tr> <th>Potentialdifferenz in [V]</th> <th>Zielerfüllungsgrad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>≤0</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>≤0,1</td><td>0,9</td></tr> <tr><td>≤0,2</td><td>0,8</td></tr> <tr><td>≤0,3</td><td>0,7</td></tr> <tr><td>≤0,4</td><td>0,6</td></tr> <tr><td>≤0,5</td><td>0,5</td></tr> <tr><td>≤0,6</td><td>0,4</td></tr> <tr><td>≤0,7</td><td>0,3</td></tr> <tr><td>≤0,8</td><td>0,2</td></tr> <tr><td>≤0,9</td><td>0,1</td></tr> <tr><td>>0,9</td><td>0,0</td></tr> </tbody> </table>		Potentialdifferenz in [V]	Zielerfüllungsgrad	≤0	1,0	≤0,1	0,9	≤0,2	0,8	≤0,3	0,7	≤0,4	0,6	≤0,5	0,5	≤0,6	0,4	≤0,7	0,3	≤0,8	0,2	≤0,9	0,1	>0,9	0,0
Potentialdifferenz in [V]	Zielerfüllungsgrad																									
≤0	1,0																									
≤0,1	0,9																									
≤0,2	0,8																									
≤0,3	0,7																									
≤0,4	0,6																									
≤0,5	0,5																									
≤0,6	0,4																									
≤0,7	0,3																									
≤0,8	0,2																									
≤0,9	0,1																									
>0,9	0,0																									
Literatur / Datenbasis	Beneke (2000), Tostmann (2001), Kaesche (2011)																									

²⁶³ Vergleiche zum Beispiel Tostmann (2001)

²⁶⁴ Vergleiche auch Tabelle 29

7.7 Bestimmung der Gewichtungsfaktoren

Die Festlegung von Gewichtungsfaktoren dient dem Zweck, die Bedeutung jedes Kriteriums bei der Bewertung der Schadenaanfälligkeit von Konstruktionsalternativen zu bemessen. Gewichtungsfaktoren sind demnach Verhältniszahlen, welche die relative Bedeutung jedes einzelnen Kriteriums charakterisieren. Aufgrund der Anzahl der hier verwendeten Bewertungskriterien ($n = 11$) basiert die Festlegung der Gewichtungsfaktoren auf einer Paarvergleichsmethode. Dieses Vorgehen erlaubt die Fragmentierung der Problemstellung und somit eine objektivere zieladäquate Gewichtung. Das AHP-Verfahren formalisiert das Vorgehen, indem Kriterien systematisch, paarweise miteinander verglichen werden. Das Verfahren ist in den Abschnitten 4.3.2 und 4.3.3 erläutert.

	DrFe	QzFe	HxFE	WaAuf	WaDu	DiSta	WL	TrVer	EuD	MiBe	Kor
DrFe	1,000	2,000	2,000	6,000	4,000	4,000	5,000	5,000	6,000	7,000	7,000
QzFe	0,500	1,000	1,000	5,000	4,000	3,000	4,000	3,000	4,000	7,000	7,000
HxFE	0,500	1,000	1,000	5,000	4,000	3,000	4,000	3,000	4,000	7,000	7,000
WaAuf	0,167	0,200	0,200	1,000	1,000	2,000	1,000	1,000	2,000	4,000	4,000
WaDu	0,250	0,250	0,250	1,000	1,000	0,333	1,000	1,000	3,000	3,000	3,000
DiSta	0,250	0,333	0,333	0,500	3,000	1,000	3,000	3,000	3,000	5,000	5,000
WL	0,200	0,250	0,250	1,000	1,000	0,333	1,000	1,000	1,000	3,000	3,000
TrVer	0,200	0,333	0,333	1,000	1,000	0,333	1,000	1,000	1,000	6,000	6,000
EuD	0,167	0,250	0,250	0,500	0,333	0,333	1,000	1,000	1,000	3,000	3,000
MiBe	0,143	0,143	0,143	0,250	0,333	0,200	0,333	0,167	0,333	1,000	1,000
Kor	1,000	2,000	2,000	6,000	4,000	4,000	5,000	5,000	6,000	7,000	1,000

Spaltensummen

S_j	3,519	5,902	5,902	21,500	20,000	14,733	21,667	19,333	25,667	47,000	47,000
-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Tabelle 48

Evaluationsmatrix A der Bewertungskriterien

Erläuterungen

DrFe ...	Druckfestigkeit	WL ...	Wärmeleitfähigkeit
QzFe ...	Querzugfestigkeit Scherfestigkeit	TrVer ...	Trocknungsverhalten
HxFE ...	Haftzugfestigkeit Haftscherfestigkeit	EuD ...	Erreichbarkeit und Demontierbarkeit
WaDu ...	Wasserdurchlässigkeit	MiBe ...	mikrobieller Befall
WaAuf ...	Wasseraufnahme	Kor ...	Korrosion
DiSta ...	Dimensionsstabilität		

	Evaluationsmatrix				Normalisierung				Zeilen- summe	Gewicht
	a_1	a_2	\dots	a_n	a_1	a_2	\dots	a_n	r_i	w_i
a_1	$a_{11} = 1$	a_{12}	\dots	a_{1n}	$\frac{a_{11}}{S_1}$	$\frac{a_{12}}{S_2}$	\dots	$\frac{a_{1n}}{S_n}$	$r_1 = \sum_{i=1}^n \frac{a_{1i}}{S_i}$	$w_1 = \frac{r_1}{n}$
a_2	$a_{21} = \frac{1}{a_{12}}$	1	\dots	a_{2n}	$\frac{a_{21}}{S_1}$	$\frac{a_{22}}{S_2}$	\dots	$\frac{a_{2n}}{S_n}$	$r_2 = \sum_{i=1}^n \frac{a_{2i}}{S_i}$	$w_2 = \frac{r_2}{n}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
a_n	$a_{n1} = \frac{1}{a_{1n}}$	a_{2n}	\dots	$a_{nn} = 1$	$\frac{a_{n1}}{S_1}$	$\frac{a_{n2}}{S_2}$	\dots	$\frac{a_{nn}}{S_n}$	$r_n = \sum_{i=1}^n \frac{a_{ni}}{S_i}$	$w_n = \frac{r_n}{n}$
S_i	$S_1 = \sum_{i=1}^n a_{i1}$	$S_2 = \sum_{i=1}^n a_{i2}$	\dots	$S_n = \sum_{i=1}^n a_{in}$	1	1	\dots	1		1

Tabelle 48 enthält die kreuzweise Gegenüberstellung der zu gewichtenden Kriterien. Entsprechend der Verfahrensbeschreibung im Abschnitt 4.3.3, ist im direkten Vergleich zu entscheiden, inwieweit das erstgenannte Kriterium (horizontal) im Hinblick auf die Bewertungsfrage als „wichtiger“ anzusehen ist, als das zweitgenannte Kriterium (vertikal).²⁶⁵ Die Bedeutungsdifferenz ist entsprechend der Tabelle 4 (Seite 73) auf einer Skala von 1 (gleichbedeutend) bis 9 (maximaler Bedeutungsunterschied) zu bewerten.

Bild 69
Formale Darstellung der Evaluationsmatrix *A*

Kriterium	DrFe	QzFe	HzzFe	WaDu	WaAuf	DiSta	WL	TrVer	EuD	MiBe	Kor
relatives Gewicht	0,248	0,174	0,174	0,063	0,056	0,095	0,048	0,062	0,042	0,019	0,019

Die paarweisen Vergleichsurteile münden in der Evaluationsmatrix *A*. Den drei Gleichungen 3 bis 5 folgend, werden anschließend die Spaltensummen S_j berechnet und die Elemente der Matrix normalisiert, um die relativen Gewichte der Kriterien zu bestimmen. Bild 69 fasst die Rechenschritte noch einmal zusammen. Das Ergebnis, das heißt die Zuordnung relativer Gewichte zu den Kriterien, beinhaltet Tabelle 49. Aus ihr geht hervor, dass insbesondere statisch-kon-

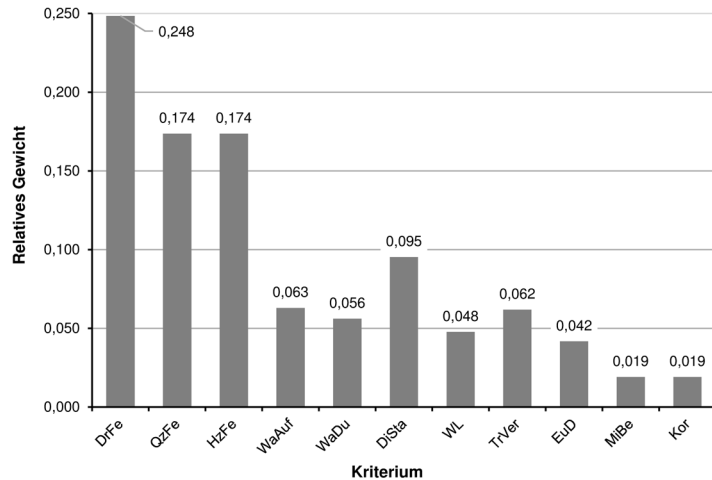
Tabelle 49
Zuordnung eines relativen Gewichts zu jedem einzelnen Kriterium

²⁶⁵ Das folgende Beispiel erklärt, wie die Tabelle 31 zu lesen ist: Beginnend in Zeile 1 ist die nachteilige Änderung der Druckfestigkeit (DrFe) als „gleich bis leicht wichtiger“ als die nachteilige Änderung der Querkzugfestigkeit (QzFe) zu beurteilen. Die Zelle erhält folglich den Wert 2.

struktive Kriterien die höchsten Gewichtungsfaktoren erhalten (siehe auch Bild 70). Mit Hilfe des Konsistenz-Index CI und des Konsistenz-Verhältnisses CR wird die Konsistenz der Paarvergleichsurteile überprüft.

Bild 70

Relative Gewichte der ausgewählten Kriterien zur Bewertung der Schadensanfälligkeit von Mauerwerkskonstruktionen gegenüber Hochwassereinwirkungen



Der Konsistenz-Index CI wird nach Gleichung 9 berechnet:

$$CI = \frac{\bar{\lambda} - n}{n - 1} = \frac{11,908 - 11}{11 - 1} = 0,091$$

Das Konsistenz-Verhältnis CR entspricht nach Gleichung 10 und Tabelle 5:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,091}{1,51} = 0,060 < 0,100$$

Die Konsistenzbedingung $CR < 0,100$ ist erfüllt, so dass keine weitere Überprüfung der Konsistenz der Paarvergleichsurteile erforderlich ist.

7.8 Nutzwertanalyse

Die folgenden Tabellen zeigen das Ergebnis der Nutzwertanalyse für jede der acht untersuchten Mauerwerkskonstruktionen. Das Bewertungsverfahren basiert auf einem gewichteten Zielsystem, das heißt auf den elf beschriebenen Kriterien sowie den zugehörigen Indikatoren und Partialgewichten. Je höher der ermittelte Punktwert (siehe Spalte 2) ist, desto geringer ist die Schadensanfälligkeit der Konstruktion gegenüber Hochwassereinwirkungen einzuschätzen. Der maximal zu erreichende Punktwert auf einer kardinalen Skala ist eins.

Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln (EMW-Mz)

ZIELEBENE								KONSTRUKTION						
# 1		# 2			# 3			EMW-Mz						
Gesamtziel	Gesamtpunkt	Teilziel = Kriteriengruppe	Teilpunkt Gruppenpunkt	Gruppengewicht	Bewertungskriterien	Teilpunkt Kriterienpunkt	Kriteriengewicht	Indikatoren	Bezug	Ausprägung	Teilpunkt	Gewicht innerhalb des Kriteriums	Gesamtgewicht des Indikators	Zielerfüllung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
Schadenanfälligkeit der Mauerwerkstruktur gegenüber Hochwassereinwirkung	0,636	Statisch-konstruktive Kriterien	0,386	0,596	Druckfestigkeit	0,166	0,248	DrFe_SF	Vollziegel Mz	$\beta_{PR,2} / \beta_{PR,1} = 90 \%$	0,099	0,667	0,166	0,600
								DrFe_AF	Vollziegel Mz	$\beta_{PR,3} / \beta_{PR,1} = 99 \%$	0,066	0,333	0,083	0,800
					Querzugfestigkeit Scherfestigkeit	0,116	0,174	QzFe_SF	Vollziegel Mz	$\beta_{Z,2} / \beta_{Z,1} = 80 \%$	0,070	0,667	0,116	0,600
								QzFe_AF	Vollziegel Mz	$\beta_{Z,3} / \beta_{Z,1} = 93 \%$	0,046	0,333	0,058	0,800
					Haftzugfestigkeit Haftscherfestigkeit	0,104	0,174	HfFe_SF	Kalk-Zement-Putz Vollziegel Mz	$\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1} = 73 \%$	0,046	0,667	0,116	0,400
								HfFe_AF	Kalk-Zement-Putz Vollziegel Mz	$\beta_{HZ,3} / \beta_{HZ,1} = 145 \%$	0,058	0,333	0,058	1,000
					Wasseraufnahmeverhalten	0,005	0,063	WaAuf	Kalk-Zement-Putz	$A_w = 1,8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,005	0,250	0,016	0,333
									Vollziegel Mz	$A_w = 20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,000	0,750	0,047	0,000
		Wasserdurchlässigkeit	0,056	0,056				VoStro	Volumenstrom	$Q = 0 \text{ cm}^3/\text{h}$	0,056	1,000	0,056	1,000
								HyDe	Vollziegel Mz	$\epsilon_h = 0,2 \text{ mm/m}$	0,076	1,000	0,095	0,800
		Wärmeleitfähigkeit	0,006	0,048	FEF	Kalk-Zement-Putz	$F = 120 \%$	0,003	0,125	0,006	0,500			
						Vollziegel Mz	$F = 333 \%$	0,000	0,750	0,036	0,000			
						Kalk-Zement-Putz	$F = 120 \%$	0,003	0,125	0,006	0,500			
		Trocknungsverhalten	0,041	0,062	TrKoeff	Vollziegel Mz	$D = 107 \text{ d}^{0,5}/\text{m}$	0,041	1,000	0,062	0,660			
		Kriterien der Baueise	0,029	0,042	Erreichbarkeit Demontierbarkeit	0,029	0,042	AnzBau	Bauteil	$m = 3$	0,025	0,750	0,031	0,800
								VerArt	Kalk-Zement-Putz Mz Kalk-Zement-Putz	"Klebeverbindung"	0,004	0,250	0,010	0,400
		Kriterien der Dauerhaftigkeit	0,036	0,038	Mikrobiell induzierte Korrosion	0,017	0,019	OrgSub	Außenseite: Kalk-Zement-Putz	Substratgütegruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900
									Innenseite: Kalk-Zement-Putz	Substratgütegruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900
					Elektrolytische Korrosion	0,019	0,019	PotDiff	Bauteil	keine metallischen Komponenten	0,019	1,000	0,019	1,000

Einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln (EMW-HLz)

ZIELEBENE					KONSTRUKTION												
# 1		# 2			# 3			EMW-HLz									
Gesamtziel	Gesamtpunkt	Teilziel = Kriteriengruppe	Teilpunkt	Gruppenpunkt	Bewertungskriterien	Teilpunkt	Kriterienpunkt	Indikatoren	Bezug	Ausprägung	Teilpunkt	Gewicht innerhalb des Kriteriums	Gesamtgewicht des Indikators	Zielerfüllung			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)			
Schadenanfälligkeit der Mauerwerkskonstruktion gegenüber Hochwasserwirkung	0,443	Statisch-konstruktive Kriterien	0,241	0,596	Druckfestigkeit	0,132	0,248	DrFe_SF	Leichthochlochziegel	$\beta_{PR,2} / \beta_{PR,1} = 86 \%$	0,066	0,667	0,166	0,400			
								DrFe_AF	Leichthochlochziegel	$\beta_{PR,3} / \beta_{PR,1} = 98 \%$	0,066	0,333	0,083	0,800			
					Querzugfestigkeit Scherfestigkeit	0,046	0,174	QzFe_SF	Leichthochlochziegel	$\beta_{2,2} / \beta_{2,1} = 71 \%$	0,046	0,667	0,116	0,400			
								QzFe_AF	Leichthochlochziegel	$\beta_{2,3} / \beta_{2,1} = 49 \%$	0,000	0,333	0,058	0,000			
					Haftzugfestigkeit Haftscherfestigkeit	0,062	0,174	HzFe_SF	Wärmedämmputz (außen) HLz	$\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1} = 65 \%$	0,023	0,445	0,077	0,300			
									Kalkputz (innen) HLz	$\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1} = 53 \%$	0,000	0,222	0,039	0,000			
								HzFe_AF	Wärmedämmputz (außen) HLz	$\beta_{HZ,3} / \beta_{HZ,1} = 98 \%$	0,031	0,222	0,039	0,800			
									Kalkputz (innen) HLz	$\beta_{HZ,3} / \beta_{HZ,1} = 89 \%$	0,008	0,111	0,019	0,400			
					Bau-physikalische Kriterien	0,137	0,324	Wasseraufnahmeverhalten	0,000	0,063	WaAuf	Wärmedämmputz (außen)	$A_w=3,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,000	0,167	0,011	0,000
												Leichthochlochziegel	$A_w=5,8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,000	0,667	0,042	0,000
		Kalkputz (innen)	$A_w=7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,000								0,167	0,011	0,000			
		Wasserdurchlässigkeit	0,039	0,056				VoStro	Volumenstrom	$Q = 134 \text{ cm}^3/\text{h}$	0,039	1,000	0,056	0,700			
		Dimensionsstabilität	0,076	0,095				HyDe	Leichthochlochziegel	$\epsilon_n = 0,2 \text{ mm/m}$	0,076	1,000	0,095	0,800			
		Wärmeleitfähigkeit	0,001	0,048				FEF	Wärmedämmputz (außen)	$F = 800 \%$	0,000	0,221	0,011	0,000			
									Leichthochlochziegel	$F = 700 \%$	0,000	0,685	0,033	0,000			
					Kalkputz (innen)	$F = 152 \%$	0,001		0,093	0,004	0,300						
		Trocknungsverhalten	0,020	0,062	TrKoeff	HLz Abwertung w. Hohlräume	$D = 107 \text{ d}^{0,5}/\text{m}$	0,020	1,000	0,062	0,330						
		Kriterien der Bauweise	0,029	0,042	Erreichbarkeit Demontierbarkeit	0,029	0,042	AnzBau	Bauteil	$m = 3$	0,025	0,750	0,031	0,800			
								VerArt	Wärmedämmputz HLz Kalkputz	"Klebeverbindung"	0,004	0,250	0,010	0,400			
		Kriterien der Dauerhaftigkeit	0,036	0,038	Mikrobiell induzierte Korrosion	0,017	0,019	OrgSub	Außenseite: Wärmedämmputz	Substratgütegruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900			
									Innenseite: Kalkputz	Substratgütegruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900			
					Elektrolytische Korrosion	0,019	0,019	PotDiff	Bauteil	keine metallischen Komponenten	0,019	1,000	0,019	1,000			

Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen (EMW-PP)

ZIELEBENE								KONSTRUKTION						
# 1		# 2			# 3			EMW-PP						
Gesamtziel	Gesamtpunkt	Teilziel = Kriteriengruppe	Teilpunkt	Gruppenpunkt	Bewertungskriterien	Teilpunkt	Kriterienpunkt	Indikatoren	Bezug	Ausprägung	Teilpunkt	Gewicht innerhalb des Kriteriums	Gesamtwicht des Indikators	Zielerfüllung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
Schadenanfälligkeit der Mauerwerkskonstruktion gegenüber Hochwassereinwirkung	0,464	Statisch-konstruktive Kriterien	0,247	0,596	Druckfestigkeit	0,116	0,248	DrFe_SF	Porenbeton-Planstein	$\beta_{PR,2} / \beta_{PR,1} = 86 \%$	0,066	0,667	0,166	0,400
								DrFe_AF	Porenbeton-Planstein	$\beta_{PR,3} / \beta_{PR,1} = 93 \%$	0,050	0,333	0,083	0,600
					Querkzugfestigkeit Scherfestigkeit	0,069	0,174	QzFe_SF	Porenbeton-Planstein	$\beta_{Z,2} / \beta_{Z,1} = 66 \%$	0,023	0,667	0,116	0,200
								QzFe_AF	Porenbeton-Planstein	$\beta_{Z,3} / \beta_{Z,1} = 91 \%$	0,046	0,333	0,058	0,800
					Haftzugfestigkeit Haftscherfestigkeit	0,062	0,174	HzFe_SF	Wärmedämmputz (außen) PP	$\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1} = 67 \%$	0,023	0,445	0,077	0,300
									Kalkputz (innen) PP	$\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1} = 53 \%$	0,000	0,222	0,039	0,000
								HzFe_AF	Wärmedämmputz (außen) PP	$\beta_{HZ,3} / \beta_{HZ,1} = 96 \%$	0,031	0,222	0,039	0,800
									Kalkputz (innen) PP	$\beta_{HZ,3} / \beta_{HZ,1} = 89 \%$	0,008	0,111	0,019	0,400
					Wasseraufnahmeverhalten	0,000	0,063	WaAuf	Wärmedämmputz (außen)	$A_w=3,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,000	0,167	0,011	0,000
									Porenbeton-Planstein	$A_w=3,4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,000	0,667	0,042	0,000
									Kalkputz (innen)	$A_w=7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,000	0,167	0,011	0,000
					Wasserdurchlässigkeit	0,045	0,056	VoStro	Volumenstrom	$Q = 52 \text{ cm}^3/\text{h}$	0,045	1,000	0,056	0,800
		Dimensionsstabilität	0,057	0,095	HyDe	Porenbeton-Planstein	$\epsilon_h = 0,4 \text{ mm/m}$	0,057	1,000	0,095	0,600			
		Wärmeleitfähigkeit	0,008	0,048	FEF	Wärmedämmputz (außen)	$F = 800 \%$	0,000	0,221	0,011	0,000			
						Porenbeton-Planstein	$F = 189 \%$	0,007	0,685	0,033	0,200			
						Kalkputz (innen)	$F = 152 \%$	0,001	0,093	0,004	0,300			
		Trocknungsverhalten	0,041	0,062	TrKoeff	Porenbeton-Planstein	$D = 105 \text{ d}^{0,5}/\text{m}$	0,041	1,000	0,062	0,660			
		Kriterien der Bauweise	0,029	0,042	Erreichbarkeit Demontierbarkeit	0,029	0,042	AnzBau	Bauteil	$m = 3$	0,025	0,750	0,031	0,800
								VerArt	Wärmedämmputz PP Kalkputz	"Klebeverbindung"	0,004	0,250	0,010	0,400
		Kriterien der Dauerhaftigkeit	0,036	0,038	Mikrobiell induzierte Korrosion	0,017	0,019	OrgSub	Außenseite: Wärmedämmputz	Substratgütegruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900
								Innenseite: Kalkputz	Substratgütegruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900	
					Elektrolytische Korrosion	0,019	0,019	PotDiff	Bauteil	keine metallischen Komponenten	0,019	1,000	0,019	1,000

Einschaliges Mauerwerk aus Planziegeln mit integrierter Wärmedämmung (EMW-PziWD)

ZIELEBENE					KONSTRUKTION																	
# 1		# 2			# 3			EMW-PziWD														
Gesamtziel	Gesamtpunkt	Teilziel = Kriteriengruppe	Teilpunkt = Gruppenpunkt	Gruppengewicht	Bewertungskriterien	Teilpunkt = Kriterienpunkt	Kriterien-gewicht	Indikatoren	Bezug	Ausprägung	Teilpunkt	Gewicht innerhalb des Kriteriums	Gesamtgewicht des Indicators	Zielerfüllung								
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)								
Schadenanfälligkeit der Mauerwerkskonstruktion gegenüber Hochwassereinwirkung	0,417	Statisch-konstruktive Kriterien	0,233	0,596	Druckfestigkeit	0,132	0,248		DrFe_SF	Planziegel mit integr. WD	$\beta_{PR,2} / \beta_{PR,1} = 86 \%$	0,066	0,667	0,166	0,400							
									DrFe_AF	Planziegel mit integr. WD	$\beta_{PR,3} / \beta_{PR,1} = 98 \%$	0,066	0,333	0,083	0,800							
					Querzugfestigkeit Scherfestigkeit	0,046	0,174		QzFe_SF	Planziegel mit integr. WD	$\beta_{2,2} / \beta_{2,1} = 71 \%$	0,046	0,667	0,116	0,400							
									QzFe_AF	Planziegel mit integr. WD	$\beta_{2,3} / \beta_{2,1} = 49 \%$	0,000	0,333	0,058	0,000							
					Haftzugfestigkeit Haftscherfestigkeit	0,054	0,174		HzFe_SF	Faserleichtputz (außen) PziWD	$\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1} = 57 \%$	0,008	0,445	0,077	0,100							
										Kalkputz (innen) PziWD	$\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1} = 53 \%$	0,000	0,222	0,039	0,000							
									HzFe_AF	Faserleichtputz (außen) PziWD	$\beta_{HZ,3} / \beta_{HZ,1} = 100 \%$	0,039	0,222	0,039	1,000							
										Kalkputz (innen) PziWD	$\beta_{HZ,3} / \beta_{HZ,1} = 89 \%$	0,008	0,111	0,019	0,400							
					Wasserauf-nahmeverhalten	0,004	0,063		WaAuf	Faserleichtputz (außen)	$A_w = 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,004	0,167	0,011	0,333							
										Planziegel mit integr. WD	$A_w = 5,8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,000	0,667	0,042	0,000							
		Kalkputz (innen)	$A_w = 7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,000						0,167	0,011	0,000										
		Wasser-durchlässigkeit	0,039	0,056							VoStro	Volumenstrom	$Q = 123 \text{ cm}^3/\text{h}$	0,039	1,000	0,056	0,700					
												Dimensions-stabilität	0,057	0,095		HyDe	Planziegel mit integr. WD	$\epsilon_h = 0,4 \text{ mm}/\text{m}$	0,057	1,000	0,095	0,600
																	Wärmeleit-fähigkeit	0,001	0,048		FEF	Faserleichtputz (außen)
		Planziegel mit integr. WD	$F = 1,086 \%$	0,000						0,685	0,033	0,000										
		Kalkputz (innen)	$F = 152 \%$	0,001	0,093	0,004	0,300															
		Trocknungs-verhalten	0,020	0,062		TrKoeff	PziWD	Abwertung w. Hohlräume	$D = 105 \text{ d}^{0,5}/\text{m}$	0,020	1,000	0,062	0,330									
							Kriterien der Bauweise	0,026	0,042	Erreichbarkeit Demontierbarkeit	0,026	0,042		AnzBau	Bauteil	$m = 3$	0,025	0,750	0,031	0,800		
		VerArt	Wärmedämmputz PziWD Kalkputz	"Klebeverbindung"	0,001	0,050								0,002	0,400							
			Planziegel mit integr. WD	nicht lösbar	0,000	0,200								0,008	0,000							
		Kriterien der Dauerhaftigkeit	0,036	0,038		OrgSub								0,017	0,019		Außenseite: Faserleichtputz	Substratgütegruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900
							Innenseite: Kalkputz	Substratgütegruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900										
							PotDiff	Bauteil	keine metallischen Komponenten	0,019	1,000	0,019	1,000									

Einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung (EMW-Hbl_WDVS)

ZIELEBENE								KONSTRUKTION									
# 1		# 2			# 3			EMW-Hbl_WDVS									
Gesamtziel	Gesamtpunkt	Teilziel = Kriterienengruppe	Teilpunktwert	Gruppengewicht	Bewertungskriterien	Teilpunktwert	Kriterienpunkt	Indikatoren	Bezug	Ausprägung	Teilpunktwert	Gewicht innerhalb des Kriteriums	Gesamtpunkt des Indicators	Zielerfüllung			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)			
Schadenanfälligkeit der Mauerwerkskonstruktion gegenüber Hochwassereinwirkung	0,686	Statisch-konstruktive Kriterien	0,459	0,596	Druckfestigkeit	0,215	0,248	DrFe_SF	Leichtbeton-Hohlblock	$\beta_{PR,2} / \beta_{PR,1} = 97 \%$	0,133	0,667	0,166	0,800			
								DrFe_AF	Leichtbeton-Hohlblock	$\beta_{PR,3} / \beta_{PR,1} = 107 \%$	0,083	0,333	0,083	1,000			
					Querzugfestigkeit Scherfestigkeit	0,147	0,174	QzFe_SF	Leichtbeton-Hohlblock	$\beta_{Z,2} / \beta_{Z,1} = 109 \%$	0,077	0,445	0,077	1,000			
									Leichtbeton-Hohlblock	$\beta_{Z,3} / \beta_{Z,1} = 107 \%$	0,039	0,222	0,039	1,000			
								QzFe_AF	EPS	$\beta_{Z,2} / \beta_{Z,1} = 73 \%$	0,015	0,222	0,039	0,400			
									EPS	$\beta_{Z,3} / \beta_{Z,1} = 91 \%$	0,015	0,111	0,019	0,800			
					Haftzugfestigkeit Haftscherfestigkeit	0,096	0,174	HzFe_SF	EPS (außen) Hbl	$\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1} = 73 \%$	0,031	0,445	0,077	0,400			
									Kalk-Zement-Putz (innen) Hbl	$\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1} = 71 \%$	0,015	0,222	0,039	0,400			
								HzFe_AF	EPS (außen) Hbl	$\beta_{HZ,3} / \beta_{HZ,1} = 91 \%$	0,031	0,222	0,039	0,800			
									Kalk-Zement-Putz (innen) Hbl	$\beta_{HZ,3} / \beta_{HZ,1} = 286 \%$	0,019	0,111	0,019	1,000			
					Bau-physikalische Kriterien	0,168	0,324	Wasseraufnahmeverhalten	0,028	0,063	WaAuf	EPS (außen)	$A_w = 0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,011	0,167	0,011	1,000
												Leichtbeton-Hohlblock	$A_w = 1,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,014	0,667	0,042	0,333
		Kalk-Zement-Putz (innen)	$A_w = 1,8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,004								0,167	0,011	0,333			
		Wasserdurchlässigkeit	0,056	0,056				VoStro	Volumenstrom	$Q = 0 \text{ cm}^3/\text{h}$	0,056	1,000	0,056	1,000			
		Dimensionsstabilität	0,038	0,095				HyDe	Leichtbeton-Hohlblock	$\epsilon_n = 0,6 \text{ mm}/\text{m}$	0,038	1,000	0,095	0,400			
		Wärmeleitfähigkeit	0,012	0,048				FEF	EPS (außen)	$F = 22 \%$	0,009	0,221	0,011	0,900			
									Leichtbeton-Hohlblock	$F = 259 \%$	0,000	0,685	0,033	0,000			
					Kalk-Zement-Putz (innen)	$F = 120 \%$	0,002		0,093	0,004	0,500						
		Trocknungsverhalten	0,034	0,062	TrKoeff	Leichtbeton-Hohlblock	$D = 183 \text{ d}^{0,5}/\text{m}$	0,034	1,000	0,062	0,550						
		Kriterien der Bauweise	0,023	0,042	Erreichbarkeit Demontierbarkeit	0,023	0,042	AnzBau	Bauteil	$m = 4$	0,019	0,750	0,031	0,600			
								VerArt	EPS Hbl Kalk-Zement-Putz	"Klebeverbindung"	0,004	0,250	0,010	0,400			
		Kriterien der Dauerhaftigkeit	0,036	0,038	Mikrobiell induzierte Korrosion	0,017	0,019	OrgSub	Außenseite: WDVS	Substratgütegruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900			
									Innenseite: Kalk-Zement-Putz	Substratgütegruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900			
					Elektrolytische Korrosion	0,019	0,019	PotDiff	Bauteil	keine metallischen Komponenten	0,019	1,000	0,019	1,000			

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit au- ßenliegender Wärmedämmung (EMW-HLz_WDVS)

ZIELEBENE					KONSTRUKTION												
# 1		# 2			# 3			EMW-HLz_WDVS									
Gesamtziel	Gesamtpunkt	Teilziel = Kriterien-Gruppe	Teilpunkt-Gruppenpunkt	Gruppen-gewicht	Bewertungs-kriterien	Teilpunkt-Gruppenpunkt	Kriterien-gewicht	Indikatoren	Bezug	Ausprägung	Teilpunkt	Gewicht innerhalb des Kriteriums	Gesamtgewicht des Indikators	Zielerfüllung			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)			
Schadenanfälligkeit der Mauerwerkskonstruktion gegenüber Hochwasserwirkung	0,475	Statisch-konstruktive Kriterien	0,264	0,596	Druckfestigkeit	0,132	0,248	DrFe_SF	Hochlochziegel	$\beta_{PR,2} / \beta_{PR,1} = 86 \%$	0,066	0,667	0,166	0,400			
								DrFe_AF	Hochlochziegel	$\beta_{PR,3} / \beta_{PR,1} = 98 \%$	0,066	0,333	0,083	0,800			
					Querzugfestigkeit Scherfestigkeit	0,062	0,174	QzFe_SF	Hochlochziegel	$\beta_{Z,2} / \beta_{Z,1} = 71 \%$	0,031	0,445	0,077	0,400			
									Hochlochziegel	$\beta_{Z,3} / \beta_{Z,1} = 49 \%$	0,000	0,222	0,039	0,000			
								QzFe_AF	EPS	$\beta_{Z,2} / \beta_{Z,1} = 73 \%$	0,015	0,222	0,039	0,400			
									EPS	$\beta_{Z,3} / \beta_{Z,1} = 91 \%$	0,015	0,111	0,019	0,800			
					Haftzugfestigkeit Haftscherfestigkeit	0,069	0,174	HzFe_SF	EPS (außen) Hochlochziegel	$\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1} = 73 \%$	0,031	0,445	0,077	0,400			
									Kalkputz (innen) Hochlochziegel	$\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1} = 53 \%$	0,000	0,222	0,039	0,000			
								HzFe_AF	EPS (außen) Hochlochziegel	$\beta_{HZ,3} / \beta_{HZ,1} = 91 \%$	0,031	0,222	0,039	0,800			
									Kalkputz (innen) Hochlochziegel	$\beta_{HZ,3} / \beta_{HZ,1} = 89 \%$	0,008	0,111	0,019	0,400			
					Bau-physikalische Kriterien	0,152	0,324	Wasserauf-nahmeverhalten	0,011	0,063	WaAuf	EPS (außen)	$A_w=0 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h}^{0,5})$	0,011	0,167	0,011	1,000
												Hochlochziegel	$A_w=5,8 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h}^{0,5})$	0,000	0,667	0,042	0,000
		Kalkputz (innen)	$A_w=7 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h}^{0,5})$	0,000								0,167	0,011	0,000			
		Wasser-durchlässigkeit	0,034	0,056				VoStro	Volumenstrom	$Q = 158 \text{ cm}^3/\text{h}$	0,034	1,000	0,056	0,600			
		Dimensions-stabilität	0,076	0,095				HyDe	Hochlochziegel	$\epsilon_n = 0,2 \text{ mm/m}$	0,076	1,000	0,095	0,800			
		Wärmeleit-fähigkeit	0,011	0,048				FEF	EPS (außen)	$F = 22 \%$	0,009	0,221	0,011	0,900			
									Hochlochziegel	$F = 700 \%$	0,000	0,685	0,033	0,000			
									Kalkputz (innen)	$F = 152 \%$	0,001	0,093	0,004	0,300			
		Trocknungs-verhalten	0,020	0,062				TrKoeff	Hochlochziegel	$D = 107 \text{ d}^{0,5}/\text{m}$	0,020	1,000	0,062	0,330			
		Kriterien der Bau-eise	0,023	0,042	Erreichbarkeit Demontierbarkeit	0,023	0,042	AnzBau	Bauteil	$m = 4$	0,019	0,750	0,031	0,600			
								VerArt	EPS HLz Kalkputz	"Klebeverbindung"	0,004	0,250	0,010	0,400			
		Kriterien der Dauer-haftigkeit	0,036	0,038	Mikrobiell induzierte Korrosion	0,017	0,019	OrgSub	Außenseite: WDVS	Substratgüte-gruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900			
								Innenseite: Kalkputz	Substratgüte-gruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900				
					Elektrolytische Korrosion	0,019	0,019	PotDiff	Bauteil	keine metallischen Komponenten	0,019	1,000	0,019	1,000			

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit vor- gehängter hinterlüfteter Fassade (EMW-HLz_VHF)

ZIELEBENE								KONSTRUKTION						
# 1		# 2			# 3			EMW-HLz_VHF						
Gesamtziel	Gesamtpunkt	Teilziel = Kriteriengruppe	Teilpunkt Gruppenpunkt	Gruppengewicht	Bewertungs- kriterien	Teilpunkt Kriterienpunkt	Kriterien- gewicht	Indikatoren	Bezug	Ausprägung	Teilpunkt	Gewicht innerhalb des Kriteriums	Gesamtgewicht des Indikators	Zielerfüllung
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
Schadenanfälligkeit der Mauerwerkskonstruktion gegenüber Hochwassereinwirkung	0,353	Statisch-konstruktive Kriterien	0,171	0,596	Druckfestigkeit	0,132	0,248	DrFe_SF	Hochlochziegel	$\beta_{PR,2} / \beta_{PR,1} = 86 \%$	0,066	0,667	0,166	0,400
								DrFe_AF	Hochlochziegel	$\beta_{PR,3} / \beta_{PR,1} = 98 \%$	0,066	0,333	0,083	0,800
					Querzugfestigkeit Scherfestigkeit	0,031	0,174	QzFe_SF	Hochlochziegel	$\beta_{Z,2} / \beta_{Z,1} = 71 \%$	0,031	0,445	0,077	0,400
									Hochlochziegel	$\beta_{Z,3} / \beta_{Z,1} = 49 \%$	0,000	0,222	0,039	0,000
								QzFe_AF	MW	$\beta_{Z,2} / \beta_{Z,1} = 44 \%$	0,000	0,222	0,039	0,000
									MW	$\beta_{Z,3} / \beta_{Z,1} = 55 \%$	0,000	0,111	0,019	0,000
					Haftzugfestigkeit Haftscherfestigkeit	0,008	0,174	HzFe_SF	MW (außen) Hochlochziegel	$\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1} = 55 \%$	0,000	0,445	0,077	0,000
									Kalkputz (innen) Hochlochziegel	$\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1} = 53 \%$	0,000	0,222	0,039	0,000
								HzFe_AF	MW (außen) Hochlochziegel	$\beta_{HZ,3} / \beta_{HZ,1} = 55 \%$	0,000	0,222	0,039	0,000
									Kalkputz (innen) Hochlochziegel	$\beta_{HZ,3} / \beta_{HZ,1} = 89 \%$	0,008	0,111	0,019	0,400
		Bau-physikalische Kriterien	0,120	0,324	Wasserauf- nahmeverhalten	0,000	0,063	WaAuf	MW (außen)	$A_w = 14 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,000	0,167	0,011	0,000
									Hochlochziegel	$A_w = 5,8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,000	0,667	0,042	0,000
									Kalkputz (innen)	$A_w = 7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,000	0,167	0,011	0,000
					Wasser- durchlässigkeit	0,022	0,056	VoStro	Volumenstrom	$Q = 312 \text{ cm}^3/\text{h}$	0,022	1,000	0,056	0,400
					Dimensions- stabilität	0,076	0,095	HyDe	Hochlochziegel	$\epsilon_n = 0,2 \text{ mm/m}$	0,076	1,000	0,095	0,800
					Wärmeleit- fähigkeit	0,001	0,048	FEF	MW (außen)	$F = 2,019 \%$	0,000	0,221	0,011	0,000
									Hochlochziegel	$F = 700 \%$	0,000	0,685	0,033	0,000
		Kalkputz (innen)	$F = 152 \%$	0,001					0,093	0,004	0,300			
		Trocknungs- verhalten	0,020	0,062	TrKoeff	Hochlochziegel	$D = 107 \text{ d}^{0,5}/\text{m}$	0,020	1,000	0,062	0,330			
		Kriterien der Bauweise	0,029	0,042	Erreichbarkeit Demontierbarkeit	0,029	0,042	AnzBau	Bauteil	$m = 3$	0,025	0,750	0,031	0,800
								VerArt	MW HLz Kalkputz	Schraub- und Klebeverbindung	0,004	0,250	0,010	0,400
		Kriterien der Dauer- haftigkeit	0,033	0,038	Mikrobiell induzierte Korrosion	0,017	0,019	OrgSub	Außenseite: WDVS	Substratgüte- gruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900
									Innenseite: Kalkputz	Substratgüte- gruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900
					Elektrolytische Korrosion	0,015	0,019	PotDiff	Bauteil	Schrauben und Anker für die VHF	0,015	1,000	0,019	0,800

Zweischaliges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung (ZMW-KS_WZ)

ZIELEBENE								KONSTRUKTION									
# 1		# 2			# 3			ZMW-KS_WZ									
Gesamtziel	Gesamtpunkt	Teilziel = Kriteriengruppe	Teilpunkt	Gruppenpunkt	Bewertungskriterien	Teilpunkt	Kriterienpunkt	Indikatoren	Bezug	Ausprägung	Teilpunkt	Gewicht innerhalb des Kriteriums	Gesamtgewicht des Indikators	Zielerfüllung			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)			
Schadenanfälligkeit der Mauerwerkskonstruktion gegenüber Hochwasserwirkung	0,507	Statisch-konstruktive Kriterien	0,296	0,596	Druckfestigkeit	0,149	0,248	DrFe_SF	Kalksand-Lochstein	$\beta_{PR,2} / \beta_{PR,1} = 87 \%$	0,066	0,667	0,166	0,400			
								DrFe_AF	Kalksand-Lochstein	$\beta_{PR,3} / \beta_{PR,1} = 113 \%$	0,083	0,333	0,083	1,000			
					Querzugfestigkeit Scherfestigkeit	0,031	0,174	QzFe_SF	Kalksand-Lochstein	$\beta_{2,2} / \beta_{2,1} = 59 \%$	0,000	0,445	0,077	0,000			
									Kalksand-Lochstein	$\beta_{2,3} / \beta_{2,1} = 94 \%$	0,031	0,222	0,039	0,800			
								QzFe_AF	MW	$\beta_{2,2} / \beta_{2,1} = 44 \%$	0,000	0,222	0,039	0,000			
									MW	$\beta_{2,3} / \beta_{2,1} = 55 \%$	0,000	0,111	0,019	0,000			
					Haftzugfestigkeit Haftscherfestigkeit	0,116	0,174	HzFe_SF	Kalk-Zement-Putz (innen) HLz	$\beta_{HZ,2} / \beta_{HZ,1} = 75 \%$	0,058	0,667	0,116	0,500			
								HzFe_AF	Kalk-Zement-Putz (innen) HLz	$\beta_{HZ,3} / \beta_{HZ,1} = 160 \%$	0,058	0,333	0,058	1,000			
					Bau-physikalische Kriterien	0,156	0,324	Wasseraufnahmeverhalten	0,004	0,063	WaAuf	MW (außen)	$A_w = 14 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,000	0,167	0,011	0,000
												Kalksand-Lochstein	$A_w = 13 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,000	0,667	0,042	0,000
		Kalk-Zement-Putz	$A_w = 1,8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	0,004								0,167	0,011	0,333			
		Wasserdurchlässigkeit	0,056	0,056				VoStro	Volumenstrom	$Q = 0 \text{ cm}^3/\text{h}$	0,056	1,000	0,056	1,000			
															Dimensionsstabilität	0,067	0,095
		Wärmeleitfähigkeit	0,009	0,048				FEF	MW (außen)	$F = 2,019 \%$	0,000	0,221	0,011	0,000			
									Kalksand-Lochstein	$F = 184 \%$	0,007	0,685	0,033	0,200			
					Kalk-Zement-Putz	$F = 120 \%$	0,002		0,093	0,004	0,500						
		Trocknungsverhalten	0,020	0,062	TrkKoeff	Kalksand-Lochstein	$D = 268 \text{ d}^{0,5}/\text{m}$	0,020	1,000	0,062	0,330						
												Kriterien der Bauweise	0,023	0,042	Erreichbarkeit Demontierbarkeit	0,023	0,042
		VerArt	MW HLz Kalkputz	"Klebeverbindung"	0,004	0,250	0,010	0,400									
		Kriterien der Dauerhaftigkeit	0,033	0,038	Mikrobiell induzierte Korrosion	0,017	0,019	OrgSub	Außenseite: WDVS	Substratgütegruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900			
									Innenseite: Kalkputz	Substratgütegruppe = 2	0,009	0,500	0,010	0,900			
					Elektrolytische Korrosion	0,015	0,019	PotDiff	Bauteil	Anker Vormauerschale	0,015	1,000	0,019	0,800			

7.9 Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse

Die Ergebnisse des Nutzwertverfahrens beziehen sich stets auf die konkret untersuchten Schichtenfolgen. Sie demonstrieren die Anwendung der Bewertungsmethodik zur Beurteilung der Schadensanfälligkeit. Eine Übertragung der Ergebnisse auf vermeintlich ähnliche Konstruktionsvarianten ist mit Unsicherheiten verknüpft, da die Bewertungsergebnisse sensitiv auf Änderungen der Schichtenfolge reagieren.

Bild 71 zeigt den für jede betrachtete Mauerwerkskonstruktion ermittelten Punktwert. Die Punktwerte sind intervallskaliert, das heißt die Verdoppelung des Punktwerts entspricht einer Halbierung der Schadensanfälligkeit.

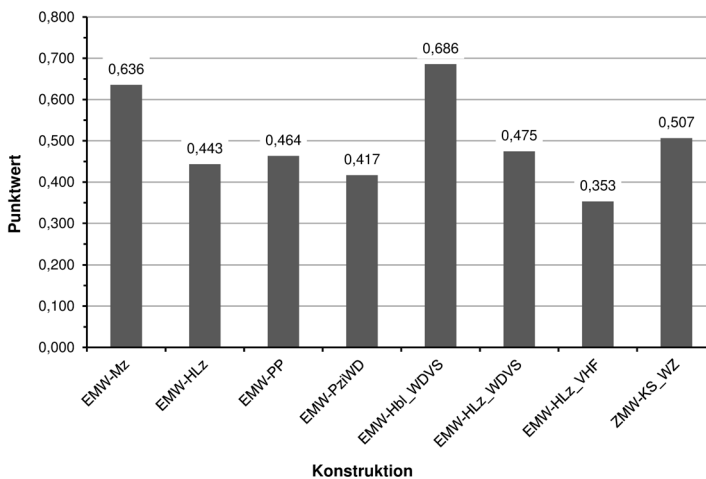


Bild 71

Gesamtpunktwert jeder untersuchten Konstruktionsvariante nach Abschluss des Bewertungsverfahrens. Der maximal zu erreichende Punktwert ist eins.

Zu den tendenziell vorteilhaften Bestandskonstruktionen mit einem Punktwert größer 0,5 zählen gemäß Bild 71 Mauerwerke aus

- traditionellen Vollziegeln (EMW-Mz),
- Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenseitigem Wärmedämm-Verbundsystem (EMW-Hbl_WDVS) sowie aus
- Kalksandstein mit Kerndämmung (ZMW-KS_WZ).

Eine wesentliche Gemeinsamkeit dieser drei Konstruktionen bildet die festgestellte Wasserundurchlässigkeit innerhalb des Versuchszeitraums. Dies führt zu einer positiven Kriterienbewertung und somit zu einem vergleichsweise hohen Punktwert in der Gruppe der bauphysikalischen Kriterien. Aufgrund ihrer günstigen Festigkeitseigenschaften auch bei

erhöhten Wassergehalten verfügen diese drei Schichtenfolgen zudem über den höchsten Punktwert in der am stärksten gewichteten Gruppe der statisch-konstruktiven Kriterien (siehe auch Bild 72).

Bild 72

Gesamtpunktwert jeder untersuchten Konstruktionsvariante differenziert für die vier gewichteten Kriteriengruppen nach Abschluss des Bewertungsverfahrens.

Maximalpunktwert
(Summe = 1,000):

- Statisch-konstruktive Kriterien maximal 0,596 Punkte
- Bauphysikalische Kriterien maximal 0,324 Punkte
- Kriterien der Bauweise maximal 0,042 Punkte
- Kriterien der Dauerhaftigkeit maximal 0,038 Punkte

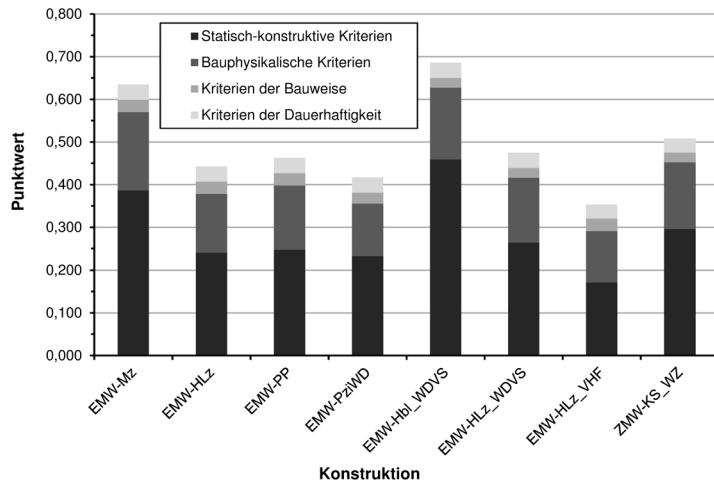


Tabelle 33 überführt die Bewertungsergebnisse in eine Rangfolge. Demnach verfügt das einschalige Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung (EMW-Hbl_WDVS) über die geringste und das einschalige Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit hinterlüfteter Vorhangsfassade (EMW-HLz_VHF) über die höchste Schadensanfälligkeit. Der Quotient der Punktwerte dieser beiden Konstruktionen ist etwa zwei. Der absolute Punktwertabstand beträgt 0,333.

Den Ergebnissen in Tabelle 33 weiter folgend ist festzustellen, dass keine der untersuchten Konstruktionsarten (zum Beispiel monolithisch, einschalig mit zusätzlicher Wärmedämmung, zweischalig mit Kerndämmung) eine grundsätzlich höhere oder geringere Schadensanfälligkeit zuzuordnen ist. Dies zeigt sich etwa am Beispiel der beiden einschaligen Mauerwerkskonstruktionen mit außenliegender Wärmedämmung EMW-Hbl_WDVS und EMW-HLz_WDVS. Trotz gleicher Konstruktionsart liegen etwas mehr als zwei Zehntelpunkte zwischen den beiden Schichtenfolgen.

Die Bewertungsergebnisse verdeutlichen vielmehr, dass der Wandbildner, das heißt der jeweils verwendete Mauerstein, maßgeblich die Schadensanfälligkeit gegenüber intensiver

Hochwasserbelastung beeinflusst und die innen- und außen-
seitigen Wandbekleidungen anscheinend in ihrer Bedeutung
zurücktreten. Über die geringste Schadensanfälligkeit (Rang
eins bis drei) verfügen ausnahmslos Konstruktionen aus
Mauersteinen mit vergleichsweise hoher Festigkeit und Roh-
dichte, mit scheinbar nachgeordnetem Einfluss der jeweili-
gen Wandbekleidungen.

Ein identifiziertes Problemfeld ist in diesem Zusammenhang
die Fügetechnik der eingesetzten Mauersteine. Alle trocken
und knirsch gestoßenen Mauersteine mit verzahnten Stirn-
flächen (Nut-Feder-Verbindungen) führten im Versuchszeit-
raum zum Eindringen von Wasser in den Innenraum, wäh-
rend alle Mauersteine mit vollflächig vermörtelten Stoßfugen
als wasserundurchlässig anzusehen waren. Darüber hinaus
bedingten die nicht vermörtelten Stoßfugen einen stets
mehrseitigen Wasserkontakt. Diese Vergrößerung der Saug-
fläche der Mauersteine mündet, bei konstantem Wasserauf-
nahmekoeffizienten und bei gleicher Zeitdauer, in der Auf-
nahme einer größeren Wassermenge, wobei ein linearer Zu-
sammenhang zwischen den Parametern besteht.

Rang	Konstruktion	Punktwert
1	EMW-Hbl_WDVS Einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblö- cken mit außenliegender Wärmedämmung	0,686
2	EMW-Mz Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollzie- geln	0,636
3	ZMW-KS_WZ Zweischaliges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung	0,507
4	EMW-HLz_WDVS Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit außenliegender Wärmedämmung	0,475
5	EMW-PP Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Planstei- nen	0,464
6	EMW-Hlz Einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln	0,443
7	EMW-PziWD Einschaliges Mauerwerk aus Planziegeln mit inte- grierter Wärmedämmung	0,417
8	EMW-HLz_VHF Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit hinterlüfteter Vorhangfassade	0,353

Tabelle 50

Zuordnung eines relativen
Gewichts zu jedem einzel-
nen Kriterium

Eine weitere Darstellung der Ergebnisse enthält das Radar-
diagramm in Bild 73. Es stellt die Schichtenfolgen mit der
höchsten (EMW-Hbl_WDVS) und der geringsten Schadens-
anfälligkeit (EMW-HLz_VHF) vergleichend gegenüber. Jede
der elf Achsen des Diagramms kennzeichnet den normierten
Punktwert (in [%]) eines Kriteriums. Die eingezeichneten Po-
lygone zeigen, wieviel Prozent des Kriterienpunktwertes jede
der beiden Konstruktionen erreicht, wobei der Wert von
100 % dem jeweiligen Zielwert entspricht. Somit sind diejeni-
gen Kriterien leicht identifizierbar, bei denen eine besonders
große Differenz zwischen den ermittelten relativen Punk-
twerten der beiden Konstruktionen auftritt, beziehungsweise
bei denen ein großer Abstand zum Zielwert vorliegt.

Bild 73

Radardiagramm zur graphi-
schen Darstellung der mul-
tikriteriellen Bewertung der
Schadensanfälligkeit der
beiden Konstruktionen:

EMW-HLz_VHF

Einschaliges Mauerwerk
aus Hochlochziegeln mit
vorgehängter hinterlüfteter
Fassade

EMW-Hbl_WDVS

Einschaliges Mauerwerk
aus Leichtbeton-Hohlblö-
cken mit außenliegender
Wärmedämmung

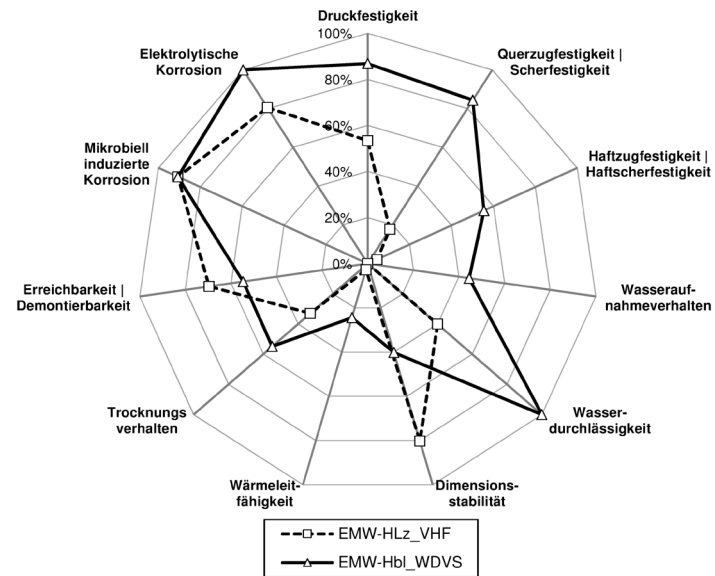


Bild 73 zeigt zum Beispiel eine deutliche Differenz der rela-
tiven Punktwerte für das Kriterium der Querkugfestigkeit.
Während die Konstruktion EMW-Hbl_WDVS mehr als 84 %
des maximalen Kriterienpunktwertes erreicht, sind es für die
Konstruktion EMW-HLz_VHF lediglich knapp 18 %. Ursäch-
lich ist die gegenüber den verwendeten Leichtbeton-Hohlblö-
cken und EPS-Dämmstoffplatten der Konstruktion EMW-
Hbl_WDVS erheblich größere, feuchteinduzierte Abnahme
der Querkugfestigkeit der eingesetzten Hochlochziegel und
Mineralfaser-Dämmstoffplatten der Konstruktion EMW-
HLz_VHF. Die Schadensanfälligkeit der Konstruktionen kor-
reliert mit dem Inhalt der durch die Polygone begrenzten Flä-
che, wobei der größte Flächeninhalt der kleinsten Schadens-
anfälligkeit entspricht.

8 Baukonstruktive Optionen

8.1 Optionen für einschaliges Mauerwerk ohne außenliegende Wärmedämmung

Die nachfolgenden Beispiele beschreiben Optionen zur Minderung der Schadensanfälligkeit einschaliger Mauerwerkskonstruktionen ohne außenliegende Wärmedämmung. Die Außenseite des exemplarisch dargestellten einschaligen Mauerwerks aus traditionellen Vollziegeln erhält, in Anlehnung an Burkert et al. (2011) und Burkert (2012), ein mehrlagiges mineralisches Dicht-/Putzsystem, das bis in eine Höhe von mindestens 30 cm über den maximal zu erwartenden Hochwasserstand geführt wird. Die Anpassungsmaßnahme folgt dem bereits erläuterten Wirkprinzip des „Widerstehens“. Die Stabilität des Mauerwerks bei einseitiger Wasserbelastung ist, entsprechend den geltenden Normen und der Höhe des geplanten Schutzziels, zuvor rechnerisch nachzuweisen.²⁶⁶ Das in Bild 74 dargestellte, mehrlagige mineralische Dicht-/Putzsystem bildet eine wasserundurchlässige Schicht, welche die Außenwand wirksam gegen drückendes Wasser

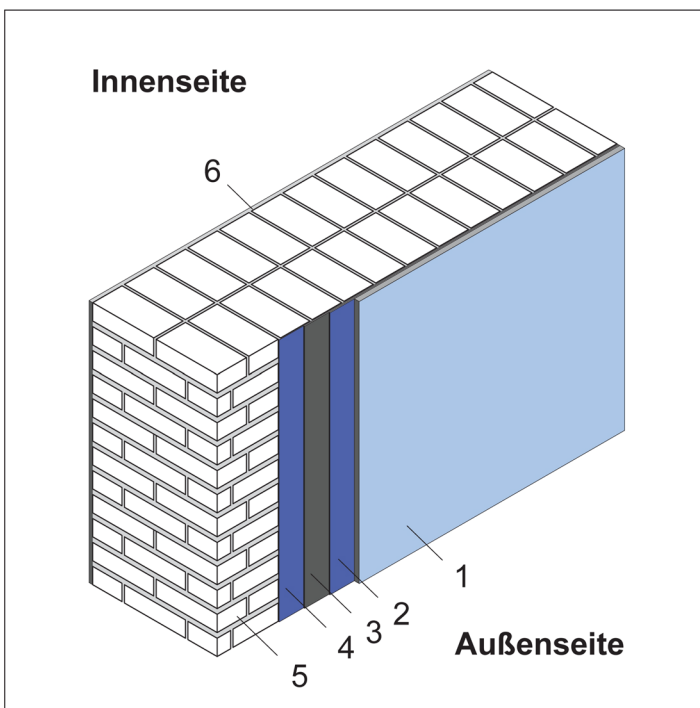


Bild 74

Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk ohne außenseitige Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung

Wirkprinzip „Widerstehen“
Dargestellt für die Konstruktion EMW-Mz

- 1 Sanierputz, diffusions-offen, armiert, d = 25 mm
- 2 mineralische flexible Dichtungsschlämme, d = 4 mm
- 3 mineralischer Dichtspachtel, d = 2 mm
- 4 mineralische flexible Dichtungsschlämme, d = 4 mm
- 5 Bestandsmauerwerk aus Vollziegeln, NF, d = 49 cm
- 6 Kalkputz, d = 20 mm

²⁶⁶ Diese Forderung gilt für alle Konstruktionen.

abdichtet und das Eindringen von Feuchtigkeit in das Mauerwerk verhindert. Das System umfasst folgende Komponenten (vom Mauerwerk zur Wandaußenseite):

- mineralische flexible Dichtungsschlämme (MDS) mit hohem Sulfatwiderstand, d = 4 mm
- Dichtspachtel, mineralischer Mörtel mit hohem Sulfatwiderstand, d = 2 mm
- mineralische flexible Dichtungsschlämme (MDS) mit hohem Sulfatwiderstand, d = 4 mm
- faserbewehrter Leichtputz mit hoher Porosität ($\phi > 50 \%$), diffusionsoffen, mit Textilglasarmierung, d = 25 mm

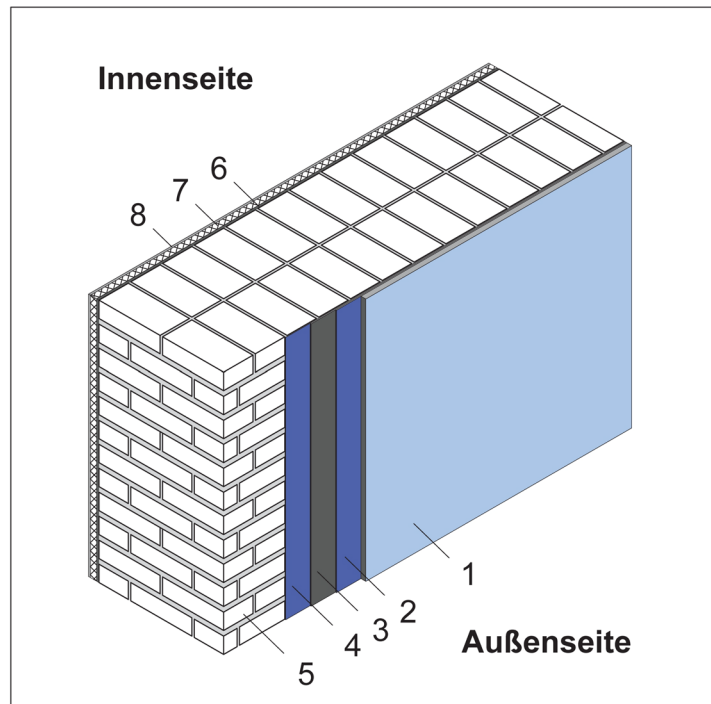
Bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung nimmt der zementgebundene Faserleichtputz Wasser bis zur maximalen Sättigung in sein Gefüge auf. Die darunter angeordnete zweilagige mineralische Dichtungsschlämme und der Dichtspachtel fungieren als vertikale Dichtungsebene. Die Trocknung des faserbewehrten Leichtputzes erfolgt nahezu vollständig in Richtung Außenseite. Da während der Trocknungsperiode auch mit dem Absinken der Temperatur in der feuchtebelasteten Putzschicht unter den Gefrierpunkt zu rechnen ist, ist die spröde Baustoffmatrix des Leichtputzes

Bild 75

Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk ohne außenseitige Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung

Wirkprinzip „Widerstehen“
Dargestellt für die Konstruktion EMW-Mz

- 1 Sanierputz, diffusionsoffen, armiert, d = 25 mm
- 2 mineralische flexible Dichtungsschlämme, d = 4 mm
- 3 mineralischer Dichtspachtel, d = 2 mm
- 4 mineralische flexible Dichtungsschlämme, d = 4 mm
- 5 Bestandsmauerwerk aus Vollziegeln, NF, d = 49 cm
- 6 Klebemörtel, vollflächig aufgezogen, d = 5 mm
- 7 Calcium-Silikat-Innendämmung, d = 25 mm
- 8 Kalkputz, d = 8 mm



mit Fasern bewehrt. Diese Faserbewehrung beugt eventuellen Frostschäden durch ein elastisch-plastisches Materialverhalten vor. Zusätzlich erhöht die Faserbewehrung die Widerstandsfähigkeit des Putzes gegenüber mechanischen Einwirkungen. Die Leistungen zur Instandsetzung des Ziegelmauerwerks umfassen darüber hinaus (i) die Versiegelung (Verfüllung) der Stoß- und Lagerfugen mit einer mineralischen, zementgebundenen Fugenschlämme sowie (ii) die Verfestigung oberflächennaher Mauerwerksbereiche zur Herstellung einer geeigneten Haftbrücke für die Abdichtung. Innenseitig wird ein Kalkputz mit einer Schichtstärke von 20 mm aufgebracht.

Der stark erhöhte Diffusionswiderstand der außenseitigen Wandbekleidung verhindert die Abgabe von Wasserdampf zur Außenseite.²⁶⁷ Es ist daher rechnerisch nachzuweisen, dass die abgedichtete Wandkonstruktion die raumseitig anfallenden Feuchtemengen aufnehmen und wieder abgeben kann, ohne dass sich die Gefahr der Kondensatbildung im Bauteilinneren und der Schimmelpilzbildung auf der Bauteiloberfläche unzulässig erhöht. Wenn aufgrund der Innenraumnutzung regelmäßig eine hohe relative Luftfeuchtigkeit

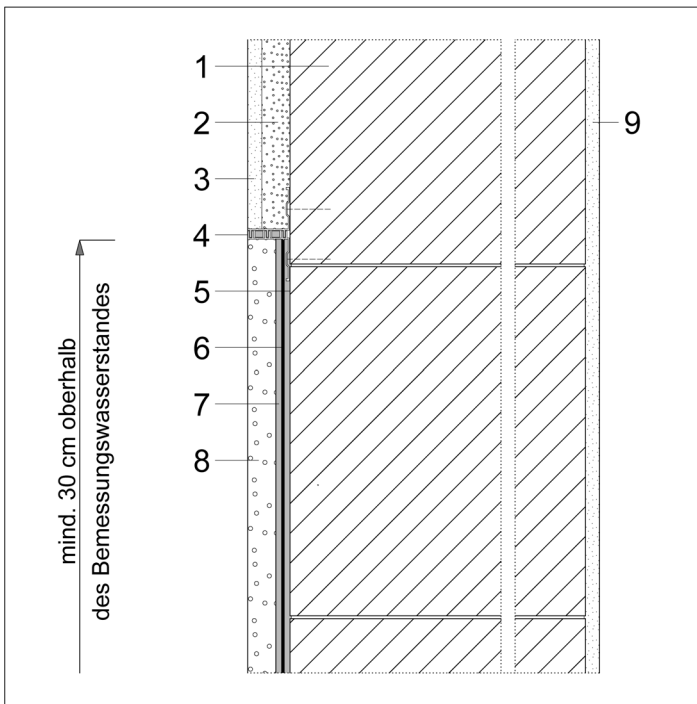


Bild 76

Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk ohne außenseitige Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung

Wirkprinzip „Widerstehen“
Dargestellt für die Konstruktion EMW-PP

- 1 Bestandsmauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen, d = 365 mm
- 2 Wärmedämmputz, d = 25 mm
- 3 mineralischer Oberputz, d = 10 mm
- 4 Putztrennprofil, Kunststoff
- 5 mineralische flexible Dichtungsschlämme, d = 4 mm
- 6 mineralischer Dichtspachtel, d = 2 mm
- 7 mineralische flexible Dichtungsschlämme, d = 4 mm
- 8 Sanierputz, diffusiv-offen, armiert, d = 25 mm
- 9 Kalkputz, d = 10 mm

²⁶⁷ Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl der Dichtungsschlämme und des Dichtspachtels beträgt jeweils $\mu < 200$.

zu erwarten ist, ist die Verwendung eines feuchteregulierenden Innenwandsystems, etwa aus Calcium-Silikat-Platten, als flankierende Maßnahme zu untersuchen (siehe Bild 75). Ein horizontales Putzprofil aus Kunststoff trennt das Dicht-/Putzsystem etwa 30 cm über dem zu erwartenden Hochwasserstand vom bestehenden Außenputz (siehe Bild 76). Das Trennprofil schließt bündig mit der Putzoberfläche ab.

8.2 Optionen für einschaliges Mauerwerk mit außenliegender Wärmedämmung

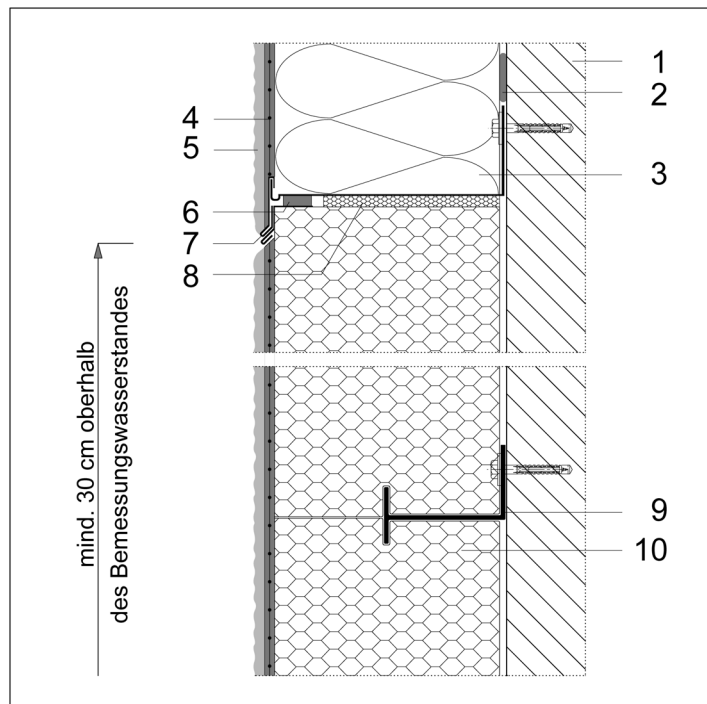
Die nachfolgend abgebildeten Schichtenfolgen visualisieren beispielhafte baukonstruktive Optionen für einschalige Mauerwerkskonstruktionen mit außenliegender Wärmedämmung. Eine baukonstruktive Option, die dem Wirkprinzip des „Anpassens“ zuzuordnen ist, umfasst die Verwendung eines mechanisch befestigten Wärmedämm-Verbundsystems, welches das ursprünglich punktuell geklebte System bis in eine Höhe von mindestens 30 cm über den Bemessungswasserstand ersetzt (siehe Bild 77). Oberhalb des flutgefährdeten Fassadenbereiches sind keine Anpassungsmaßnahmen erforderlich. Den Übergang von der neuen zur bestehenden Wandbekleidung bildet eine fassadenbündige, horizontale Gleitlagerfuge. Zu den Vorteilen der Konstruktion zählen:

Bild 77

Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk mit außenseitiger Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung

Wirkprinzip „Anpassen“
Dargestellt für die Konstruktion EMW-Hbl_WDVS

- 1 Bestandsmauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken, d = 300 mm
- 2 Klebemörtel, mineralisch, Punkt-Rand-Verklebung, d = 5 mm
- 3 Wärmedämmung, Bestand, expandierte Polystyrol-Hartschaumplatten, d = 120 mm
- 4 Unterputz, mineralisch, armiert mit Glasfasergewebe, d = 5 mm
- 5 Kunstharzoberputz, d = 2mm
- 6 WDVS Dichtband
- 7 horizontales WDVS Gleitlagerprofil bestehend aus Sockel-, Winkel- und Aufsteckprofil
- 8 Trennstreifen
- 9 WDVS Schienensystem
- 10 Wärmedämmung, expandierte Polystyrol-Hartschaumplatten, d = 120 mm



- Die Differentialbauweise und der Verzicht auf eine nicht lösbare Klebeverbindung erlauben die einfache Demontage des Wärmedämm-Verbundsystems.
- Die mechanische Befestigung des Wärmedämm-Verbundsystems im flutgefährdeten Fassadenbereich schließt Risiken aus, die auf der nachteiligen Minderung der Haftzugfestigkeit stoffschlussbildender Klebeverbindungen beruhen.
- Die Eigenschaftswerte der neu eingesetzten Wärmedämmplatten orientieren sich am Bestand, das heißt sie verfügen über die gleiche Wärmeleitfähigkeit und Materialstärke. Der Wert des Wärmedurchgangskoeffizienten der angepassten Außenwand entspricht folglich dem Wert der Bestandskonstruktion.
- Die Anpassungsmaßnahme führt zu keiner nennenswerten Veränderung des Wasserdampf-Diffusionswiderstandes der Schichtenfolge, die weitere flankierende Maßnahmen erfordert.
- Die Demontage des Wärmedämm-Verbundsystems bis zur Höhe einer zuvor definierten horizontalen Gleitfuge erlaubt die Trocknung des Mauerwerks.
- Nach der Trocknung des Wandbildners und erneuter Montage der Dämmstoffplatten dient die horizontale Gleitfuge als Putzanschluss.

Als Nachteile sind unter anderem zu nennen:

- Im Ereignisfall gelangt Wasser unmittelbar in die Fuge zwischen Dämmstoff und Mauerstein, da das Wärmedämm-Verbundsystem hinterlaufen werden kann. Dies führt zu einer direkten hygrischen Beanspruchung der verwendeten Mauersteine.
- Die baulichen Leistungen nach der Überflutung umfassen die Demontage (bis zur horizontalen Fuge) und Entsorgung des bestehenden WDVS. Nach der Trocknung wird die Außenwand mit einem neuen WDVS bekleidet.
- Die mechanische Befestigung ist teurer als das Kleben des WDVS im Punkt-Rand-Verfahren.
- Die definierte, horizontale Gleitfuge im WDVS kann als optische Beeinträchtigung der Fassade wahrgenommen werden.
- Die Anpassungsoption ist nicht für alle tragenden Mauerwerkskonstruktionen als geeignet anzusprechen. Die Option beschränkt sich auf Konstruktionen die nicht oder

lediglich gering wasserdurchlässig sind und deren Eigenschaftswerte sich infolge erhöhter Wassergehalte im Materialgefüge nur gering ändern. Zu diesen Konstruktionen zählt zum Beispiel Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken im Dickbettverfahren.

Eine baukonstruktive Option für Mauerwerk mit außenliegender Wärmedämmung, die dem Wirkprinzip des „Widerstehens“ entspricht, ist die Ausführung eines so bezeichneten Fassadenverbundsystems, welches drei bedeutende Nachteile der zuvor beschriebenen Konstruktionsalternative auflöst (siehe Bild 78):

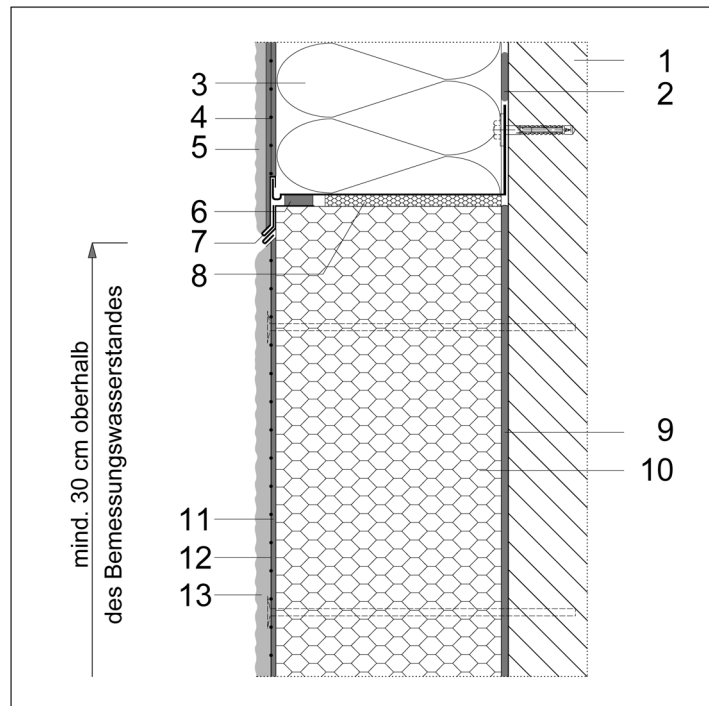
Bild 78

Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk mit außenseitiger Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung

Wirkprinzip „Widerstehen“
Dargestellt für die Konstruktion EMW-HLz_WDVS

- 1 Bestandsmauerwerk aus Hohllochziegeln, d = 240 mm
- 2 Klebemörtel, mineralisch, Punkt-Rand-Verklebung, d = 5 mm
- 3 Wärmedämmung, Bestand, expandierte Polystyrol-Hartschaumplatten, d = 100 mm
- 4 Unterputz, mineralisch, armiert mit Glasfasergewebe, d = 5 mm
- 5 Kunstharzoberputz, d = 2mm
- 6 WDVS Dichtband
- 7 horizontales WDVS Gleitlagerprofil bestehend aus Sockel-, Winkel- und Aufsteckprofil
- 8 Trennstreifen
- 9 Bitumenkaltkleber, vollflächig aufgezogen
- 10 Schaumglasplatten, Stirnflächen geklebt, d = 100 mm
- 11 zellfüllender Kaltbitumendeckabstrich
- 12 Putzarmierungsgitter, mechanisch im Untergrund befestigt
- 13 mineralischer Dick-schichtputz

- Das vollflächige Aufziehen eines wasserbeständigen Bitumenkaltklebers führt zu einer hohlraumfreien Verbundfuge zwischen Dämmstoff und Mauerstein. In Verbindung mit den vollfugig und rückseitig vollflächig verklebten Schaumglasplatten sowie mit dem zellfüllenden Kaltbitumendeckabstrich entsteht eine wasserundurchlässige Schichtenfolge. Die hygrische Einwirkung auf den Wandbildner ist folglich stark reduziert.
- Die Wandbekleidung kann nach einem Überflutungseignis in situ verbleiben, sofern keine mechanischen Beschädigungen vorliegen.



- Die dargestellte Option ist für alle baupraktisch relevanten Mauerwerkskonstruktionen geeignet.

Als Nachteile sind unter anderem zu nennen:

- Das Fassadenverbundsystem ist wasserdampfundurchlässig. Es ist daher rechnerisch nachzuweisen, dass die bis 30 cm über den Bemessungswasserstand abgedichtete Wandkonstruktion die raumseitig anfallenden Feuchtmengen aufnehmen und wieder abgeben kann, ohne dass sich die Gefahr der Kondensatbildung im Bauteilinneren und der Schimmelpilzbildung auf der Bauteiloberfläche unzulässig erhöht.
- Bei der Verwendung unterschiedlicher Dämmstoffe ist ihre spezifische Wärmeleitfähigkeit zu beachten.
- Die definierte, horizontale Arbeitsfuge in der Außenwandbekleidung kann als optische Beeinträchtigung der Fassade wahrgenommen werden.

Bild 79 zeigt eine Anpassungsoption für die untersuchte Außenwand mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade. Gegenüber der ursprünglich ausgeführten Variante ersetzen offene Aluminiumprofile die Holzunterkonstruktion. Zu den wichtigsten Vorteilen gehören:

- Die Differentialbauweise der VHF erlaubt nach einem Überflutungsereignis die einfache Demontage des Systems bis zur erforderlichen Höhe. Fassadenpaneele und Dämmstoffe sind nacheinander erreichbar und bei Erfordernis austauschbar. Der systematische Rückbau gewährleistet die Trocknung des Wandbildners. Die Fassadentragprofile aus Aluminium verbleiben in situ.
- Die mechanische Verbindung der Bauteile vermeidet Risiken, die auf dem Nachlassen der Haftzugfestigkeit stoffschlussbildender Klebeverbindungen beruhen.
- Die Eigenschaftswerte der eingesetzten Mineralfaser-Dämmplatten orientieren sich am Bestand, das heißt sie verfügen über die gleiche Wärmeleitfähigkeit und Materialstärke. Der Wärmedurchgangskoeffizient der angepassten Außenwand entspricht folglich dem der Bestandskonstruktion.
- Die Anpassungsmaßnahme führt zu keiner nennenswerten Veränderung des Wasserdampf-Diffusionswiderstandes der Schichtenfolge, die weitere flankierende Maßnahmen erfordert.

- Die großformatigen Faserzement-Paneele, welche die Fassadenbekleidung bilden, können erneut verwendet werden.

Als Nachteile sind unter anderem zu nennen:

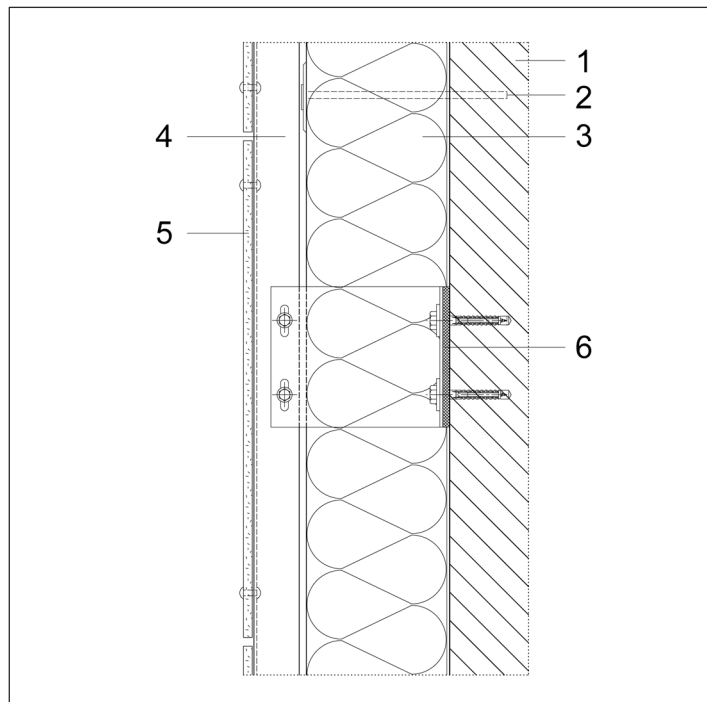
- Im Ereignisfall gelangt Wasser in die Mineralfaser-Fassadendämmplatten und in die Fuge zwischen Dämmstoff und Mauerwerk, da der Dämmstoff hinterlaufen werden kann. Dies führt zu einer direkten hygrischen Beanspruchung der verwendeten Mauersteine.
- Die baulichen Leistungen nach der Überflutung umfassen die Demontage und Entsorgung der Mineralfaser-Fassadendämmplatten. Nach der Trocknung wird die Außenwand neu mit Dämmplatten bekleidet.
- Die Anpassungsoption ist nicht für alle tragenden Mauerwerkskonstruktionen als geeignet anzusprechen. Die Option beschränkt sich auf Konstruktionen die nicht oder lediglich gering wasserdurchlässig sind und deren Eigenschaftswerte sich infolge erhöhter Wassergehalte im Materialgefüge nur gering ändern. Zu diesen Konstruktionen zählt zum Beispiel Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken im Dickbettverfahren.

Bild 79

Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk mit außenseitiger Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung

Wirkprinzip „Anpassen“
Dargestellt für die Konstruktion EMW-HLz_VHF

- 1 Bestandsmauerwerk aus Hohllochziegeln, $d = 240 \text{ mm}$
- 2 Dämmstoffdübel
- 3 Außendämmung hinter Bekleidung (WAB), Fassaden-Dämmplatte aus Steinwolle, einseitig mit Glasvlies kaschiert, $d = 100 \text{ mm}$
- 4 Tragprofil, Aluminium
- 5 Fassadenpaneel, Faserzement, $d = 10 \text{ mm}$
- 6 Wandhalter, Aluminium, thermisch entkoppelt



Eine weitere bautechnische Variante zur Minderung der Schadensanfälligkeit von Außenwänden mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade bildet die Ausführung einer bituminösen, vertikalen Dichtungsebene in Verbindung mit Schaumglas-Fassadendämmplatten (siehe Bild 80).²⁶⁸ Die Variante gehört zum Wirkprinzip des „Widerstehens“.

Zu den Vorteilen dieser bautechnischen Variante zählen:

- Das vollflächige Aufziehen eines wasserbeständigen Bitumenkaltklebers führt zu einer hohlraumfreien Verbundfuge zwischen Dämmstoff und Mauerstein. In Verbindung mit den vollfugig und rückseitig vollflächig verklebten Schaumglasplatten entsteht eine wasserundurchlässige Schichtenfolge. Die hygrische Einwirkung auf den Wandbildner ist folglich stark reduziert.
- Die gesamte Vorhangfassade kann nach einem Überflutungsereignis in situ verbleiben, sofern keine mechanischen Beschädigungen vorliegen.
- Die dargestellte Option ist für alle baupraktisch relevanten Mauerwerkskonstruktionen geeignet.

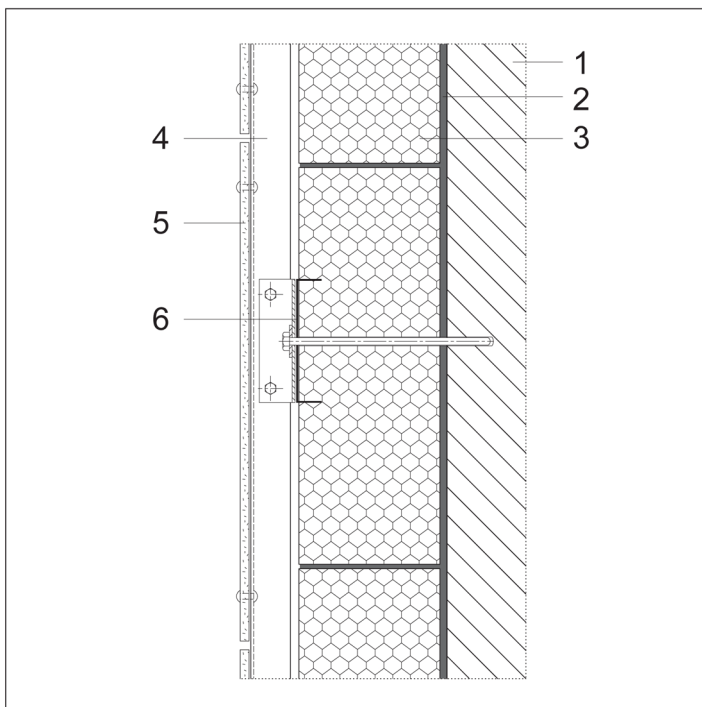


Bild 80

Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk mit außenseitiger Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung

Wirkprinzip „Widerstehen“
Dargestellt für die Konstruktion EMW-HLz_VHF

- 1 Bestandsmauerwerk aus Hohllochziegeln, 8 DF, d = 240 mm
- 2 Bitumenkaltkleber, vollflächig aufgezogen
- 3 Schaumglas-Dämmplatten, Stirnflächen geklebt, d = 100 mm
- 4 Tragprofil, Aluminium
- 5 Fassadenpaneel, Faserzement, d = 10 mm
- 6 Krallenplatte, Aluminium, Systembauteil, mit abgedichtetem Durchsteckanker

²⁶⁸ Die Option entspricht keiner vertikalen Flächenabdichtung entsprechend der DIN 18195-6.

Als Nachteil ist unter anderem zu nennen:

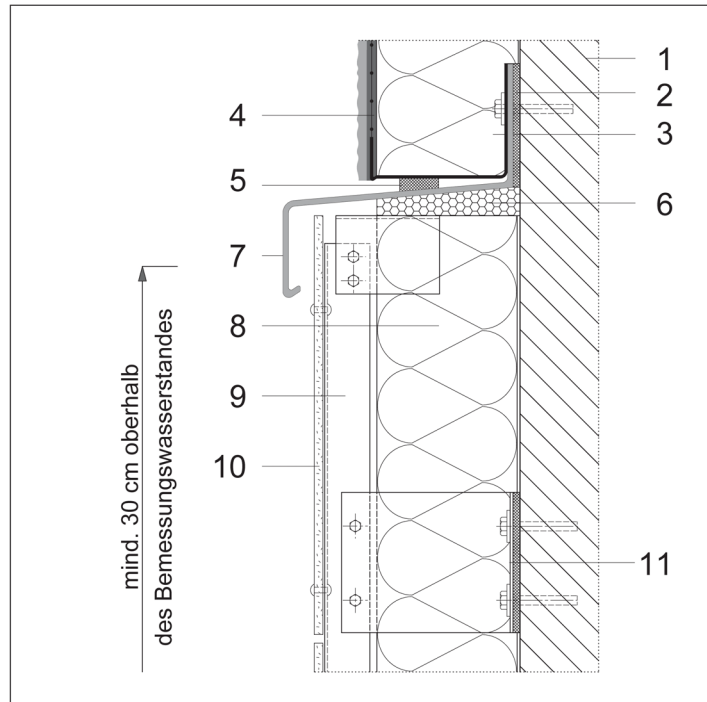
- Das Fassadensystem ist wasserdampfundurchlässig. Es ist daher rechnerisch nachzuweisen, dass die abgedichtete Wandkonstruktion die raumseitig anfallenden Feuchtemengen aufnehmen und wieder abgeben kann und dass sich die Gefahr der Kondensatbildung im Bauteilinneren und der Schimmelpilzbildung auf der Bauteiloberfläche nicht unzulässig erhöht.

Bild 81

Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk mit außenseitiger Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung

Wirkprinzip „Anpassen“
Dargestellt für die Konstruktion EMW-HLz_WDVS

- 1 Bestandsmauerwerk aus Hochlochziegel, 8 DF, d = 240 mm
- 2 Winkelprofil, Aluminium, thermisch entkoppelt
- 3 Wärmedämmung, Bestand, expandierte Polystyrol-Hartschaumplatten, d = 100 mm
- 4 Unterputz, mineralisch, armiert mit Glasfasergewebe, d = 5 mm, Kunstharzoberputz, d = 2mm
- 5 Trennstreifen
- 6 vorkonfektionierter Dämmstoffkeil
- 7 Verblechung, Aluminium, pulverbeschichtet
- 8 Außendämmung hinter Bekleidung (WAB), Fassaden-Dämmplatte aus Steinwolle, einseitig mit Glasvlies kaschiert, d = 100 mm
- 9 Tragprofil, Aluminium
- 10 Fassadenpaneel, Fa-serzement, d = 10 mm
- 11 Wandhalter, Aluminium, thermisch entkoppelt



8.3 Optionen für zweischaliges Mauerwerk mit Kerndämmung

Ein bedeutender Zwangspunkt mehrschaliger Mauerwerkskonstruktionen ist die unzureichende Erreichbarkeit des dämmstoffgefüllten Schalenzwischenraums. Die Lage der Kerndämmung erschwert die Trocknung beziehungsweise den Austausch nach einem Überflutungsereignis erheblich.

Der Entwurf einer bautechnischen Maßnahme zur Minderung der Schadensanfälligkeit umfasst daher den Austausch der Mineralwolle-Dämmplatten bis in eine Höhe von mindestens 30 cm über den höchsten zu erwartenden Wasserstand (siehe Bild 82). Im flutgefährdeten Bereich fungieren eine

kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtung (KMB) als vertikale Dichtebene und vollfugig und vollflächig verklebte Schaumglasplatten als Wärmedämmung.²⁶⁹ Oberhalb des flutgefährdeten Fassadenbereiches sind keine Anpassungsmaßnahmen erforderlich.

Zu den Vorteilen der Konstruktion zählen:

- Das vollflächige Aufziehen einer KMB und eines wasserbeständigen Bitumenkaltklebers führt zu einer hohlraumfreien Verbundfuge zwischen Dämmstoff und Mauerstein. In Verbindung mit den vollfugig und rückseitig vollflächig verklebten Schaumglasplatten entsteht eine nahezu wasserundurchlässige Schichtenfolge. Die hygrische Einwirkung auf den Wandbildner der Tragschale ist folglich stark reduziert.
- Die zweischalige Konstruktion kann nach einem Überflutungsereignis in situ verbleiben, sofern keine mechanischen Beschädigungen vorliegen.

Analog zu den anderen Beispielen, die auf dem Wirkprinzip des „Widerstehens“ beruhen, ist ein zu berücksichtigender

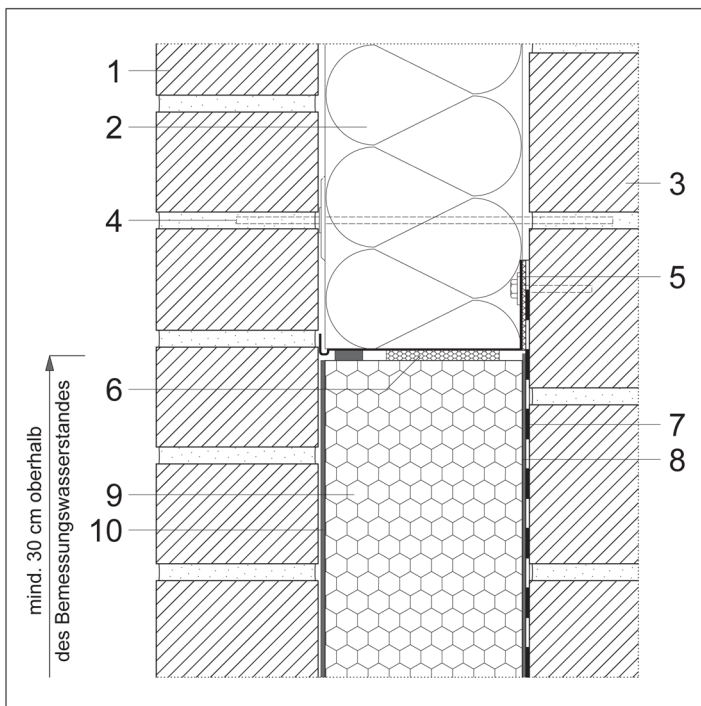


Bild 82

Baukonstruktive Option für zweischaliges Mauerwerk mit Kerndämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung

Wirkprinzip „Widerstehen“
Beispiel: ZMW-KS_WZ

- 1 KS-Verblender, NF, d = 115 mm
- 2 Kerndämmung von zweischaligem Mauerwerk (WZ), Dämmplatte aus Steinwolle, einseitig mit Glasvlies kaschiert, d = 140 mm
- 3 Mauerwerk aus KS-Lochsteinen, 3 DF, d = 240 mm
- 4 Drahtanker mit Tropf- und Klemmscheibe
- 5 Winkelprofil, Aluminium, thermisch entkoppelt
- 6 Trennstreifen
- 7 bituminöse Vertikalabdichtung
- 8 Bitumenkaltkleber, vollflächig aufgezogen
- 9 Wärmedämmung, Schaumglasplatte, Stirnflächen geklebt, d = 140
- 10 zellfüllender Kaltbitumendeckabstrich

²⁶⁹ Die Option entspricht keiner vertikalen Flächenabdichtung entsprechend der DIN 18195-6.

Aspekt, dass der Außenwandquerschnitt wasserdampfdurchlässig ist. Es ist daher rechnerisch nachzuweisen, dass die abgedichtete Wandkonstruktion die raumseitig anfallenden Feuchtemengen aufnehmen und wieder abgeben kann und dass sich die Gefahr der Kondensatbildung im Bauteilinneren und der Schimmelpilzbildung auf der Bauteiloberfläche nicht unzulässig erhöht.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Wie kann das Systemverhalten von Mauerwerkskonstruktionen gegenüber hygrischen Hochwassereinwirkungen labortechnisch untersucht werden?

Weder nationale noch europäische Regelwerke nehmen im Zusammenhang mit Gebäuden und Baukonstruktionen direkten Bezug auf das Phänomen Hochwasser. Die Umweltgefahr zählt aufgrund ihrer Charakteristik zu den außergewöhnlichen Einwirkungen, die in der Regel durch eine niedrige Eintrittswahrscheinlichkeit und ein hohes Schadenspotential gekennzeichnet sind. Hochwasserbelastete Außenwände müssen zum einen senkrecht zur Wandebene einwirkende Kräfte aufnehmen, etwa wenn Wasserstandsunterschiede zwischen Innen- und Außenseite auftreten. Zum anderen führt Hochwasser zu einer intensiven hygrischen Beanspruchung der Konstruktionen, deren Folgen in dieser Arbeit untersucht werden.

Zu den üblichen Außenwandkonstruktionen zählen sowohl ein- als auch mehrschalige Mauerwerkskonstruktionen, die in der Regel aus einer systematisch gefügten Folge überwiegend mineralischer, kapillarporöser Baustoffe bestehen. Die Untersuchung ihres Systemverhaltens bei intensiver hygrischer Beanspruchung umfasst die Erkundung von Wirkmechanismen und die Beschreibung von Interaktionsregeln zwischen den einzelnen Komponenten der Konstruktion. Die eingesetzten Baustoffe nehmen bei Hochwasserbeanspruchung Wasser in sehr unterschiedlichen Mengen in ihr kapillarporöses Gefüge auf. Neben den Eigenschaftswerten der Baustoffe und der Dauer der Beanspruchung, ist die Wasseraufnahme auch von der spezifischen Anordnung der Baustoffe in der Schichtenfolge abhängig.

Für die experimentelle Untersuchung der Wasseraufnahme und der Wasserdurchlässigkeit gefügter Konstruktionen fehlen jedoch normative Regelungen und standardisierte Verfahren. Vor diesem Hintergrund beschreibt die vorliegende Arbeit einen Laborversuch zur experimentellen Untersuchung von Mauerwerkskonstruktionen. Der Laborversuch umfasst zwei Phasen. Während der ersten Phase wird die

Außenwand für die Dauer von 72 Stunden außenseitig beansprucht, während die unmittelbar anschließende zweite Phase die 24-stündige, beidseitige Beanspruchung der Außenwandkonstruktionen vorsieht.

Die Datengewinnung basiert auf einer systematischen Versuchsdurchführung unter definierten, einheitlichen Randbedingungen in einem Wasserbaulabor. Gegenstand des Versuchsprogramms ist die messtechnische Ermittlung der Feuchteverteilung in acht ausgewählten Schichtenfolgen üblicher, massiver Mauerwerkskonstruktionen. Hierfür werden Probekörper hergestellt und in einem Wasserbecken in zwei Versuchsphasen einer intensiven Wasserbeanspruchung ausgesetzt. Diese hydrostatische Einwirkung entspricht einem Hochwasserereignis mit geringer Fließgeschwindigkeit. Die Auswahl des Untersuchungsgegenstandes orientiert sich an der Forderung, die Bandbreite üblicher Mauerwerkskonstruktionen abzubilden, welche im Wohngebäudebestand häufig ausgeführt und räumlich weit verbreitet sind.

Der während des Laborversuchs beobachtete Verlauf der Wasseraufnahme und die Messungen der Wassergehalte im Querschnitt der Mauerwerkskonstruktionen erlauben Rückschlüsse auf den Feuchteaustausch über Schichtgrenzen hinweg. Die Kontaktzone hygrisch verbundener, poröser Baustoffe bildet einen Widertand, der die beobachtbare Wasserverteilung verlangsamt. Insbesondere an der Verbundfuge zwischen außenseitigem Putzmörtel und Mauerstein verzögert sich der kapillare Feuchteübergang. Die hygrische Belastung führt bei der Mehrzahl der Konstruktionen zu erheblichen Feuchtegehalten, die sich nahe der maximalen Wassersättigung befinden. Die ermittelten Durchfeuchtungsgrade erreichen Werte bis zu 95 %. Die Ergebnisse der Experimentalstudie bilden die Evidenzbasis für die Beantwortung der weiteren Forschungsfragen.

Wie und anhand welcher quantifizierbarer Kriterien kann die Schadensanfälligkeit einer Mauerwerkskonstruktion bewertet werden?

Aufbauend auf der Experimentalstudie zum Feuchteverhalten werden, entsprechend der zweiten Forschungsfrage, spezifische Methoden und Kriterien zur Ermittlung und Bewertung der Schadensanfälligkeit bestehender Mauerwerks-

konstruktionen identifiziert. Hierbei steht zunächst die Analyse der Wirkungszusammenhänge zwischen dem dokumentierten Feuchteverhalten und dessen nachteiligen Folgen im Mittelpunkt. Die Wirkungsanalysen dienen der Entwicklung relevanter Bewertungskriterien und der Auswahl geeigneter Indikatoren.

Ein Verfahren, welches die systematische Bewertung von Konstruktionsalternativen anhand verschiedener quantitativer Kriterien unterstützt, ist die Nutzwertanalyse. Das Bewertungsverfahren basiert auf einem hierarchischen Zielsystem, das elf Kriterien sowie die zugehörigen Zielfunktionen und Partialgewichte umfasst. Je höher eine mit der Nutzwertmethode ermittelte Kennzahl ist, desto geringer ist die Schadensanfälligkeit der Konstruktion gegenüber Hochwassereinflüssen einzuschätzen.

Jedes der elf Bewertungskriterien ist einer von vier Gruppen zuzuordnen. Die erste Gruppe der statisch-konstruktiven Kriterien beinhaltet die Druck-, Querzug- und Haftzugfestigkeit der Außenwandkomponenten. Zur zweiten Gruppe der bauphysikalischen Kriterien gehören das Wasseraufnahmeverhalten, die Wasserdurchlässigkeit, die Dimensionsstabilität, die Wärmeleitfähigkeit sowie das Trocknungsverhalten. Eine dritte Gruppe umfasst Kriterien der Bauweise, gleichwohl in dieser Studie nur die Demontierbarkeit, das heißt die einfache und sichere Trennung mehrteiliger beziehungsweise mehrschichtiger Konstruktionen, berücksichtigt wird. Die vierte Gruppe bilden Kriterien der Dauerhaftigkeit. Hierin eingebunden ist die Bewertung mikrobiell induzierter und elektrolytischer Korrosionsvorgänge. Die vier Kriteriengruppen sind entsprechend ihrer Bedeutung im Hinblick auf die Schadensanfälligkeit gewichtet. Die statisch-konstruktiven Kriterien stehen in der Präferenzenordnung vor den bauphysikalischen Kriterien, den Kriterien der Bauweise sowie den Kriterien der Dauerhaftigkeit.

Um den Einfluss jedes dieser Kriterien auf die Schadensanfälligkeit der Mauerwerkskonstruktion beurteilen zu können, wurden kriterienbezogene Zielfunktionen entwickelt. Diese Zielfunktionen bewerten die Abweichungen der festgestellten Wertausprägungen (Ist-Werte) von bestimmten Zielwerten (Soll-Werte). Die Festlegung der Zielwerte orientiert sich an den allgemein anerkannten Regeln der Technik sowie an fachlichen Standards aus technischen Regelwerken und

Richtlinien. Darüber hinaus gewährleistet die Einbindung bereits vorliegender Forschungsergebnisse der Ingenieurwissenschaften die generelle Legitimität und die Praxisrelevanz der verwendeten Zielwerte. Die Mehrzahl der Baustoffe in einer gefügten Konstruktion verändert ihre Eigenschaftswerte in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Je größer die ermittelten Differenzen zwischen den Zielwerten und den veränderten Eigenschaftswerten sind, desto ausgeprägter sind die nachteiligen Folgen der hygrischen Beanspruchung.

Die Bestimmung der Partialgewichte, die als Maßstabsfaktoren die Bedeutung jedes einzelnen Kriteriums im Bewertungsverfahren bemessen, basiert auf der Paarvergleichsmethode des analytisch-hierarchischen Prozesses.

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Methodik, welche erstmalig die Beurteilung der Schadensanfälligkeit alternativer Regelquerschnitte gegenüber Hochwassereinwirkungen operationalisiert. Damit gelingt eine transparente und nachvollziehbare Differenzierung zwischen nachteiligen und vorteilhaften Konstruktionslösungen. Auf der Grundlage dieser Beurteilung sind Konstruktionsalternativen hinsichtlich ihrer Schadensanfälligkeit in eine Rangfolge überführbar.

Ein wichtiges Anwendungsfeld der Ergebnisse ist zum einen die Entwicklung und zum anderen die Förderung bautechnischer Maßnahmen der Hochwasservorsorge. Die Entwicklung spezifischer Anpassungsmaßnahmen orientiert sich an den gewonnenen Beurteilungsergebnissen, welche die maßgeblichen Defizite des Ist-Zustandes identifizieren und somit die gezieltere Ableitung von Lösungen unterstützen. Die Förderung objekt konkreter Anpassungsmaßnahmen ist ein politisches Ziel. Zur Umsetzung dieses politischen Ziels werden die Länder, der Bund oder die Europäische Union mit hoher Wahrscheinlichkeit Förderprogramme auflegen, welche die Implementierung von Bauvorsorgemaßnahmen finanziell unterstützen und somit Anreize zum Handeln verstärken. Dem öffentlichen Fördermittelgeber steht mit dieser Arbeit ein Operationalisierungsinstrument für die Bewertung sowohl der Schadensanfälligkeit bestehender Konstruktionen als auch der Wirksamkeit konzipierter Anpassungsmaßnahmen zur Verfügung.

Welche Strategien und baukonstruktiven Optionen können für die Anpassung bestehender Außenwandkonstruktionen abgeleitet werden?

Aufgrund der Varietäten bestehender Mauerwerkskonstruktionen sind keine universellen Systemlösungen zur Minderung der Schadensanfälligkeit ableitbar. Neben der Vielfalt möglicher Schichtenfolgen beeinflussen stochastische Materialeigenschaften und ihre zeitlichen Veränderungen die Konzeption von Anpassungsmaßnahmen. Die Auswertung der Laborergebnisse verdeutlicht einige systematische, das heißt konstruktionsbedingt wiederkehrende, Problemfelder, die im Zusammenhang mit der Beanspruchung durch Hochwasser stehen.

Eines dieser identifizierten Problemfelder ist die Fügetechnik der eingesetzten Mauersteine. Das Versetzen von Mauersteinen ohne vermörtelte Stoßfugen reduziert den Verlegeaufwand sowie den Mörtelverbrauch und optimiert nachweislich die Wärmedämmeigenschaften der Konstruktion. Bei Hochwasserbeanspruchung erweist sich diese Fügetechnik hingegen als große Herausforderung. Alle trocken und knirsch gestoßenen Mauersteine mit verzahnten Stirnflächen (Nut-Feder-Verbindungen) führten im Versuchszeitraum zum Eindringen von Wasser in den Innenraum, während alle Mauersteine mit vollflächig vermörtelten Stoßfugen als wasserundurchlässig anzusprechen waren. Darüber hinaus bedingten die nicht vermörtelten Stoßfugen einen stets mehrseitigen Wasserkontakt. Diese Vergrößerung der Saugfläche der Mauersteine mündet, bei konstantem Wasseraufnahmekoeffizienten und bei gleicher Zeitdauer, in der Aufnahme einer größeren Wassermenge, wobei ein linearer Zusammenhang zwischen den Parametern besteht. Ein nachträgliches, vollflächiges Vermörteln der Stoßfugen ist jedoch bei Bestandskonstruktionen aufgrund der Verzahnung der Mauersteine nicht möglich. Eine Handlungsalternative für den Verschluss der Stoßfugen ist die verpressende Injektion speziell abgestimmter Schaummörtel im Niederdruckverfahren.

Ein weiteres Problemfeld bilden die planmäßig angeordneten Hohlräume insbesondere in Hochlochziegeln. Die steigenden Anforderungen an den Wärmeschutz führen zu einer Minderung der Rohdichte des kapillarporösen Materialgerüsts und zu einer Zunahme des Lochflächenanteils in der La-

gerfläche. Neben der Wasseraufnahme in das Scherbengefüge zeigen die Versuche, dass sich bereits während der außenseitigen Beanspruchung die Ziegel Hohlräume bis zur Höhe des Bemessungswasserstandes füllen. Nach Versuchsende entweicht das Wasser nur sehr langsam aus diesen Hohlräumen. Integrierte Dämmstoffe verstärken den Effekt der verzögerten Wasserabgabe. Die hohe Wassermenge, die im Mauerstein verbleibt, bedingt intensive technische Trocknungsverfahren.

Eine Strategie, welche den Umfang baulicher Instandsetzungsleistungen reduziert, ist die Differentialbauweise. Hierbei werden mehrere Elemente unterschiedlicher Materialien durch punktuelle Fügung zu einem Bauteil oder einer Baugruppe verbunden. Eine rückstandsfreie Lösung der punktuellen Verbindungen ermöglicht eine vergleichsweise einfache Demontage und eine sortenreine Separierung ohne aufwändige, energieintensive Trennprozesse. Zu den beiden wichtigen Gestaltungsrichtlinien zählen (i) demontagegerechte Strukturen und Verbindungsstellen, wie zum Beispiel Gliederung in Baugruppen und Verringerung von Fügstellen, sowie (ii) demontierbare Verbindungen, welche die Erreichbarkeit von Baustoffen gewährleisten.

9.2 Ausblick

Untersuchung weiterer Bauarten

Das entwickelte Verfahren zur Untersuchung und Bewertung der Schadensanfälligkeit von Außenwandkonstruktionen wurde bisher anhand von acht Regelquerschnitten getestet. Zukünftig ist anzustreben, über die Varietäten der Mauerwerkskonstruktionen hinaus, weitere Schichtenfolgen mit relevanter Marktverbreitung, wie etwa Holzständer- und Holztafelkonstruktionen, Stahlbetonkonstruktionen und Stahl-Glas-Konstruktionen, zu analysieren und zu beurteilen, um die erlangten Ergebnisse auch bauartübergreifend vergleichen und einordnen zu können.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Kriterienensemble ist in Abhängigkeit von der Fragestellung durch zusätzliche Kriterien und Indikatoren erweiterbar. Somit können weitere Korrelationen zwischen erhöhten Wassergehalten und nachteiligen Folgen für die Konstruktionen in den ganzheitlichen Bewertungsprozess einbezogen werden. Ein bisher nicht betrach-

tetes Kriterium ist zum Beispiel den Grad der optischen Abweichungen, die nach einem Überflutungsereignis auf den sichtbaren Bauteiloberflächen zu erwarten sind. Das Kriterium bewertet den baulichen Aufwand zur Herstellung einer optisch einwandfreien Oberfläche.²⁷⁰ Als Indikatoren fungieren (i) Verschmutzung, (ii) Farbabweichung und (iii) Ausblühungen. Darüber hinaus könnten aber auch Kriterien wie etwa die Verfügbarkeit bestimmter Materialien oder der erforderliche Qualifikationsgrad der in den Schadensbeseitigungsprozess eingebundenen Personen im Bewertungsverfahren Berücksichtigung finden.

Für die gezielte Konzeption von Maßnahmen zur Minderung der Schadensanfälligkeit von Konstruktionen erscheint die Festlegung definierter Zielpunktwerte, im Sinne von Mindestpunktwerten, für die verwendeten Kriterien zweckmäßig, so dass das Verfahren noch stärker zur Bewertung der Effektivität, das heißt der Wirksamkeit der Maßnahmen, beiträgt.

Nachfolgende Untersuchungen weiterer Bauarten sollten auch den teilweise vorliegenden Zielkonflikt zwischen Klimaschutz und Klimaanpassung thematisieren und sich der Frage widmen, welche energetischen Optimierungsmaßnahmen die Robustheit einschränken. Die staatliche Zielvorgabe den Energieverbrauch von Gebäuden zu mindern, führte zum Beispiel in der letzten Dekade im Bereich der Wärmedämmstoffe zur Weiterentwicklung zahlreicher innovativer Produkte. Hierzu zählen unter anderem Vakuumisulationspaneele, organische Hartschäume und Mineralwolle mit nanoporösen Partikeln. Aufzuklären ist, inwieweit sich durch die Verwendung dieser Produkte die Schadensanfälligkeit gegenüber Umwelteinwirkungen im Allgemeinen und gegenüber Hochwasser im Besonderen verändert.

Einbindung in den objektbezogenen Hochwasserschutz

Die vom nationalen Gesetzgeber geforderte eigenverantwortliche, das heißt privat organisierte Hochwasservorsorge, erfordert unter anderem die Verfügbarkeit belastbarer Informationen über die potentiellen negativen Folgen eines Überflutungsereignisses für das Gebäude und dessen Baukonstruktion. Hier lassen sich die Ergebnisse der Arbeit einbin-

²⁷⁰ Vergleiche zum Beispiel Oswald (2000)

den. Auf dieser wesentlichen Grundlage sind von einem hinzugezogenen, fachkundigen Planer geeignete Maßnahmen des hochwasserangepassten Bauens ableitbar.

Der objektbezogene Hochwasserschutz umfasst in der Regel technische Maßnahmen, die das Eindringen von Oberflächenwasser, welches bis an die Gebäudehülle gelangt, in das Gebäudeinnere verhindern sollen.²⁷¹ Hierfür bietet der Markt eine Vielzahl unterschiedlicher Barriersysteme, mit denen Öffnungen und Durchdringungen der Gebäudehülle nahezu wasserdicht verschlossen werden können. Bei der Montage dieser Systeme entstehen jedoch zum Teil konstruktive Konfliktpunkte mit dem Baubestand, etwa bei der nachträglichen Befestigung mobiler Schutzsysteme an wärmedämmten Fassaden. Diese müssen deutlich gemacht und aufgelöst werden.

Grundsätzlich ist jedoch das hier angestrebte Wirkprinzip des Widerstehens nur dann wirksam, wenn auch die Gebäudehülle in der Lage ist beziehungsweise in die Lage versetzt wird, den Wassereintritt in das Gebäude während eines Hochwasserereignisses zu verzögern oder sogar zu verhindern. Die im Verlauf der Bauteiluntersuchung festgestellte Wasserdurchlässigkeit mehrerer Außenwandkonstruktionen konterkariert den Versuch, durch den Verschluss von Fenstern, Türen und von sonstigen Öffnungen beziehungsweise Durchdringungen einen wirksamen Schutz vor eindringendem Wasser herzustellen. Im Ereignisfall gelangt das Wasser nämlich unkontrolliert durch den Wandquerschnitt und flutet die Innenräume. Einige Anhaltspunkte für die Wasserdurchlässigkeit ausgewählter Wandkonstruktionen enthält Abschnitt 6.7. Eine weiterführende Studie zur Verifikation erscheint in diesem Zusammenhang sinnvoll.

Fügen und Verbinden

Ein weiterer wesentlicher Aspekt, der in zukünftige Untersuchungen stärker eingebunden werden sollte, ist die vertiefte fachliche Betrachtung erhöhter Feuchtigkeitsgehalte in Bauanschlussfugen. Diese Anschlussbereiche sind in Anbe-

²⁷¹ Das Problemfeld Grundhochwasser wird hier bewusst thematisch ausgeklammert.

tracht der geforderten energetischen Qualität der Gebäudehülle dauerhaft luftdicht und mit entsprechenden wärmetechnischen Eigenschaften herzustellen.

Das Versuchsprogramm beinhaltete ausschließlich Regelquerschnitte baupraktisch relevanter Außenwandkonstruktionen aus Mauerwerk. Innerhalb eines komplexen bautechnischen Systems, etwa eines Gebäudes, das aus einer Vielzahl von miteinander verknüpften Komponenten besteht, bildet die Konstruktion einer Außenwand und die Bewertung ihrer Schadensanfälligkeit jedoch lediglich eine Teilmenge. Gleichwohl diese Teilmenge über eine nachweislich hohe Relevanz verfügt, zeichnet sich erst aus der Synthese zusätzlicher Erkenntnisse über das Verhalten weiterer Konstruktionen und ihrer Verbindungen ein zunehmend deutlicheres Bild über die Schadensanfälligkeit des gesamten Bauegefüges ab.

Damit begründet sich der Bedarf bereits existierende Fügeprinzipien, wie etwa mehrstufige Abdichtungskonzepte für den Bauwerksanschluss von Fenstern, und marktgängige Systeme gegenüber zu stellen und hinsichtlich ihres Verhaltens gegenüber der außergewöhnlichen Einwirkung Hochwasser eingehend zu erproben. Ein Ansatz ist mehrere Sicherungsebenen vorzusehen, da zum einen bei der handwerklichen Ausführung unter Baustellenbedingungen in der Praxis Qualitätsabweichungen und Maßtoleranzen unvermeidbar sind und die erforderliche, exakte Umsetzung nur bei industrieller Fertigung unter stets identischen Rand- und Rahmenbedingungen möglich ist. Zum anderen beeinflussen nachträgliche, baupraktische Verformungen der Bauteile die Qualität und somit die Schadensanfälligkeit der Bauanschlussfugen. Die Durcharbeitungstiefe potentieller Lösungen sollte, analog zu den in dieser Arbeit dargestellten Mauerwerkskonstruktionen, bis zur praktischen Ausführungsreife reichen, denn ein hochwasserangepasster Gebäudeentwurf muss neben der Festlegung beständiger Materialien auch zwingend geeignete Verbindungs- und Fügetechniken beinhalten.

Nutzen-Kosten-Analyse

Eine bedeutende Hürde für die Umsetzung von Maßnahmen der Bauvorsorge bildet oftmals die unzureichende Transpa-

renz ihres zu erwartenden Effizienzwertes. Die Zurückhaltung insbesondere von privaten Akteuren, etwa von Gebäudeeigentümern oder deren legitimierten Vertretern, bei der technischen Realisierung ist nur dann abzubauen, wenn neben der fundierten Beurteilung der Schadensanfälligkeit des Ist-Zustandes und dem transparenten Nachweis der Effektivität spezifischer Anpassungsmaßnahmen für den Soll-Zustand, auch die ökonomische Effizienz jeder Maßnahme finanzmathematisch klar belegbar ist. Dieser bedeutsame Aspekt bedarf der weiteren Auseinandersetzung in Wissenschaft und Planungspraxis, um einerseits substantielle Impulse zur Förderung der Bauvorsorge zu setzen und andererseits aber auch, um klare Grenzen der Gebäudeanpassung zu ziehen, außerhalb derer Maßnahmen und ihre Kombinationen nachweislich unwirtschaftlich sind.

Ein geeignetes mathematisch-statistisches Verfahren ist die Nutzen-Kosten-Analyse, deren Grundzüge im Abschnitt 4.3.4 erläutert sind. Das Verfahren beruht auf dem Wirtschaftlichkeitsprinzip, das heißt je größer das Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand ist, desto höher ist der Effizienzwert der betrachteten Anpassungsoption. Der Effizienznachweis in seiner Grundform umfasst

- die Ermittlung der potentiellen, direkt tangiblen Hochwasserfolgen (Wiederherstellungskosten für Sachschäden) für den Ist-Zustand von Konstruktionen und Gebäuden, deren Intensität stets mit ihrer spezifischen Schadensanfälligkeit verknüpft ist,
- die Kalkulation der Planungs-, Herstellungs- und Unterhaltungskosten einer Anpassungsmaßnahme sowie
- die Bestimmung der potentiellen, direkt tangiblen Hochwasserfolgen (Wiederherstellungskosten für Sachschäden) für den Soll-Zustand.

In Abhängigkeit der Fragestellung sind in den Effizienznachweis jedoch noch weitere Parameter einzubinden, die zum Teil mit signifikanten Unsicherheiten behaftet oder durch Bandbreiten charakterisiert sind. Diese bedürfen zukünftig einer weiterführenden Betrachtung. Zu den Parametern zählen zum Beispiel

- die sich verändernden Einwirkungen, wie etwa die Verschärfung meteorologisch bedingter Naturgefahren als Folge des anthropogenen Klimawandels,

- die zu erwartenden indirekt tangiblen Hochwasserfolgen, wie etwa Mietausfälle oder eine, je nach Region oder Stadt, schlechtere Vermietbarkeit,
- der Lebenszyklus von Konstruktionen und deren Anpassungsoptionen,
- der Investitionszeitpunkt,
- die zukünftige Kosten- und Zinsentwicklung,
- die Verschärfung von Nachhaltigkeitsprinzipien durch die Einführung neuer ordnungsrechtlicher Vorschriften wie etwa zur Energieeinsparung oder
- die Leit- und Richtlinien in der Umwelt- und Baupolitik (staatliche Aufbauhilfen nach Ereignissen, Förderprogramme usw.).

Nutzen-Kosten-Untersuchungen sind im strengen ökonomischen Wettbewerb ein wesentliches Instrument zur Unterstützung rationaler, objektiver Entscheidungen. Ohne einen belastbaren Nachweis der Wirtschaftlichkeit werden sich auch technisch ausgereifte Lösungen nicht etablieren.

10 Glossar

Feuchte

Der massebezogene Feuchtegehalt ist das Verhältnis der Masse des Wassers im feuchten Baustoff zur Masse des darrtrockenen Baustoffs.

massebezogener Feuchtegehalt

$$u = \frac{m_f - m_{tr}}{m_{tr}} * 100 \%$$

Darin sind:

- u massebezogener Feuchtegehalt in [M.-%]
- m_f Masse des feuchten Baustoffs in [kg]
- m_{tr} Masse des darrtrockenen Baustoffs in [kg]

Der volumenbezogene Feuchtegehalt ist das Verhältnis des Volumens des Wassers im feuchten Baustoff zum Volumen des darrtrockenen Baustoffs.

volumenbezogener Feuchtegehalt

$$\psi = \frac{V_W}{V_{tr}} * 100 \% = u * \frac{\rho_{Stoff}}{\rho_W} * 100 \%$$

Darin sind:

- ψ volumenbezogener Feuchtegehalt in [V.-%]
- V_W Volumen des enthaltenen Wassers in [m³]
- V_{tr} Volumen des darrtrockenen Baustoffs in [m³]
- ρ_{Stoff} Dichte des Baustoffs in [kg/m³]
- ρ_W Dichte von Wasser = 1.000 kg/m³
- u massebezogener Feuchtegehalt in [M.-%]

Im Zusammenhang mit Hohlblock- und Lochsteinen ist zwischen der Steinrohddichte, bezogen auf das Volumen des Steins einschließlich Löcher oder Hohlkammern, und der Scherbenrohddichte, bezogen auf das Volumen des massiven Materials, zu unterscheiden.

Die Gleichgewichtsfeuchte beziehungsweise Ausgleichsfeuchte kennzeichnet den Feuchtegehalt eines Baustoffs, der sich allmählich bei einer Lagerung in Luft mit konstanter relativer Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur einstellt. Der Feuchtegehalt wird durch einen Index gekennzeichnet (zum Beispiel u_{50}), der dem Zahlenwert derjenigen relativen Luftfeuchtigkeit entspricht, mit welcher der Baustoff im Gleichgewicht steht.

Gleichgewichtsfeuchte

**Praktischer
Feuchtegehalt**

Nach DIN 4108-4 kennzeichnet der praktische Feuchtegehalt die Wassermenge in einem Baustoff, die bei einer Untersuchung einer hinreichenden Anzahl von genügend getrockneten Gebäuden, welche zum dauernden Aufenthalt dienen, in 90 % aller Fälle nicht überschritten wird. Für die Beurteilung des praktischen Feuchtegehalts wird im Allgemeinen die Ausgleichsfeuchte bei einem Umgebungsklima von 80 % relativer Luftfeuchtigkeit herangezogen. Tabelle 4 in der DIN 4108-4 enthält typische Zahlenwerte für den massebezogenen praktischen Feuchtegehalt ausgewählter Baustoffe.

**Überhygroskopische
Feuchte**

Der Terminus überhygroskopische Feuchte bezeichnet den Wassergehalt, der sich in porösen Baustoffen einstellt, wenn sie sich in einem Umgebungsklima mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von über 95 % oder in Kontakt zu flüssigem Wasser befinden. Die überhygroskopische Feuchte umfasst zwei Bereiche: (i) den Kapillarwasserbereich, der bis zur freien Wassersättigung u_f reicht sowie (ii) den Übersättigungsbereich, der sich von der freien Wassersättigung u_f bis zur maximalen Wassersättigung u_{max} erstreckt.

**Maximaler
Feuchtegehalt**

Der maximale Feuchtegehalt beziehungsweise die maximale Wassersättigung u_{max} entspricht der vollständigen Füllung aller dem Wasser zugänglichen Poren eines Baustoffs. Dieser Feuchtegehalt stellt sich lediglich unter Druck, bei Tauwasserbildung oder bei langfristiger Lagerung unter Wasser ein.

Freie Wassersättigung

Demgegenüber entspricht die freie Wassersättigung u_f der Wassermenge, die ein Baustoff aufnimmt, wenn er einige Zeit der Einwirkung von drucklosem Wasser ausgesetzt ist. Grobporige, wasserbenetzbare Stoffe durchfeuchten rasch und vollständig ($u_f = u_{max}$). Bei hydrophilen, feinporigen Stoffen, das heißt bei nahezu allen mineralischen Baustoffen, stellt sich zunächst eine Teildurchfeuchtung ein, die bei ständiger, druckloser Wasserbeanspruchung erst im Verlauf mehrerer Jahre den maximalen Feuchtegehalt erreicht. Das Eindringen des Wassers verhindert die in den Porenräumen eingeschlossene Luft, die lediglich durch Diffusion in das Porenwasser entweicht. Dieser Vorgang dauert unter natürlichen Bedingungen sehr lange.

Der Durchfeuchtungsgrad bezeichnet das Verhältnis des massebezogenen Wassergehalts u zur maximalen Wassersättigung u_{max} des Baustoffs.

$$DFG = \frac{u}{u_{max}} * 100\%$$

Der Durchfeuchtungsgrad gibt an, welcher Anteil in % des für Wasser zugänglichen Porenvolumens gefüllt ist.

Hochwasser

Nach § 72 Wasserhaushaltsgesetz und Artikel 2 der Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken ist Hochwasser die zeitlich begrenzte Überschwemmung [Überflutung] von normalerweise nicht mit Wasser bedecktem Land durch oberirdische Gewässer oder durch die Küstengebiete eindringendes Meerwasser.

Der DIN 4049-3 folgend, ist Hochwasser der Zustand in einem oberirdischen Gewässer, bei dem der Wasserstand beziehungsweise der Durchfluss einen bestimmten (Schwellen-) Wert erreicht oder überschritten hat.

Resilienz

Die Mehrzahl umwelt- und ingenieurwissenschaftlicher Literaturquellen verwendet zwei Definitionen für den Begriff Resilienz, die Holling (1996) gegenübergestellt. „Engineering resilience“ beschreibt Systeme, die elastisch auf Störungen reagieren können, das heißt in einen stabilen Zustand nahe dem ursprünglichen Gleichgewichtszustand übergehen und nach der Störung schnell zum Ausgangszustand zurückkehren.²⁷² „Ecological resilience“ fokussiert hingegen auf Systeme, die nach einer bestimmten Magnitude einer Störung ihre Eigenschaften (zum Beispiel Strukturen, Prozesse, Verhalten) verändern und dauerhaft in einen anderen stabilen Zustand übergehen.²⁷³ Aus ingenieurwissenschaftlicher Perspektive beschreibt der Begriff Resilienz folglich die Fähigkeit eines physischen Systems seine Funktionsfähigkeit

²⁷² Vergleiche zum Beispiel Pimm (1984), Holling (1996)

²⁷³ Vergleiche zum Beispiel Holling (1973)

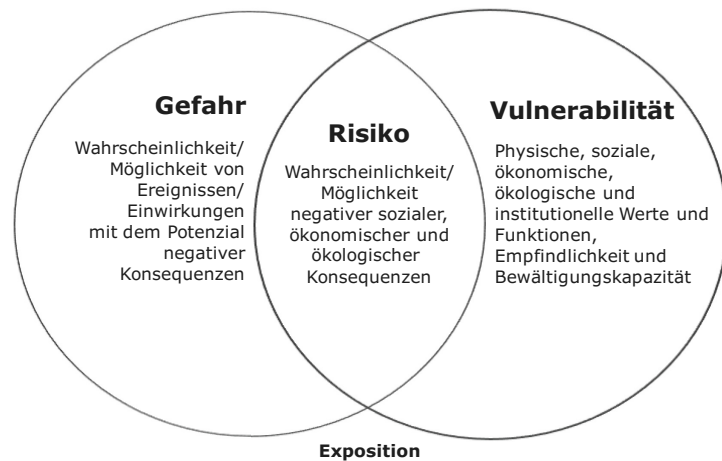
nach einer Störung schnell wieder zu erlangen.²⁷⁴ Im Kontext der Hochwasserschadensforschung werden unter dem Begriff Resilienz alle Maßnahmen subsumiert, welche die negativen Auswirkungen am baukonstruktiven Gefüge und an der Haustechnik eines Gebäudes infolge von Umwelteinwirkungen reduzieren.²⁷⁵

Risiko

In der Wissenschaft sind in Abhängigkeit der jeweiligen Fachdisziplin mit dem Begriff Risiko unterschiedliche thematische Konzepte verbunden.²⁷⁶ Wirkungszusammenhänge, deren Kausalität sich quantitativ abschätzen und deren Auftreten sich als Wahrscheinlichkeit angeben lässt, werden in Umwelt- und Ingenieurwissenschaften als „bestimmtes Risiko“ bezeichnet.²⁷⁷

Bild 83

Bestimmtes und unbestimmtes Risiko als Überlagerung von Gefahr und Vulnerabilität nach Schanze (2006).



Risiko lässt sich, entsprechend Bild 83, als Wahrscheinlichkeit / Möglichkeit negativer sozialer, ökonomischer und ökologischer Konsequenzen formulieren. Sein Zustandekommen hängt von der Exposition ab, also dem sachlichen, räumlichen und zeitlichen Zusammentreffen von Gefahr und Vulnerabilität.²⁷⁸ Die Gefahr beschreibt dabei die Wahr-

²⁷⁴ Vergleiche zum Beispiel Gouldby und Samuels (2009)

²⁷⁵ Vergleiche zum Beispiel Bowker et al. (2007)

²⁷⁶ Vergleiche zum Beispiel WBGU (1999), Renn (2008), Schanze und Daschkeit (2013)

²⁷⁷ Vergleiche zum Beispiel WBGU (1999)

²⁷⁸ Vergleiche zum Beispiel Amman (2006), Samuels et al. (2009)

scheinlichkeit von Ereignissen mit einer definierten Ausprägung, die Vulnerabilität den Wert beziehungsweise die Funktion, die Empfindlichkeit und die Bewältigungskapazität eines Rezeptors.²⁷⁹ Nachdem die Wahrscheinlichkeit und Möglichkeit sich auf Ereignisse beziehungsweise auf Folgen mit unterschiedlicher Magnitude beziehen kann, werden Risiken häufig nicht für Einzelereignisse, sondern für das Integral einer Reihe von Ereignissen angegeben.

Schadensanfälligkeit

siehe physische Vulnerabilität

Schaden und Schadenserwartungswert

Der Terminus Schaden bezeichnet im Allgemeinen die Zerstörung oder Minderung von konkreten oder abstrakten Werten. Die Folgen extremer Umweltereignisse, wie etwa Hochwasser oder Starkregen, sind an vulnerablen Gebäuden und deren Bauteilen oftmals negative Veränderungen, die als Schäden wahrgenommen werden. Eine objektive Schadensbestimmung nach einem Umweltereignis ist etwa für die Zahlungsleistung einer Versicherung üblich.

Durch Multiplikation der Schadenshöhe mit der Eintrittswahrscheinlichkeit ergibt sich der Erwartungswert des Schadens. Schadenserwartungswerte ermöglichen es, unterschiedliche Risiken miteinander zu vergleichen und abzuwägen, sofern sie in einen einheitlichen Maßstab (zum Beispiel Kosten) überführbar sind. Man kann in diesem Fall auch von einem „kalkulierbaren Risiko“ sprechen. Das Rechnen mit Erwartungswerten ist ein gängiges Verfahren in ökonomischen Bewertungen. Dadurch lässt sich gewährleisten, dass die Abwägung zwischen Kosten und Nutzen gesamtwirtschaftlich zu konsistenten Entscheidungen bezüglich Risikominierungsmaßnahmen führt. Grundlage einer solchen Vorgehensweise ist die Annahme der Risikoneutralität. Risikoneutralität bedeutet, dass die Bewertung des Risikos nur vom Erwartungswert – also dem Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß – abhängt, nicht aber davon, ob eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit mit einem hohen Schadensausmaß oder eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit mit einem geringen Schadensausmaß einhergeht.

²⁷⁹ Vergleiche zum Beispiel Schanze (2009)

Skalierungsmethoden

Die Nominalskala dient ausschließlich der Klassifikation qualitativer Merkmalsausprägungen, welche sich zwar eindeutig in Kategorien unterscheiden lassen (zum Beispiel Farbe von Oberflächen), jedoch keinen mathematischen Wert annehmen. Die Analyse nominalskalierten Daten beschränkt sich daher auf Häufigkeitsanalysen (Angabe des Modus als Lageparameter möglich) und die Prüfung der Gleichheit beziehungsweise Ungleichheit. Die Merkmale können nicht in eine Rangfolge gebracht werden.

Diese Ordinalskala erlaubt die Ordnung der Untersuchungsobjekte nach ihrem Rang (zum Beispiel Rating A ist besser als Rating B), sagt jedoch nichts über das Ausmaß der Unterschiede aus. Zulässige mathematische Operationen bei ordinalskalierten Daten sind zum Beispiel die Bestimmung der beiden Lageparameter Modus und Median. Beispiel: Schulnoten.

Die Intervallskala wird eine Maßeinheit vorausgesetzt, so dass der Abstand zwischen zwei Zahlen oder die Differenz zweier Zahlen eine Bedeutung bekommt (zum Beispiel Temperaturmessung in Grad Celsius). Es existiert jedoch kein natürlicher Nullpunkt. Ein arithmetisches Mittel ist berechenbar und bietet eine sinnvolle Interpretation.

Die Verhältnisskala bildet das höchste Skalenniveau. Sie hat im Vergleich mit der Intervallskala zusätzlich einen eindeutig festgelegten Nullpunkt zum Beispiel Höchstgeschwindigkeit eines Fahrzeugs). Intervall- und Verhältnisskalen werden oft zu metrischen Skalen beziehungsweise Kardinalskalen zusammengefasst.

Systemverhalten

Ein Modell ist ein Abbild der Wirklichkeit, eine Repräsentation eines Systems. Nach Keitel (2011) wird unter einem System ein abgeschlossener Teil der (physikalischen) Umwelt bezeichnet. Keitel (2011) führt weiter aus, dass Systeme aus einzelnen Elementen beziehungsweise Teilsystemen, deren wechselseitigen Beziehungen untereinander sowie der Wechselwirkung des Systems mit der Umwelt, bestehen. Ein Modell ist nicht dafür konzipiert, alle Merkmale des Systems wiederzugeben. Folglich wird stets ein Aus-

schnitt der Realität dargestellt und das Systemverhalten approximiert. Dabei dient das Modell dem Zweck der Beschreibung eines Systems.

Physische Vulnerabilität

Dem Glossar der ARL (2013) folgend, umfasst der Begriff Vulnerabilität im Allgemeinen physische, soziale, ökonomische, umweltbezogene und institutionelle Strukturen und Prozesse, welche die Anfälligkeit sowie die Bewältigungs- und Anpassungskapazitäten eines Systems oder Objekts hinsichtlich des Umgangs mit Gefahren bedingen. Eine Übersicht über mehr als 30 Definitionen für den Begriff Vulnerabilität enthält zum Beispiel Thywissen (2006).

Die physische Vulnerabilität (Schadensanfälligkeit) bezieht sich auf die nachteiligen, physikalischen Folgen für eine Baukonstruktion gegenüber einer definierten Hochwasserereigniswirkung. Zu diesen nachteiligen Folgen zählen etwa Strukturveränderungen in Materialien, die zum Beispiel zu einer Minderung der Festigkeitswerte oder zur unerwünschten Beeinflussung bauphysikalischer Eigenschaften führen können.

11 Literatur- und Quellenverzeichnis

11.1 Monographien und Aufsätze

- Ahnert & Krause 2000a Ahnert, R., & Krause, K. H. (2000a). Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960: Zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz. Band 1: Gründungen, Abdichtungen, tragende massive Wände, Gesimse, Hausschornsteine, tragende Wände aus Holz, alte Maßeinheiten. 6. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen.
- Ahnert & Krause 2000b Ahnert, R., & Krause, K. H. (2000b). Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960: Zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz. Band 2: Holzbalkendecken, Massivdecken, Deckenregister, Fußböden, Erker und Balkone, Verkehrslasten im Überblick. 6. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen.
- Ahnert & Krause 2000c Ahnert, R., & Krause, K. H. (2000c). Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960: Zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz. Band 3: Unterzüge und Gurtbogen, Pfeiler und Stützen, Treppen, Dächer und Dachtragwerke, Dachaufbauten aus Holz, Lastannahmen zum Dach. 6. Auflage. Berlin: Verlag für Bauwesen.
- Albrecht & Koppold 2010 Albrecht, W., & Koppold, S. (2010). Langzeitverhalten von Dämmstoffen. In: N. A. Fouad (Ed.) Bauphysik-Kalender 2010, 10. Jahrgang. Berlin: Ernst & Sohn.
- Alfes & Schäfers 2014 Alfes, C., & Schäfers, M. (2014). Bauphysikalische und mechanische Aspekte von Mauerwerk nach Flutkatastrophen. Mauerwerk, 18 (5), 304-313.
- Amman 2006 Ammann, W. J. (2006). Risk concept, integral risk management and risk governance. In: W. J. Ammann, S. Dannenmann, & L. Vulliet (Eds.) Risk21 – Coping with Risk due to natural hazards in the 21st Century, (pp. 3-24). London: Taylor and Francis Group.
- ARL 2013 ARL (2013). Glossar Klimawandel und Raumentwicklung. 2., überarbeitete Fassung. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL).
- Aschaber et al. 2007 Aschaber, M., Feist, C., & Hofstetter, G. (2007). Numerische Simulation des Brandverhaltens von Betontragwerken unter Brandeinwirkung. Beton- und Stahlbetonbau, 102 (9), 578-587.
- Ashley et al. 2007 Ashley, R., Garvin, S., Pasche, E., Vassilopoulos, A., & Zevenbergen, C. (Eds.) (2007). Advances in Urban Flood Management. London: Taylor & Francis.
- ASTM 1982 ASTM (Ed.) (1982). Special Technical Publication 779: Moisture migration in buildings. West Conshohocken, Philadelphia: American Society for Testing and Materials (ASTM) International.
- Bagda 2000 Bagda, E. (2000). Biozide in Bauteilbeschichtungen. Renningen: Expert Verlag.
- BBR 2004 BBR (Ed.) (2004). Bauliche Schutz- und Vorsorgemaßnahmen in hochwassergefährdeten Gebieten. Bonn, Berlin: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).
- Beneke 2000 Beneke, H. (2000). Lexikon der Korrosion und des Korrosionsschutzes. 2. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag.
- BfG 2002 BfG (Ed.) (2002). Das Augusthochwasser 2002 im Elbegebiet. Koblenz: Bundesamt für Gewässerkunde (BfG).
- Blanco & Schanze 2012 Blanco, A., & Schanze, J. (2012). Conceptual and Methodological Frameworks for Large Scale and High Resolution Analysis of the Physical Flood Vulnerability of Buildings. In: F. Klijn, & T. Schweckendiek (Eds.) Comprehensive Flood Risk Management: Research for Policy and Practice. Proceedings of the 2nd European Conference on Flood Risk Management, FLOODrisk2012, Rotterdam (The Netherlands), 19-23 November 2012, (pp. 148-150). Boca Raton: CRC Press.
- Bludau et al. 2010 Bludau, C., Zirkelbach, D., & Künzel, H. (2010). Berechnung des instationären hydrothermischen Verhaltens mehrschichtiger Bauteile – feuchtesichere Pla-

nung nach EN 15026. Tagungsband zur Bauphysik-Tagung 2010 der Ingenieurakademie West e.V. – Fortbildungswerk der Ingenieurkammer-Bau NRW, Düsseldorf, 09 November 2010, (pp. 17-35).

- Blum & Gruhler 2011 Blum, A., & Gruhler, K. (2011). Typologies of the built environment and the example of urban vulnerability assessment. In: B. Müller (Ed.) German Annual of Spatial Research and Policy 2010 – Urban Regional Resilience: How Do Cities and Regions Deal with Change?, (pp. 147-150). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- BMUB 2015 BMUB (Ed.) (2015). Hochwasserschutzfibel – Objektschutz und bauliche Vorsorge. 6. Auflage. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB).
- BMVBS 2013 BMVBS (Ed.) (2013). Hochwasserschutzfibel – Objektschutz und bauliche Vorsorge. 5. Auflage. Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).
- Bowker 2007 Bowker, P. (2007). Flood Resistance and Resilience Solutions: an R&D Coping Study. London: Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA).
- Bowker et al. 2007 Bowker, P., Escarameia, M., & Tagg, A. (2007). Improving the Flood Performance of new Buildings – Flood Resilient Construction. London: RIBA Publishing.
- Brameshuber&Graubohm2008 Brameshuber, W., & Graubohm, M. (2008). Forschungsbericht F 917 – Instandsetzung wasserbeaufschlagter Mauerwerksbauteile – Einfluss einer Wasserbeaufschlagung auf Eigenschaften von Mauerwerk und Bauteilbekleidungen, Austrocknungsmaßnahmen und deren Wirkung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Bramley & Bowker 2002 Bramley, M., & Bowker, P. (2002). Improving Local Flood Protection to Property. Civil Engineering, 150 (5), 49-55.
- Brand & Jax 2007 Brand, F. S., & Jax, K. (2007). Focusing the meaning(s) of resilience: Resilience as a descriptive concept and a boundary object. Ecology and Society, 12 (1). Available from: <http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss1/art23/> [Accessed 20 September 2014].
- Brauch 2011 Brauch, H. G., & Oswald-Spring, U. (2011). Introduction: Coping with Global Environmental Change in the Anthropocene. In: H. Brauch, U. Oswald-Spring, C. Mesjasz, J. Grin, P. Kameri-Mbote, B. Chourou, P. Dunay, & J. Birkmann (Eds.) Coping with Global Environmental Change, Disasters and Security, (pp. 31-60). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- BRE 1997a BRE (Ed.) (1997a). BRE Good Repair Guide 11: Repairing Flood Damage Part 1-4. Watford: Building Research Establishment (BRE) Press.
- BRE 1997b BRE (Ed.) (1997b). BRE Good Repair Guide 23: Assessing External Renders for Repair and Replacement. Watford: Building Research Establishment (BRE) Press.
- BRE 1997c BRE (Ed.) (1997c). BRE Good Repair Guide 24: Repairing external Render. Watford: Building Research Establishment (BRE) Press.
- BRE 2006 BRE (Ed.) (2006). Repairing Flooded Buildings: An Insurance Industry Guide to Investigation and Repair. Watford: Building Research Establishment (BRE) Press.
- Breit & Adams 2013 Breit, W., & Adams, R. (2013) Baustoffliche Grundlagen. In: H. Patt, & R. Jüpner (Hrsg.) Hochwasser-Handbuch – Auswirkungen und Schutz. (pp. 239-312). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg Verlag.
- BSI 2005 BSI (Ed.) (2005). PAS 64 – Professional water mitigation and initial restoration of domestic dwellings. Code of Practice. British Standard Institution (BSI).

- Bundesregierung 2008 Bundesregierung (2008). Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Berlin: Bundesregierung.
- Burkert 2012 Burkert, T. (2012). Hochwasserschutz-Ertüchtigung an historischen Mauerwerksgebäuden am Beispiel des historischen Gebäudeensembles der Stadt Grimma. In: W. Jäger (Hrsg.) Mauerwerk-Kalender 2012: Eurocode 6. Berlin: Ernst & Sohn Verlag.
- Burkert et al. 2011 Burkert, T., Plagge, R., & Bobbe, A. (2011). Hochwasserschutz an denkmalgeschützten Gebäuden – dargestellt am Beispiel der Alten Amtshauptmannschaft in Grimma. Mauerwerk, 15 (2), 109-117.
- Buss 1994 Buss, H. (1994). Aktuelles Tabellenhandbuch Feuchte, Wärme, Schall mit Formeln und Erläuterungen, 2. Auflage. Augsburg: WEKA Baufachverlage GmbH, Verlag für Architektur.
- Buss 2002 Buss, H. (2002). Das Tabellenhandbuch zum Wärme- und Feuchteschutz – Formeln, Tabellen und Erläuterungen unter Berücksichtigung der neuen EnEV. Augsburg: WEKA Baufachverlage GmbH, Verlag für Architektur.
- Cammerer 1995 Cammerer W. F. (1995). Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie. 5. Auflage. Berlin: Springer Verlag.
- CIRIA 2001 CIRIA (Ed.) (2001). After a Flood. How to Restore your Home. London: Construction Industry Research and Information Association (CIRIA).
- Czernin 1977 Czernin, W. (1977). Zementchemie für Bauingenieure. Wiesbaden: Bauverlag.
- Deplazes 2008 Deplazes, A. (2008). Architektur konstruieren: Vom Rohmaterial zum Bauwerk. Ein Handbuch. 3. erweiterte Auflage. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser-Verlag.
- Douglas et al. 2010 Douglas, I., Garvin, S., Lawson, N., Richards, J., Tippet, J., & White, I. (2010). Urban pluvial flooding: a quantitative case study of cause, effect and nonstructural mitigation. Journal of Flood Risk Management, 3 (2), 112-125.
- Dutschk 2000 Dutschk, V. (2000). Oberflächenkräfte und ihr Beitrag zu Adhäsion und Haftung in glasfaserverstärkten Thermoplasten. Dissertation, Technische Universität Dresden.
- DWA 2008 DWA (Ed.) (2008). Arbeitshilfe: Hochwasserschadensinformationen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- DWA 2016 DWA (Ed.) (2016). Merkblatt DWA-M 553: Hochwasserangepasstes Planen und Bauen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- Eisenführ et al. 2010 Eisenführ, F., Weber, M., & Langen, T. (2010). Rationales Entscheiden. 5. Auflage. Berlin: Springer Verlag.
- Escarameia et al. 2006 Escarameia, M., Karanxha, A., & Tagg, A. (2006). Improving the flood resilience of buildings through improved materials, methods and details. Tech. rep., DCLG Building Regulations (Sanitation) Framework, Work Package 5 – Laboratory tests, Final report.
- Escarameia et al. 2007 Escarameia, M., Karanxha, A., & Tagg, A. (2007). Quantifying the flood resilience properties of walls in typical UK dwellings. Building Serv. Eng. Res. Technol., 28 (3), 249-263.
- Escarameia et al. 2013 Escarameia, M., Tagg, A., Walliman, N., Zevenbergen, C., & Anvarifar, F. (2013). The Role of Building Materials in Improved Flood Resilience and Routes for Implementation. In: F. Klijn, & T. Schweckendiek (Eds.) Comprehensive Flood Risk Management: Research for Policy and Practice. Proceedings of the 2nd European Conference on Flood Risk Management, FLOODrisk2012, Rotterdam (The Netherlands), 19-23 November 2012, (pp. 333-334). Boca Raton: CRC Press.

- ETHZ 2002 ETH Zürich (Hrsg.) (2002). Werkstoffeigenschaften. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule (ETH).
- Fahrion et al. 2012 Fahrion, M.-S., Nikolowski, J., Zimm, J., & Naumann, T. (2012). Relevante Einwirkungen auf Gebäude. In: B. Weller, T. Naumann, & S. Jakubetz (Eds.) Gebäude unter den Einwirkungen des Klimawandels, Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM – Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden, Heft 3. Berlin: Rhombos-Verlag.
- FEMA 1993a FEMA (Ed.) (1993a). Non-Residential Floodproofing – Requirements and Certification for Buildings Located in Special Flood Hazard Areas in accordance with the National Flood Insurance Program. Washington D.C.: Federal Emergency Management Administration (FEMA).
- FEMA 1993b FEMA (Ed.) (1993b). Wet Floodproofing Requirements for Structures Located in Special Flood Hazard Areas in accordance with the National Flood Insurance Program. Technical Bulletin 7-93. Washington D.C.: Federal Emergency Management Administration (FEMA).
- FEMA 1998 FEMA (Ed.) (1998). Homeowner's Guide to Retrofitting – Six Ways to Protect your Home from Flooding. Washington D.C.: Federal Emergency Management Administration (FEMA).
- FEMA 2008 FEMA (Ed.) (2008). Flood Damage-Resistant Materials Requirements for Buildings Located in Special Flood Hazard Areas in accordance with the National Flood Insurance Program. Washington D.C.: Federal Emergency Management Administration (FEMA).
- Fischer et al. 2008 Fischer, H.-M., Freymuth, H., Häupl, P., Homann, M., Jenisch, R., Richter, E., & Stohrer, M. (2008). Lehrbuch der Bauphysik. 6. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Fitz & Krus 2004 Fitz, C., & Krus, M. (2004). Normenwirrwarr bei der Bestimmung von feuchte-technischen Materialkennwerten. IBP-Mitteilungen 31 (2004). Neue Forschungsergebnisse, kurz gefasst. Fraunhofer Institut für Bauphysik.
- Fitz & Künzel 2009 Fitz, C., & Künzel, H. (2009). Alterungsverhalten von Mineralwolleplatten in Wärmedämmverbundsystemen. Bauphysik 31 (3), 186-191.
- Frick/Knöll 1 2006 Neumann, D., & Weinbrenner, U. (2006). Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1. 34. Auflage. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag.
- Frick/Knöll 2 2004 Neumann, D., Weinbrenner, U., Hestermann, U., & Rongen, L. (2004). Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 2. 32. Auflage. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag.
- Gabalda et al. 2013 Gabalda, V., Garvin, S., Hunter, K., Florence, C., Salagnac, J.-L., Golz, S., ten Veldhuis, M.-C., Diez, J., & Monnot, J. V. (2013). Flood resilience technologies. Deliverable D2.3 of the EU-FP7 Research Project 'Smart Resilient Technology, Systems and Tools' (SMARTeST). [online]. Available from: www.floodresilience.eu. [Accessed 20 September 2014].
- Gamerith & Höfler 2006 Gamerith, H., & Höfler, K. (2006). Präventiver Hochwasserschutz – Planungsgrundsätze [Preventive flood protection – Planning Principles]. Technical Report. Graz: ARGE Gamerith/Höfler.
- Garvin 2012a Garvin, S. (2012a). Flood Resilient Building – Part 1: Legislation, planning, flood-risk assessment and performance of buildings. Watford: Building Research Establishment (BRE) Press.
- Garvin 2012b Garvin, S. (2012b). Flood Resilient Building – Part 2: Building in flood-risk areas and designing flood-resilient buildings. Watford: Building Research Establishment (BRE) Press.
- Garvin & Kelly 2007 Garvin, S., & Kelly, D. (2007). Flood repair standards for buildings. In R. Ashley, E. Pasche, A. Vassilopoulos, & C. Zevenbergen (Eds.) Advances in Urban Flood Management. London: Taylor & Francis.

- Garvin et al. 2005 Garvin, S., Reid, J., & Scott, M. (2005). Standards for the Repair of Buildings Following Flooding. CIRIA publication C623. London: Construction Industry Research and Information Association (CIRIA).
- Gertis und Holm 2014a Gertis, K., & Holm A. (2014). Zur Messung der Wärmeleitfähigkeit feuchter Stoffe. *Bauphysik*, 36 (1), 27-39.
- Gertis und Holm 2014b Gertis, K., & Holm A. (2014). Zur Wärmeleitfähigkeits-Messung feuchter Stoffe bei beidseitig feuchtebedingtem Probenabschluss. *Bauphysik*, 36 (4), 196-199.
- Golz et al. 2015 Golz, S., Schinke, R., & Naumann, T. (2015). Assessing the effects of flood resilience technologies on building scale. *Urban Water Journal [Special Issue: Towards more flood resilient cities]*, 12 (1), 30-43.
- Golz et al. 2013 Golz, S., Schinke, R., Naumann, T., Garvin, S., & White, I. (2013). Assessing the Effects of Flood Resilient Technologies. In: S. Djordjevic, D. Butler, S. Kurzbach, O. Mark, & P. Gourbesville (Eds.) *Proceedings of the International Conference on Flood Resilience: Experiences in Asia and Europe*, Exeter (United Kingdom), 5-7 September 2013. Exeter.
- Golz et al. 2012 Golz, S., Schinke, R., & Naumann, T. (2012). Flood resilience properties of building constructions. In: S. Garvin, N. Evelpidou, A. Vassilopoulos, & A. Toumazis (Eds.) *Proceedings of the SMARTeST International Conference on Implementing Flood Resilience*, Athens (Greece), 27-28 September 2012. Athens.
- Golz et al.2011 Golz, S., Nikolowski, J., & Naumann, T. (2011). Flood Vulnerability Analysis of Settlement Structures – Findings from UK and German Case Studies. In: G. Zens, & R. Hornich (Eds.) *UFRIM Urban Flood Risk Management – Approaches to enhance resilience of communities*, *Proceedings of the International Symposium, Graz (Austria)*, 21-23 September 2011, (pp. 245-250). Graz: Verlag der Technischen Universität.
- Gouldby & Samuels 2009 Gouldby, B., & Samuels, P. (2009). Language of risk – project definitions (2nd edition). FLOODsite project report T32-04-01. FLOODsite Consortium.
- Grünewald 2005 Grünewald, U. (2005). Vom Hochwasser-Schutzversprechen zum Hochwasser-Risikomanagement. In: R. Jüpner (Ed.) *Magdeburger Wasserwirtschaftliche Hefte, Band 1*. Aachen: Shaker Verlag.
- Grünewald et al. 2003 Grünewald, U., Kaltfen, M., Schümer, S., Merz, B., Kreibich, H., Petrow, T., Thieken, A. H., Streitz, W., & Dombrowski, W. R. (2003). Hochwasservorsorge in Deutschland – Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbegebiet. *Schriftenreihe des DKKV, Heft 29*. Bonn: Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e. V. (DKKV).
- Grünig & Kühn 2011 Grünig, R., & Kühn, R. (2011). *Methodik der strategischen Planung: Ein prozessorientierter Ansatz für Strategieplanungsprojekte*. 6. überarb. und erw. Auflage. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt Verlag.
- Grunewald 2006 Grunewald, J., & Plagge, R. (2006). Rechnerische Bewertung von Trocknungsverfahren für hochwassergeschädigtes Mauerwerk. *Bauphysik*, 28 (2), 88-95.
- Hegner & Kerz 2010 Hegner, H.-D., & Kerz, N. (2010). Nachhaltiges Bauen in Deutschland – Bewertung des Bundes für Büro- und Verwaltungsgebäude. *Mauerwerk*, 14 (4), 195-207.
- Heinrichs & Grunenberg 2007 Heinrichs, H., & Grunenberg, H. (2007). *Risikokultur – Kommunikation und Repräsentation von Risiken am Beispiel extremer Hochwasserereignisse: Schlussbericht*. Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).
- Hohmann et al. 2004 Hohmann, R., Setzer, M. J., Wehling (2004). *Bauphysikalische Formeln und Tabellen – Wärmeschutz, Feuchteschutz, Schallschutz*. 4. neu bearbeitete Auflage. München: Werner Verlag.
- Holling 1973 Holling, C. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 2-23.

- Holling 1996 Holling, C. (1996). Engineering resilience vs. ecological resilience. In: P. Schulze (Ed.) Engineering within ecological constraints, (pp. 31-44). Washington D.C.: National Academy Press.
- Holm et al. 2013 Holm, A. H., Sprengard, C., Simon, H., & Künzel, H. M. (2013). Das Verhalten von Dämmungen bei Hochwasser. Berlin: Gesamtverband Dämmstoffindustrie (GDI).
- Holm et al. 1996 Holm, A. H., Krus, M., & Künzel, H. M. (1996). Feuchtetransport über Materialgrenzen im Mauerwerk. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 2 (5), 375-396.
- ICPR 2002 ICPR (Ed.) (2002). Non-Structural Flood Plain Management – Measures and their Effectiveness. Koblenz: International Commission for the Protection of the Rhine (ICPR).
- IKSR 2002 IKSR (Ed.) (2002). Hochwasservorsorge – Maßnahmen und ihre Wirksamkeit. Koblenz: Eigenverlag der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR).
- IPCC 2014 IPCC (Ed.) (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Jäger et al. 2013 Jäger, W., Masou, R., Bakeer, T., Ortlepp, S., Sobek, W., Haase, W., Bergmann, C., Schuster, H., Altinisik, L., Brenner, V., Mörtl, S., & Thümmler, T. (2013). Entwicklung der Grundprinzipien für voll rezyklierbare, modulare, massive Bauweisen in Breitenanwendung in 0-Energiebasis. Forschungsbericht F 2854. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Jäger 2012 Jäger, W. (Hrsg.) (2012). Mauerwerk-Kalender 2012. 37. Jahrgang. Berlin: Ernst & Sohn.
- Jäger 2006 Jäger, W. (2006). Konstruktionsregeln für Mauerwerk - Teil 2: Anschlussdetails. In: P. Funk (Ed.) Mauerwerk-Kalender 31 (2006), (pp. 231-365). Berlin: Ernst und Sohn.
- Jochimsen 1966 Jochimsen, R. (1966). Theorie der Infrastruktur. Grundlage der marktwirtschaftlichen Entwicklung. Tübingen: J.C.B. Mohr.
- Jüpner & Müller 2009 Jüpner, R., & Müller, U. (Eds.) (2009). Tagungsband zur 1. Veranstaltung des Forums der EU-HWRMRL am 26. Juni 2009 in Dresden. Berichtreihe des Forums zur EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie. Band 1. Aachen: Shaker Verlag.
- Kaesche 2011 Kaesche, H. (2011). Die Korrosion der Metalle: Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme. 4. Auflage. Heidelberg: Springer Verlag.
- Kathmann 2010 Kathmann, M. (2010). Nachhaltiges Bauen in hochwassergefährdeten Bereichen – Angepasste Kriterien für das Bauen und Sanieren von nachhaltigen Quartieren, Freianlagen und Gebäuden im hochwassergefährdeten Bereich der Hamburger Elbe. Masterarbeit, Hochschule Wismar.
- Keitel 2011 Keitel, H. (2011). Bewertungsmethoden für die Prognosequalität von Kriechmodellen des Betons. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar.
- Kelman 2002 Kelman, I. (2002). Physical Flood Vulnerability of Residential Properties in Coastal, Eastern England. Dissertation, University of Cambridge.
- Kelman & Spence 2004 Kelman, I., & Spence, R. (2004). An overview of flood actions on buildings. Engineering Geology, 73 (3-4), 297-309.
- Kühnapfel 2014 Kühnapfel, J. B. (2014). Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Künzel 2003 Künzel, H. (2003). Porenbetonbericht 11 – Wärme- und Feuchteschutz. Wiesbaden: Bundesverband Porenbeton.

- Künzel 1998 Künzel, H. (1998). Zweischaliges Mauerwerk – mit oder ohne Belüftung? Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz, Brandschutz (wksb), 44 (43), 9-14.
- Kidd et al. 2010 Kidd, B., Tagg, A., Escarameia, M., von Christerson, B., Lamond, J., & Proverbs, D. (2010). Guidance and Standards for Drying Flood Damaged Buildings. London: Department for Communities and Local Government (DEFRA).
- Klein & Scholl 2011 Klein, R., & Scholl, A. (2011). Planung und Entscheidung – Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse. München: Verlag Franz Vahlen.
- Knaut & Berg 2005 Knaut, J., & Berg, A. (2005). Handbuch der Bauwerkstrocknung – Ursachen, Diagnose und Sanierung von Wasserschäden in Gebäuden. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Krus et al. 2014 Krus, M., Fitz, C., Künzel, H. M. (2014). Bauphysikalisch optimierte Außenschichten gegen mikrobiellen Bewuchs. In: Venzmer, H. (Hrsg.) Bautenschutz – Innovative Sanierungslösungen, S. 43-63. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
- Krus et al. 2007 Krus, M., Lenz, K., Plagge, R., & Scheffler, G. (2007). Ein Trocknungskoeffizient als neuer hygrothermischer Standardmaterialkennwert. Beitrag zum 12. Bauklimatischen Symposium, TU Dresden, März 2007. Tagungsband 1, S. 283-293.
- Krus 1995 Krus, M. (1995). Feuchttransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe – Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Dissertation, Universität Stuttgart.
- Koch et al. 2006 Koch, A., Clauser, C., Hartmann, A., Jorand, R., Rath, V., Wolf, A., Mottaghy, D., & Pechnig, R. (2006). Erstellung statistisch abgesicherter thermischer und hydraulischer Gesteinseigenschaften für den flachen und tiefen Untergrund in Deutschland: Phase 1 – Westliche Molasse und nördlich angrenzendes Süddeutsches Schichtstufenland. Schlussbericht zum BMU-Projekt FKZ 0329985. Aachen: RWTH Aachen.
- KOM 2009 KOM (2009). Anpassung an den Klimawandel: Ein europäischer Aktionsrahmen. Kommission der europäischen Gemeinschaften.
- Kreibich et al. 2005 Kreibich, H., Thieken, A., Petrow, T., Müller, M., & Merz, B. (2005). Flood Loss Reduction of Private Households due to Building Precautionary Measures – Lessons Learned from the Elbe Flood in August 2002. Natural Hazards and Earth System Sciences, 5, 117-126.
- Künzel 1994 Künzel, H. M. (1994). Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchttransportes in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation. Universität Stuttgart.
- LAWA 1995 LAWA (1995). Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. Hochwasser – Ursachen und Konsequenzen. Stuttgart: Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA).
- Lawson 2011 Lawson, N. (2011). The Flood Risk Management Glossary. Incorporating FLOODsite Glossary (FLOODsite), Flood Mapping Manual Editorial Group Glossary (FMMEP), Urban Flood Management Glossary (UFM), and the SMARTeST Project Glossary (SMARTeST). Technical Report. University of Manchester.
- Lengsfeld & Holm 2007 Lengsfeld, K., & Holm, A. (2007). Entwicklung und Validierung einer hygrothermischen Raumklima-Simulationssoftware WUFI®-Plus. Bauphysik, 29 (3), 178–186.
- Lenz 2009 Lenz, S. (2009). Vulnerabilität kritischer Infrastrukturen. 4. Auflage. Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenvorsorge (BBK).
- Leschnik 1999 Leschnik, W. (1999). Feuchtemessung an Baustoffen – zwischen Klassik und Moderne. Beitrag zum Feuchtetag '99 Umwelt-Messverfahren-Anwendungen,

- Berlin, 7.-8. Oktober 1999. Berlin: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGFzP).
- LfULG 2014 LfULG (Ed.) (2014). Ereignisanalyse Hochwasser Juni 2013. Dresden: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG).
- LfULG 2004 LfULG (Ed.) (2004). Ereignisanalyse – Hochwasser August 2002 in den Ostergebirgsflüssen. Dresden: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG).
- LH DD 2011 LH DD (Ed.) (2011). Plan Hochwasservorsorge Dresden. Dresden: Landeshauptstadt Dresden, Umweltamt.
- Lohmeyer 2001 Lohmeyer, G. C. O. (2001). Praktische Bauphysik. 4. Auflage. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: Teubner Verlag.
- Maier 2012 Maier, J. (2012). Handbuch historisches Mauerwerk – Untersuchungsmethoden und Instandsetzungsverfahren. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Maiwald 2007 Maiwald, H. (2007). Ingenieurmäßige Ermittlung von Hochwasserschadenspotentialen im mikroskaligen Maßstab. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar.
- Merz et al. 2011 Merz, B., Bittner, R., Grünewald, U., & Piroth, K. (2011). Management von Hochwasserrisiken. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers.
- Möller 1993 Möller, U. (1993). Thermo-hygrische Formänderungen und Eigenspannungen von natürlichen und künstlichen Mauersteinen. Dissertation. Universität Stuttgart.
- Müller 2007 Mueller, U. (2007). Sind wir besser vorbereitet? – Fünf Jahre nach der Hochwasserkatastrophe von 2002 in Sachsen. WasserWirtschaft 2007 (07-08), 10-14.
- Müller 2010 Mueller, U. (2010). Hochwasserrisikomanagement – Theorie und Praxis. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Müller et al. 2013 Mueller, A., Landmann, M., & Palzer, U. (2013). Rückgewinnung sortenreiner Baustofffraktionen aus Mauerwerk. Mauerwerk, 17 (6), 357-364.
- MUF 1998 MUF (1998). Hochwasserhandbuch – Leben, Wohnen und Bauen in hochwassergefährdeten Gebieten [Flood manual – living and building in flood-endangered areas]. Mainz: Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz (MUF).
- Munich Re 2009 Munich Re Group (2009). Topics Geo, Naturkatastrophen 2008 – Analysen, Bewertungen, Positionen. München: Munich Re Group.
- MURL 1999 MURL (1999). Hochwasserfibel – Bauvorsorge in hochwassergefährdeten Gebieten [Flood booklet – building precaution in flood-endangered areas]. Düsseldorf: Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (MURL).
- Naumann et al. 2015 Naumann, T., Golz, S., & Schinke, R. (2015). Parametrisierte synthetische Schadensfunktionen zur Abschätzung hochwasserinduzierter Gebäudeschäden. WasserWirtschaft 2015 (9), 28-32.
- Naumann et al. 2013 Naumann, T., Fahrion, M.-S., Nikolowski, J., Günther, B., & Horn, S. (2013). Verletzbarkeitsanalysen im Gebäudebestand. In: B. Weller, T. Naumann, & S. Jakubetz (Eds.) Gebäudeertüchtigung im Detail für den Klimawandel, Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM – Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden, Heft 4. Berlin: Rhombos-Verlag.
- Naumann et al. 2012 Naumann, T., Nikolowski, J., & Golz, S. (2012). Entwicklung analytischer Schadensfunktionen und deren Einsatz in der Projektbewertung. In: DWA (Ed.) DWA Themenheft „Schadensanalysen und Projektbewertungen im Hochwasserrisikomanagement“. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).
- Naumann et al. 2010 Naumann, T., Nikolowski, J., Golz, S., & Schinke, R. (2010). Resilience and Resistance of Buildings and Built Structures to Flood Impacts – Approaches to Analysis and Evaluation. In: B. Müller (Ed.) Urban Regional Resilience: How Do

- Cities and Regions Deal with Change?, German Annual of Spatial Research and Policy, (pp. 89-100). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Naumann et al. 2009a Naumann, T., Nikolowski, J., & Golz, S. (2009a). Der gebäudetypologische VERIS-Elbe-Ansatz zur Ermittlung von Überflutungsschäden an Gebäuden im Klimawandel. In: F. L. Mörsdorf, J. Ringel, & C. Strauß (Eds.) *Anderes Klima, Andere Räume! Zum Umgang mit veränderten Erscheinungsformen des veränderten Klimas im Raum*, (pp. 249-262). Norderstedt: Books on demand.
- Naumann et al. 2009b Naumann, T., Nikolowski, J., & Golz, S. (2009b). Synthetic depth-damage functions – a detailed tool for analysing flood resilience of building types. In: E. Pasche, N. Evelpidou, C. Zevenbergen, R. Ashley, & S. Garvin (Eds.) *Road map towards a flood resilient urban environment. Proceedings of the Final Conference of the COST action C22 Urban Flood Management in cooperation with UNESCO-IHP, Paris (France), 26-27 November 2009*, *Hamburger Wasserbau-Schriften No. 6*. Hamburg: Institut für Wasserbau der TU Hamburg-Harburg.
- Naumann & Rubín 2008 Naumann, T., & Rubín, C. (2008). Ermittlung potenzieller Hochwasserschäden in Pirna nach dem gebäudetypologischen VERIS-Elbe-Ansatz. In: DWA (Ed.) *Tagungsband zum DWA-Seminar - Hochwasserschadensinformationen: Neues und Bewährtes*, (pp. 86-101). Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- Naumann 2007 Naumann, T. (2007). Abschätzung von Hochwasserschäden an der Bausubstanz von Wohngebäuden nach einem gebäudetypologischen Ansatz. In: DWA (Ed.) *Erhebung, Aufbereitung und Verwendung von Hochwasserschadensinformationen: Tagungsband zum DWA-Seminar*, (pp. 58-67). Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA).
- Neubert et al. 2014 Neubert, M., Naumann, T., Hennersdorf, J., & Nikolowski, J. (2014). The Geographic Information System-based flood damage simulation model HOWAD. *Journal of Flood Risk Management*, Article first published online: 30 March 2014.
- Neubert et al. 2009 Neubert, N., Naumann, T., & Deilmann, C. (2009). Synthetic water level building damage relationships for GIS-supported flood vulnerability modelling of residential properties. In: P. Samuels, S. Huntington, W. Allsop, & J. Harrop (Eds.) *Flood Risk Management: Research and Practice*, (pp. 1717-1724). London: Taylor and Francis Group.
- Neufert 1943 Neufert, E. (1943). *Bauordnungslehre*. 1. Auflage. Berlin: Volk und Reich Verlag.
- Nikolowski et al. 2013a Nikolowski, J., Günther, B., & Bolsius, J. (2013a). Klimaanpassung für Wohngebäude. In: B. Weller, T. Naumann, & S. Jakubetz (Eds.) *Gebäudeertüchtigung im Detail für den Klimawandel*, Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM – Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden, Heft 4. Berlin: Rhombos-Verlag.
- Nikolowski et al. 2013b Nikolowski, J., Goldberg, V., Zimm, J., & Naumann, T. (2013b). Analysing the vulnerability of buildings to climate change: Summer heat and flooding. *Meteorologische Zeitschrift*, 22 (2), 1-9.
- Nikolowski et al. 2013c Nikolowski, J., Golz, S., Rubín, C., & Naumann, T. (2013c). Abschätzung veränderter Schäden für Nutzen-Kosten-Untersuchungen des technischen Hochwasserschutzes – Das Pilotprojekt Pirna. In: J. Stamm, & K.-U. Graw (Eds.) *Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 48, Technischer und organisatorischer Hochwasserschutz – Bauwerke, Anforderungen, Modelle [Technical and Organizational Flood Protection – Structures, Requirements, Models]*. 36. *Dresdner Wasserbaukolloquium 2013, Dresden, 7-8 March 2013*, (pp. 111-122). Dresden: Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik.
- Nikolowski et al. 2012a Nikolowski, J., Hennersdorf, J., & May, F. (2012a). Gebäudetypen in der Modellregion Dresden. In: B. Weller, T. Naumann, & S. Jakubetz (Eds.) *Gebäude unter den Einwirkungen des Klimawandels*, Publikationsreihe des BMBF-geförderten

Projektes REGKLAM – Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden, Heft 3. Berlin: Rhombos-Verlag.

- Nikolowski et al. 2012b Nikolowski, J., Zimm, J., & Naumann, T. (2012b). Verletzbarkeit und Anpassungsmöglichkeiten von Gebäuden und Baukonstruktionen an die Folgen des Klimawandels am Beispiel der Modellregion Dresden. In: A. Raabe (Ed.) Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig. Tagungsband zur METTOOLS VIII, Leipzig (Germany), 20-22 March 2012, 49. Jahrgang, (pp. 97–98). Leipzig: Universität Leipzig.
- Norris & Marshall 1995 Norris, G. A., & Marshall, H. E. (1995). Multiattribute Decision Analysis Method for Evaluating Buildings and Building Systems. Gaithersburg: U.S. Department of Commerce, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology.
- Oswald & Abel 2000 Oswald, R., & Abel, R. (2000). Hinzunehmende Unregelmäßigkeiten bei Gebäuden – Typische Erscheinungsbilder, Beurteilungskriterien, Grenzwerte. 2. Auflage. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag.
- Otto et al. 2009 Otto, F., Klatecki, M., & Schäfers, M. (2009). Optimierung von Austrocknungsprozessen hochwassergeschädigter Bauteile unter Berücksichtigung der gängigen Trocknungsverfahren zur Sicherung des Gebäudebestandes und zur Vermeidung von Sekundärschäden durch die Feuchtemigration in Bauteilen sowie innerhalb von Wohnungen [Optimisation of drying processes for building components damaged by floodwater, with attention to drying methods for securing the building structure and avoiding secondary damage arising from migration of moisture in building components and inside residential premises]. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Parker et al. 1987 Parker, D., Green, C., & Thompson, P. (1987). Urban Flood Protection Benefits: A Project Appraisal Guide. Aldershot: Gower Technical Press.
- Patt & Jüpner 2013 Patt, H., & Jüpner, R. (Ed.) (2013). Hochwasser-Handbuch – Auswirkungen und Schutz. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg Verlag.
- Penning-Rowsell et al. 2010 Penning-Rowsell, E., Viavattene, C., Pardoe, J., Chatterton, J., Parker, D., & Morris, J. (2010). The benefits of flood and coastal risk management: a handbook of assessment techniques – 2010. London: Middlesex University, Flood Hazard Research Centre.
- Petry 2002 Petry, B. (2002). Coping with Floods – Complementarity of Structural and Non-Structural Measures. In: Wu et al. (Ed.) Flood Defence 2002: Proceedings of the 2nd International Symposium on Flood Defence, Beijing (China), 10-13 September 2002, (pp. 60-70). Beijing, New York: Science China Press.
- Pfeiffer et al. 2005 Pfeiffer, M., Fanslau, D., & Zedler, J. (2005). Bewertung von Neubau-Wandkonstruktionen unter ökologischen, ökonomischen und technischen Gesichtspunkten. Abschlussbericht Gutachten G-633 – 35202. Hannover: Institut für Bauforschung e.V.
- Phillipson 1996 Phillipson, M. (1996). Effects of Moisture in Porous Masonry. Watford: Building Research Establishment (BRE) Press.
- Phillipson et al. 2007 Phillipson, M., Bakera, P., Davies, M., Yeb, Z., McNaughtan, A., Galbraith, G., & McLean, R. (2007). Moisture measurement in building materials: an overview of current methods and new approaches. Building Serv. Eng. Res. Technol., 28 (4), 303-316.
- Piekenbrock & Hennig 2013 Piekenbrock, D., & Hennig, A. (2013). Einführung in die Volkswirtschaftslehre und Mikroökonomie. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Pimm 1984 Pimm, S. L. (1984). The complexity and stability of ecosystems. Nature, 307, 322-326.

- Plagge et al. 2005 Plagge, R., Scheffler, G., & Grunewald, J. (2005). Automatische Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten und des kapillaren Wassergehaltes von porösen Baustoffen. *Bauphysik*, 27 (6), 315-323.
- Poschmann et al. 1998 Poschman, C., Riebenstahl, C., & Schmidt-Kallert, E. (1998). *Umweltplanung und -bewertung*. 1. Auflage. Gotha: Klett-Perthes.
- Proverbs & Lamond 2008 Proverbs, D., & Lamond, J. (2008). The barriers to resilient reinstatement of flood damaged homes. In: *Building resilience: Achieving effective post-disaster reconstruction*. Proceedings of the 4th International i-Rec Conference, Christchurch (New Zealand), 30 April – 2 May 2008.
- Proverbs & Soetanto 2004 Proverbs, D., & Soetanto, R. (2004). *Flood damaged property: a guide to repair*. Oxford: Blackwell Publishing.
- Rahn & Friedrich 2005 Rahn, A. C., & Friedrich, M. (2005). Wärmedämm-Maßnahmen bei Bauteilen aus wasserundurchlässigem Beton. *Bauphysik*, 27 (5), 253-259.
- Renn 2008 Renn, O. (2008). Concepts of risk: An interdisciplinary review – Part 1: Disciplinary risk concepts. *GAIA*, 17 (1), 50-66.
- Reyer et al. 2000 Reyser, E., Schild, K., & Völkner, S. (2000). *Kompendium der Dämmstoffe*. Bochum: Fraunhofer IRB Verlag.
- Röder 2007 Röder, J. (2007). Zur Adhäsion von Wärmedämmverbundsystemen auf Holzwerkstoffplatten. *Bauphysik*, 29 (4), 269-287.
- Roos et al. 2003 Roos, W., Waarts, P., & Vrouwenfelder, A. (2003). *Damage to buildings*. Delft Cluster publication DC1-233-9.
- Rose 1963 Rose, D.A. (1963). Water movement in porous materials. *British Journal of Applied Physics*, 14, 256-262 u. 491-496.
- Roth 2011 Roth, C. (2011). *Lebenszyklusanalyse von Baukonstruktionen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- Saaty 2001 Saaty, T. L. (2001). *Decision making for leaders*. Pittsburgh: RWS Publications.
- Saaty 2000 Saaty, T. L. (2000). *Fundamentals of decision making and priority theory with the Analytic Hierarchy Process*. 2. Auflage. Pittsburgh: RWS Publications.
- Saaty 1980 Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York, St. Louis, San Francisco: McGraw-Hill.
- Samuels et al. 2009 Samuels, P., Morris, M. W., Sayers, P., Creutin, J.-D., Kortenhaus, A., Klijn, F., Mosselman, E., Os, A. van, & Schanze, J. (Eds.) (2009). *Flood Risk Management - Research and Practice*. Proceedings of the European Conference on Flood Risk Management Research into Practice (FLOODrisk 2008), Oxford (UK), 30 September - 2 October 2008. Boca Raton: CRC Press.
- Samuels & Gouldby 2009 Samuels, P., & Gouldby, B. (2009). *Language of risk – project definitions* (2nd edition). FLOODsite project report T32-04-01. FLOODsite Consortium.
- Scawthorn 2006 Scawthorn, C., Asce, F., Flores, P., Blais, N., Seligson, H., Tate, E., Chang, S., Mifflin, E., Thomas, W., Murphy, J., Jones, C., & Lawrence, M. (2006). *HAZUS-MH Flood Loss Estimation Methodology. II: Damage and Loss Assessment*. *National Hazards Review*, 7 (2), 72-81.
- Schach & Hentschel 2009 Schach, R., & Hentschel, M. (2009). Grundlagen für die Nutzwertanalyse für Verstärkungen aus textilbewehrtem Beton. In: *Textilbeton – Theorie und Praxis: Tagungsband zum 4. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung*, Dresden (Germany), 3-5 June 2009.
- Schanze 2009 Schanze, J. (2009). Flood risk management – basic understanding and integrated methodologies. In: J. Schanze, P. Bakonyi, M. Borga, M. Marchand, J.A. Jimenez, G. Kaiser (Eds.). *Methodologies for Integrated Flood Risk Management; Research Advances at European Pilot Sites*, (FLOODsite Report; T21-09-08), (pp. 3-13).

- Schanze 2006 Schanze, J. (2006). Flood risk management – A basic framework. In: J. Schanze, E. Zeman, & J. Marsalek (Eds.) *Flood Risk Management – Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*, (pp. 1-20). Dordrecht: Springer.
- Schanze & Daschkeit 2013 Schanze, J., & Daschkeit, A. (2013). Risiken und Chancen des Klimawandels. In: J. Birkmann, M. Vollmer, & J. Schanze (Eds.). *Raumentwicklung im Klimawandel – Herausforderungen für die räumliche Planung*. (pp. 69-89). Hannover: Forschungsberichte der ARL 2.
- Scheffler & Plagge 2009 Scheffler, G. A., & Plagge, R. (2009). Ein Trocknungskoeffizient für Baustoffe. *Bauphysik*, 31 (3), 125-138.
- Scheffler & Plagge 2005 Scheffler, G. A., & Plagge, R. (2005). Bestimmung des Trocknungsverhaltens von Baustoffen unter definierten Randbedingungen. *Bauphysik*, 27 (6), 324-330.
- Schinke et al. 2013a Schinke, R., Neubert, M., & Hennersdorf, J. (2013a). Modellierung von Gebäudeschäden infolge von Grundhochwasser auf Grundlage gebäudetypologischer Untersuchungen und synthetisch ermittelter Schadensfunktionen. In: J. Stamm, & K.-U. Graw (Eds.) *Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 48, Technischer und organisatorischer Hochwasserschutz – Bauwerke, Anforderungen, Modelle* [Technical and Organizational Flood Protection – Structures, Requirements, Models]. 36. *Dresdner Wasserbaukolloquium 2013, Dresden (Germany), 7-8 March 2013*, (pp. 365-372). Dresden: Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik.
- Schinke et al. 2013b Schinke, R., Tourbier, J., Golz, S., & Naumann, T. (2013b). Guideline for implementation of flood resilience construction, technology and systems. Deliverable 4.3 of the EU-FP7 research project 'Smart Resilient Technology, Systems and Tools' (SMARTeST). [online]. Available from: <http://www.floodresilience.eu/attachments/article/173/D4.3final-Aug13.pdf> [Accessed 20 September 2014].
- Schinke et al. 2012a Schinke, R., Neubert, M., Hennersdorf, J., & Gruhler, K. (2012a). Schadensmodellierung auf der Grundlage gebäudetypologischer und stadtstruktureller Untersuchungen. In: T. Sommer, K. Ullrich, C. Deilmann, H. Kreibich, H. Grunenberg, & D. Bothmer (Eds.) *Unterirdische Schadenspotenziale durch Grundhochwasser in urbanen Lebensräumen. Abschlussdokumentation des BMBF-Verbundprojektes MULTISURE, Gemeinsame Mitteilungen des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e. V. und seiner Partner, Heft 6*. Dresden: Dresdner Grundwasserforschungszentrum (DGFZ).
- Schinke et al. 2012b Schinke, R., Neubert, M., Hennersdorf, J., Stodolny, U., Sommer, T., & Naumann, T. (2012b). Vulnerability of subterranean building structures due to groundwater inundation – the GIS-based model approach GRUWAD. *Nat. Hazards and Earth Syst. Sci.*, 12, 2865-2877.
- Schlegel & Hums 2002 Schlegel, E., & Hums, D. (2002). Porenbeton – die Entwicklung von Gefüge und Eigenschaften eines Werkstoffes. *Mauerwerk* 6 (3), 82-88.
- Schmitz et al. 2012a Schmitz, H., Gerlach, R., & Meisel, U. (2012a). *Baukosten 2012/13 Band 2: Preiswerter Neubau von Ein- und Mehrfamilienhäusern*. 19. Auflage. Essen: Verlag für Wirtschaft und Verwaltung Hubert Wingen.
- Schmitz et al. 2012b Schmitz, H., Krings, E., Dahlhaus, U. J., & Meisel, U. (2012b). *Baukosten 2012/13 Band 1: Instandsetzung, Sanierung, Modernisierung, Umnutzung*. 21. Auflage. Essen: Verlag für Wirtschaft und Verwaltung Hubert Wingen.
- Scholz et al. 2011 Scholz, W., Knoblauch, H., Hiese, W., & Möhring, R. (Eds.) (2011). *Baustoffkenntnis*. 17. neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Köln: Werner Verlag.
- Schrepfer 2008 Schrepfer, T. (2008). Faserbewehrte Putze auf hochdämmenden Untergründen. *Bauphysik*, 30 (2), 117-122.
- Sedlbauer & Krus 2003 Sedlbauer, K., & Krus, M. (2003). Schimmelpilze in Gebäuden – Biohygrothermische Berechnungen und Gegenmaßnahmen. In: Cziesielski, E. (Hrsg.). *Bauphysik Kalender 2003*, pp. 435-530. Berlin: Ernst & Sohn.

- Sedlbauer 2001 Sedlbauer, K. (2001). Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation. Universität Stuttgart.
- Staatskanzlei 2003 Sächsische Staatskanzlei (2003). Schadensausgleich und Wiederaufbau im Freistaat Sachsen. Dresden: Sächsische Staatskanzlei.
- Schwarz & Maiwald 2007 Schwarz, J., & Maiwald, H. (2007). Prognose der Bauwerksschädigung unter Hochwassereinwirkung. Bautechnik, 84 (7), 450-464.
- Schwarz et al. 2005 Schwarz, J., Maiwald, H., & Gerstberger, A. (2005). Quantifizierung der Schaden infolge Hochwassereinwirkung: Fallstudie Eilenburg. Bautechnik, 82 (12), 845-856.
- Scottish Office 1996 Scottish Office (Ed.) (1996). Design guidance on flood damage to dwellings. Edinburgh: Scottish Office.
- Smith & Ward 1998 Smith, K., & Ward, R. (1998). Floods: Physical Processes and Human Impacts. Chichester: John Wiley & Sons.
- Sprengard et al. 2013 Sprengard, C., Treml, S., & Holm, A. (2013). Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe. Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte, Anwendungen, Innovationen. München: Forschungsinstitut für Wärmeschutz.
- Stark & Wicht 2013 Stark, J. & Wicht, B. (2103). Dauerhaftigkeit von Beton. 2. überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg Verlag.
- Stein et al. 2011 Stein, P., Lahmer, T., & Bock, S. (2011). Synthese und Analyse von gekoppelten Modellen im konstruktiven Ingenieurbau. Bautechnik Sonderheft – DFG Graduiertenkolleg 1462 Modellqualitäten, 6, 8-11.
- StMUGV 2005 StMUGV (Ed.) (2005). Schutz vor Hochwasser in Bayern – Strategie und Beispiele. München: Bayrisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV).
- Suda & Rudolf-Miklau 2012 Suda, J., & Rudolf-Miklau, F. (Eds.) (2012). Bauen und Naturgefahren – Handbuch für den konstruktiven Gebäudeschutz. Wien, New York: Springer Verlag.
- Thywissen 2006 Thywissen, K. (2006). Components of risk – A comparative glossary. Technical Report, United Nations University Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS), Bonn. URL <http://www.ehs.unu.edu/article:217>
- Tostmann 2001 Tostmann, K.-H. (2001). Korrosion – Ursachen und Vermeidung. Weinheim: Wiley-VHC Verlag.
- Trechsel 2001 Trechsel, H. R. (2001). Moisture analysis and condensation control in building envelopes. West Conshocken, Philadelphia: ASTM International.
- UMBW 2003 UMBW (2003). Hochwassergefahr und Strategien zur Schadensminderung in Baden-Württemberg. Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UMBW).
- UN-ISDR 2005 UN-ISDR (2005). Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters. Geneva: United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UN-ISDR). URL: <http://www.unisdr.org>
- USACE 1998 USACE (Ed.) (1998). Flood Proofing Performance – Success and Failures. Washington D.C.: U.S. Army Corps of Engineers (USACE). National Flood Proofing Committee.
- Veerbeek & Zevenbergen 2009 Veerbeek, W., & Zevenbergen, C. (2009). Deconstructing urban flood damages: increasing the expressiveness of flood damage models combining a high level of detail with a broad attribute set. Journal of Flood Risk Management, 2 (2), 45-57.
- Viitanen & Ritschkoff 1991 Viitanen, H., & Ritschkoff, A. (1991). Mould growth in pine and spruce sapewood in relation to air humidity and temperature. Uppsala: Swedish University of Agriculture Sciences, Department of Forest Products.
- Vogel & Thinh 2007 Vogel, R., & Thinh, N. X. (2007). Web-gestützte Anwendung des AHP zur Gewichtung von Indikatoren für die Eignungsbewertung von Retentionsflächen. In:

J. Wittmann, & V. Wohlgemuth (Hrsg.) Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften. Workshop Berlin 2007, Berichte aus der Umweltinformatik, (pp.137-146). Aachen: Shaker Verlag.

- Wagner 2008 Wagner, K. (2008). Der Risikoansatz in der europäischen Hochwassermanagementrichtlinie. NuR, 30 (11), 774-779.
- Wasmuth et al. 1931 Wasmuth, G., Adler, L., & Kowalczyk, G. (1931). Lexikon der Baukunst, Band 3, H bis Ozo. Berlin: Verlag Ernst Wasmuth.
- WBGU 1999 WBGU (Ed.) (1999). Welt im Wandel: Strategien zur Bewältigung globaler Umwelttrisiken. [Global change: Strategies for coping with global environmental risks]. Jahresgutachten 1998 des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung (WBGU). Berlin: Springer Verlag.
- Weichselgartner 2001 Weichselgartner, J. (2001). Disaster mitigation: the concept of vulnerability revisited. Disaster Prevention and Management, 10 (2), 85-94.
- Weller et al. 2013 Weller, B., Fahrion, M.-S., & Naumann, T. (Eds.) (2013). Gebäudeertüchtigung im Detail für den Klimawandel. Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM – Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden, Heft 4. Berlin: Rhombos-Verlag.
- Weller et al. 2012 Weller, B., Naumann, T., & Jakubetz, S. (Eds.) (2012). Gebäudetypen der Modellregion unter den Einwirkungen des Klimawandels. Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM – Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden, Heft 3. Berlin: Rhombos-Verlag.
- Wendehorst 2015 Wendehorst, R. (2015). Baustoffkunde. 35. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Verlag.
- Werner et al. 2011 Werner, F., Könke, C., Schanz, T., & Bucher, C. (2011). Realität – Modell – Bauwerk: Eine Einführung. Bautechnik Sonderheft – DFG Graduiertenkolleg 1462 Modellqualitäten, 6, 4-7.
- White et al. 2013 White, I., Conelly, A., Lawson, N., & O'Hare, P. (2013). Integration of Flood Resilient Technologies, Systems and Tools. Deliverable 5.3 of the EU-FP 7 Research Project Smart Resilient Technologies, Systems and Tools (SMARTeST). Retrieved from www.floodresilience.eu
- Wienerberger 2012 Wienerberger (Hrsg.) (2012). Kleine Bauphysik-Kunde – Grundwissen. Hannover: Wienerberger GmbH.
- Wingfield et al. 2005 Wingfield, J., Bell, M., & Bowker, P. (2005). Improving the flood performance of buildings through improved materials, methods and details. London: RIBA Publishing.
- WTA 2001 WTA (Ed.) (2001). WTA Merkblatt 6-1-01/D. Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen. München: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V. (WTA). WTA Publications.
- WTA 2003 WTA (Ed.) (2003). WTA Merkblatt 4-11-02/D. Messung der Feuchte bei mineralischen Baustoffen. [Measurement of the moisture content of mineral construction materials]. München: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V. (WTA). WTA Publications. ISBN 978-3-8167-6820-3.
- WTA 2005 WTA (Ed.) (2005). WTA-Merkblatt 6-3-05/D. Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos. München: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V. (WTA). WTA Publications.
- WTA 2014 WTA (Ed.) (2014). WTA Merkblatt 6-2-14/D. Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. München: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V. (WTA). WTA Publications.

- Zangemeister 1971 Zangemeister, C. (1971). Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. München: Wittmannsche Buchhandlung.
- Zevenbergen et al. 2007 Zevenbergen, C., Gersonius, B., Puyan, N., & van Herk, S. (2007). Economic Feasibility Study of Flood Proofing Domestic Dwellings. In: R. Ashley, S. Garvin, E. Pasche, A. Vassilopoulos, & C. Zevenbergen (Eds.) *Advances in Urban Flood Management*, (pp. 299–319). London: Taylor & Francis.
- Zilch & Schermer 2005 Zilch, K., & Schermer, D. (2005). Entwicklungen und Trends im Mauerwerksbau. *Mauerwerk*, 9 (5), 233-237.
- Zimm et al. 2012 Zimm, J., Bolsius, J., & Fahrion, M.-S. (2012). Anpassungskonzepte für Gebäude. In: B. Weller, T. Naumann, & S. Jakubetz (Eds.) *Gebäude unter den Auswirkungen des Klimawandels*, Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM – Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden, Heft 3. Berlin: Rhombos-Verlag.
- Zimmermann et al. 2006 Zimmermann, G., Ottomann, A., Klopfer, H., & Soergel, C. (2006). *Wasserschäden – Schadensfälle, Leckortung, Bautrocknung, Verantwortlichkeit. Schadensfreies Bauen. Band 38*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

11.2 Normen und Richtlinien

- DIN 105-100 DIN 105-100 (2012-01). Mauerziegel - Teil 100: Mauerziegel mit besonderen Eigenschaften. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
- DIN 18516-1 DIN 18516-1 (2010-06). Außenwandbekleidungen, hinterlüftet - Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
- DIN 18550-1 DIN 18550-1 (2014-12). Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außenputzen - Teil 1: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-1 für Außenputze. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
- DIN 4049-3 DIN 4049-3 (1994-10). Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
- DIN 4108-2 DIN 4108-2 (2013-02). Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
- DIN 4108-10 DIN 4108-10 (2008-06). Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
- DIN 4172 DIN 4172 (2015-03). Maßordnung im Hochbau. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
- DIN EN 12390-8 DIN EN 12390-8 (2009-07). Prüfung von Festbeton - Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
- DIN EN 15026 DIN EN 15026 (2007-07). Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
- DIN EN 1607 DIN EN 1607 (2013-05). Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
- DIN EN 1996-1-1 DIN EN 1996-1-1 (2013-02). Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.

DIN EN 771-1	DIN EN 771-1 (2011-07). Festlegungen für Mauersteine - Teil 1: Mauerziegel. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
DIN EN 771-2	DIN EN 771-2 (2011-07). Festlegungen für Mauersteine - Teil 2: Kalksandsteine. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
DIN EN 771-3	DIN EN 771-3 (2011-07). Festlegungen für Mauersteine - Teil 3: Mauersteine aus Beton (mit dichten und porigen Zuschlägen). Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
DIN EN 771-4	DIN EN 771-4 (2011-07). Festlegungen für Mauersteine - Teil 4: Porenbetonsteine. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
DIN EN 771-5	DIN EN 771-5 (2011-07). Festlegungen für Mauersteine - Teil 5: Betonwerksteine. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
DIN EN 771-6	DIN EN 771-6 (2011-07). Festlegungen für Mauersteine - Teil 6: Natursteine. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
DIN EN 998-1	DIN EN 998-1 (2010-12). Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau - Teil 1: Putzmörtel. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
DIN EN 998-2	DIN EN 998-2 (2010-12). Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau - Teil 2: Mauermörtel. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
DIN EN ISO 12570	DIN EN ISO 12570 (2013-09). Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
DIN EN ISO 13788	DIN EN ISO 13788 (2013-05). Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
DIN EN ISO 15148	DIN EN ISO 15148 (2003-03). Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
DIN V 18580	DIN V 18580 (2007-03). Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
DIN V 4164	DIN V 4164-100 (2005-10). Porenbetonsteine - Teil 100: Plansteine und Planelemente mit besonderen Eigenschaften. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
EVHWS 2014	Europaverband Hochwasserschutz e.V. (Hrsg.) (2014). Güte- und Prüfbestimmungen zur Erlangung und Verleihungen der Gütezeichen Technischer Hochwasserschutz. Augsburg: Europaverband Hochwasserschutz e.V.
FM Approvals 2013	FM Approvals LLC (Hrsg.) (2013). Approval Standard for Flood Abatement Equipment.
IFT 2005	IFT (2005). Hochwasserbeständige Fenster und Türen. Rosenheim: Institut für Fenster und Türen.
VDI 6004 Blatt 1	VDI 6004 Blatt 1 (2006-06). VDI-Richtlinie 6004, Blatt 1 (06/2006), Schutz der Technischen Gebäudeausrüstung: Hochwasser - Gebäude, Anlagen, Einrichtungen. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e.V., Beuth Verlag.
WTA 2006	WTA – Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (Hrsg.) (2006). Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos. WTA Merkblatt 6-3-05/D. München: Fraunhofer IRB Verlag.

11.3 Produktdatenblätter

- Eternit 2015 Eternit (Ed.) (2015). Planung und Anwendung – Eternit Fassadenpaneele CEDRAL. URL: http://www.eternit.de/produkte/downloads/dl/file/id/242/eternit_fassade_pa_cedral.pdf [Stand: 30. März 2015].
- FVHF 2007 FVHF (Ed.) (2007). Schadenfreies Bauen mit vorgehängten hinterlüfteten Fassaden. Berlin: Fachverband Baustoffe und Bauteile für vorgehängte hinterlüftete Fassaden e.V. URL: http://www.fvhf.de/Fassade-bilder/docs/Prospekte/FVHF_VHF-im-Fokus_Schadenfreies-Bauen-mit-VHF.pdf [Stand: 30. März 2015].

11.4 Bilder

- Bild 1 Bauvorsorgemaßnahmen in Abhängigkeit von der zu erwartenden Überflutungshöhe (Abbildung verändert nach Bowker et al. 2007)
- Bild 2 Häufigkeit von Zitierungen im Themenfeld Schadensanfälligkeit von Gebäuden gegenüber Hochwasser zwischen 1995 und 2014 als Ergebnis einer bibliometrischen Analyse im Dezember 2014
- Bild 3 Wirkprinzipien der Bauvorsorge (Quelle: IÖR)
- Bild 4 Ausgewählte Wirkungsketten für die Abbildung der Zusammenhänge zwischen dem erhöhten Wassergehalt kapillarporöse Baustoffe und den sich daraus ergebenden möglichen negativen Folgen
- Bild 5 Porosität ϕ (in V.-%) der Hauptsedimentgesteinstypen Kalkstein, Dolomit und Sandstein nach Koch et al. (2006)
- Bild 6 Wasseraufnahmekoeffizient A_w von Beton in Abhängigkeit vom Wasserzementwert (in Anlehnung an ETHZ 2002)
- Bild 7 Verteilung der verwendeten Dämmstoffe in Wärmedämm-Verbundsystemen im Zeitschnitt 1978 bis 2013 aus Fachverband WDVS (2012) zitiert in Sprengard et al. (2013)
- Bild 8 Schematische Darstellungen verschiedener Außenwandkonstruktionen aus Mauerwerk
- Bild 9 Überblick über das methodische Gesamtkonzept zur Beantwortung der Forschungsfragen
- Bild 10 Darstellung eines Modellierungsprozesses in Anlehnung an Stein et al. (2011)
- Bild 11 Berechnung der Schadensanfälligkeit von Konstruktionsalternativen
- Bild 12 Hauptphasen der Nutzwertanalyse in Anlehnung an Roth (2011)
- Bild 13 Struktur eines hierarchischen Zielsystems mit Haupt- und Teilzielen sowie Bewertungskriterien
- Bild 14 Prinzipielle Risikokurve basierend auf Schaden und Überschreitenswahrscheinlichkeit (Schanze und Meyer, 2008)
- Bild 15 Anzahl von Baugenehmigungen in Deutschland für den Neubau von Wohngebäuden differenziert nach dem überwiegend verwendeten Wandbaustoff (Datenquelle: Statistisches Bundesamt)
- Bild 16 Anteil üblicher Wandbaustoffe in Baugenehmigungen für den Neubau von Wohngebäuden in Deutschland im Zeitschnitt 2010–2014 (Datenquelle: Statistisches Bundesamt)
- Bild 17 Systemübersicht Außenwandkonstruktionen in Mauerwerksbauweise
- Bild 18 Untersuchungsgegenstand: Übliche Mauerwerkskonstruktionen bestehender Gebäude
- Bild 19 Detaildarstellungen für einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln

Bild 20	Detaildarstellungen für einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln im Dünnbettverfahren mit Stoßfugenverzahnung
Bild 21	Detaildarstellungen für einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen im Dünnbettverfahren mit Stoßfugenverzahnung
Bild 22	Detaildarstellungen für einschaliges Mauerwerk aus Planziegeln mit integrierter Wärmedämmung
Bild 23	Detaildarstellungen für einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung
Bild 24	Detaildarstellungen für einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit außenliegender Wärmedämmung
Bild 25	Detaildarstellungen für einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade
Bild 26	Detaildarstellungen für zweischaliges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung
Bild 27	Versuchsanordnung für die Analyse des Feuchteverhaltens von Außenwandquerschnitten bei intensiver Wasserbeanspruchung
Bild 28	Versuchsaufbau im Wasserbaulabor
Bild 29	Entnahme von Bohrproben für die quantitative Bestimmung des Durchfeuchtungsgrades und die Ableitung eines Feuchteprofils; Teilung der Bohrprobe in die für die gewünschte Ortsauflösung notwendige Anzahl an Teilproben
Bild 30	Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion: Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln
Bild 31	Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion: Einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln
Bild 32	Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion: Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen
Bild 33	Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion: Einschaliges Mauerwerk aus Planziegeln mit integrierter Wärmedämmung
Bild 34	Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion: Einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung
Bild 35	Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion: Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit außenliegender Wärmedämmung
Bild 36	Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion: Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade
Bild 37	Feuchteprofile für die Mauerwerkskonstruktion: Zweischaliges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung
Bild 38	Volumenstrom Q [in cm^3/h] durch die relevanten Mauerwerkskonstruktionen
Bild 39	Durchfeuchtungsgrad: Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln
Bild 40	Durchfeuchtungsgrad: Einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln
Bild 41	Durchfeuchtungsgrad: Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen
Bild 42	Durchfeuchtungsgrad: Einschaliges Mauerwerk aus Planziegeln mit integrierter Wärmedämmung
Bild 43	Durchfeuchtungsgrad: Einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung
Bild 44	Durchfeuchtungsgrad: Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit außenliegender Wärmedämmung
Bild 45	Durchfeuchtungsgrad: Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade

Bild 46	Durchfeuchtungsgrad: Zweischaliges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung
Bild 47	Taxonomie der Kriterien zur multikriteriellen Bewertung der Schadensanfälligkeit von Konstruktionsalternativen gegenüber Hochwassereinwirkungen (Kriterienhierarchie)
Bild 48	Veränderung der mittleren Druckfestigkeit β_{pR} der betrachteten Mauersteinarten während und nach intensiver Hochwasserbeanspruchung nach Brameshuber und Graubohm (2004).
Bild 49	Veränderung der mittleren Druckfestigkeit der betrachteten Mauersteinarten bei Sättigungsfeuchte nach Brameshuber und Graubohm (2004)
Bild 50	Veränderung der mittleren Druckfestigkeit der betrachteten Mauersteinarten nach Rücktrocknung (Brameshuber und Graubohm 2004)
Bild 51	Veränderung der mittleren Querkzugfestigkeit β_z der betrachteten Mauersteinarten während und nach intensiver Hochwasserbeanspruchung nach Brameshuber und Graubohm (2004)
Bild 52	Veränderung der mittleren Querkzugfestigkeit der betrachteten Mauersteinarten bei Sättigungsfeuchte nach Brameshuber und Graubohm (2004)
Bild 53	Veränderung der mittleren Querkzugfestigkeit der betrachteten Mauersteinarten nach Rücktrocknung (Brameshuber und Graubohm 2004)
Bild 54	Veränderung der mittleren Querkzugfestigkeit β_z der betrachteten Dämmstoffplatten während und nach intensiver Hochwasserbeanspruchung nach Fechner (2008)
Bild 55	Veränderung der mittleren Querkzugfestigkeit der betrachteten Dämmstoffplatten bei Sättigungsfeuchte nach Fechner (2008)
Bild 56	Veränderung der mittleren Querkzugfestigkeit der betrachteten Dämmstoffplatten nach Rücktrocknung (Fechner 2008)
Bild 57	Versagensarten gefügter Materialien bei Zugbeanspruchung (Quelle: www.riewoldt.de)
Bild 58	Veränderung der mittleren Haftzugfestigkeit ausgewählter Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen während und nach intensiver Hochwasserbeanspruchung nach Fechner (2008)
Bild 59	Veränderung der mittleren Haftzugfestigkeit β_{HZ} ausgewählter Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen während intensiver Wasserbeanspruchung nach Brameshuber und Graubohm (2004)
Bild 60	Veränderung der mittleren Haftzugfestigkeit β_{HZ} ausgewählter Mauerstein-Putzmörtel-Kombinationen nach Rücktrocknung (Brameshuber und Graubohm 2004)
Bild 61	Darstellung des Wasseraufnahmekoeffizienten für untersuchungsrelevante Baustoffe
Bild 62	Kumuliertes Wasservolumen V in [dm ³], das innerhalb der ersten 72 Stunden der Versuchsdurchführung durch den Querschnitt auf die Innenseite der Wandkonstruktion gelangt
Bild 63	Minima und Maxima der Längenänderung für verschiedene Mauersteine als Folge vier möglicher Ursachen nach Fischer et al. (2012)
Bild 64	Einfluss des volumenbezogenen Feuchtegehalts ψ auf die Wärmeleitfähigkeit λ und den Feuchte-Einflussfaktor F für ausgewählter Dämmstoffe
Bild 65	Einfluss des volumenbezogenen Feuchtegehalts ψ auf die Wärmeleitfähigkeit λ und den Feuchte-Einflussfaktor F ausgewählter Mauersteine
Bild 66	Allgemeiner Trocknungsverlauf poröser Baustoffe nach Scheffler und Plagge (2007)

Bild 67	Trocknungsverlauf ausgewählter poröser Baustoffe nach Scheffler und Plagge (2005)
Bild 68	Allgemeines Isoplethenmodell für mikrobielles Wachstum nach Sedlbauer (2001)
Bild 69	Formale Darstellung der Evaluationsmatrix <i>A</i>
Bild 70	Relative Gewichte der ausgewählten Kriterien zur Bewertung der Schadensanfälligkeit von Mauerwerkskonstruktionen gegenüber Hochwassereinwirkungen
Bild 71	Gesamtpunktwert jeder untersuchten Konstruktionsvariante nach Abschluss des Bewertungsverfahrens
Bild 72	Gesamtpunktwert jeder untersuchten Konstruktionsvariante differenziert für die vier gewichteten Kriteriengruppen nach Abschluss des Bewertungsverfahrens
Bild 73	Radardiagramm zur graphischen Darstellung der multikriteriellen Bewertung der Schadensanfälligkeit von Mauerwerkskonstruktionen
Bild 74	Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk ohne außenseitige Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung – Beispiel 1
Bild 75	Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk ohne außenseitige Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung – Beispiel 2
Bild 76	Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk ohne außenseitige Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung – Beispiel 3
Bild 77	Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk mit außenseitiger Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung – Beispiel 1
Bild 78	Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk mit außenseitiger Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung – Beispiel 2
Bild 79	Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk mit außenseitiger Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung – Beispiel 3
Bild 80	Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk mit außenseitiger Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung – Beispiel 4
Bild 81	Baukonstruktive Option für einschaliges Mauerwerk mit außenseitiger Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung – Beispiel 5
Bild 82	Baukonstruktive Option für zweischaliges Mauerwerk mit außenseitiger Wärmedämmung bei außenseitiger Hochwasserbeanspruchung – Beispiel 1
Bild 83	Bestimmtes und unbestimmtes Risiko als Überlagerung von Gefahr und Vulnerabilität nach Schanze (2006)
Bild 84	Durchfeuchtungsgrad <i>DFG</i> in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln
Bild 85	Massebezogener Feuchtegehalt <i>u</i> in [M.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln
Bild 86	Durchfeuchtungsgrad <i>DFG</i> in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln
Bild 87	Massebezogener Feuchtegehalt <i>u</i> in [M.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln
Bild 88	Durchfeuchtungsgrad <i>DFG</i> in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen
Bild 89	Massebezogener Feuchtegehalt <i>u</i> in [M.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen
Bild 90	Durchfeuchtungsgrad <i>DFG</i> in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Einschaliges Mauerwerk aus Planziegeln mit integrierter Wärmedämmung
Bild 91	Massebezogener Feuchtegehalt <i>u</i> in [M.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Einschaliges Mauerwerk aus Planziegeln mit integrierter Wärmedämmung

Bild 92	Durchfeuchtungsgrad DFG in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Einschichtiges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung
Bild 93	Volumenbezogener Feuchtegehalt ψ in [V.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Einschichtiges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung
Bild 94	Durchfeuchtungsgrad DFG in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Einschichtiges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit außenliegender Wärmedämmung
Bild 95	Volumenbezogener Feuchtegehalt ψ in [V.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Einschichtiges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit außenliegender Wärmedämmung
Bild 96	Durchfeuchtungsgrad DFG in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Einschichtiges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade
Bild 97	Volumenbezogener Feuchtegehalt ψ in [V.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Einschichtiges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade
Bild 98	Durchfeuchtungsgrad DFG in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Zweischichtiges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung
Bild 99	Volumenbezogener Feuchtegehalt ψ in [V.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt: Zweischichtiges Sichtmauerwerk aus Kalksandstein mit Kerndämmung

Anlage A1

Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln

Messwerte nach - 72 Stunden, außenseitiger Beanspruchung - 72 + 24 Stunden, beidseitiger Beanspruchung	Mess- punkt [#]	ϕ [m ³ /m ³]	m_f [g]	m_{tr} [g]	u [M.-%]	w [V.-%]	m_{max} [g]	u_{max} [M.-%]	w_{max} [V.-%]	ρ [kg/m ³]	DFG [%]	Anmerkungen	Δ_{DFG_1} [%]	Δ_{DFG_2} [%]
AUSSEN -> INNEN														
Kalkzementputz, mineralischer Oberputz														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	1	0,240	36,338	32,564	11,589	22,130	36,657	12,569	24,000	1,910	92,209		3,224	71,231
Messwerte nach 72 Stunden	1	0,240	40,590	36,543	11,075	21,570	41,046	12,446	24,240	1,948	89,985		68,007	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{lg} , im Labor)	RefWert	0,240	36,055	35,142	2,598	4,984	39,538	12,385	23,760	1,918	20,978			$w_{80} = 4,9 \text{ V.-%}$
Vollziegel Vz														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	2	0,350	80,231	69,748	15,030	27,189	83,243	19,541	35,350	1,809	76,914		4,480	73,685
Messwerte nach 72 Stunden	2	0,350	74,655	65,541	13,906	25,105	78,247	19,193	34,650	1,805	72,454		69,225	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{lg} , im Labor)	RefWert	0,350	40,540	40,284	0,635	1,136	48,173	19,680	35,175	1,787	3,229			$w_{80} = 1,1 \text{ V.-%}$
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	3	0,350	70,250	61,235	14,723	26,577	73,107	19,682	35,350	1,805	75,184		5,600	71,962
Messwerte nach 72 Stunden	3	0,350	61,643	54,367	13,383	24,111	64,929	19,233	34,650	1,802	69,584		66,362	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{lg} , im Labor)	RefWert	0,350	40,540	40,284	0,635	1,133	48,189	19,722	35,175	1,784	3,222			wie Messpunkt 2
Kalkzementörtel														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	4	0,400	28,159	23,188	21,438	22,193	32,147	38,631	40,200	1,035	55,208		3,181	44,719
Messwerte nach 72 Stunden	4	0,400	23,165	19,249	20,344	21,019	26,701	39,103	40,400	1,033	52,027		41,538	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{lg} , im Labor)	RefWert	0,400	21,410	20,568	4,094	4,187	28,611	39,028	39,920	1,023	10,489			$w_{80} = 4,2 \text{ V.-%}$
Vollziegel Vz														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	5	0,350	68,025	59,375	14,568	26,244	70,911	19,624	35,350	1,801	74,240		50,129	71,024
Messwerte nach 72 Stunden	5	0,350	59,091	56,467	4,647	8,354	67,460	19,273	34,650	1,798	24,111		20,895	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{lg} , im Labor)	RefWert	0,350	40,540	40,284	0,635	1,131	48,206	19,763	35,175	1,780	3,216			wie Messpunkt 2
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	6	0,350	65,325	55,640	17,407	31,290	66,473	19,567	35,175	1,798	88,957		68,116	85,885
Messwerte nach 72 Stunden	6	0,350	60,991	58,631	4,025	7,221	70,069	19,314	34,650	1,794	20,841		17,769	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{lg} , im Labor)	RefWert	0,350	40,540	40,284	0,635	1,129	48,222	20,691	36,750	1,776	3,071			wie Messpunkt 2
Kalkzementputz, mineralischer Innenputz														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	7	0,240	36,899	33,064	11,599	22,258	37,199	12,632	24,240	1,919	91,823		54,081	70,846
Messwerte nach 72 Stunden	7	0,240	38,251	36,543	4,674	9,149	41,024	12,384	24,240	1,957	37,742		16,765	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{lg} , im Labor)	RefWert	0,240	36,055	35,142	2,598	4,984	39,538	12,385	23,760	1,918	20,978			wie Messpunkt 1

Tabelle 51

Hygrische Messwerte für einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln

- Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte bei Laborklimabedingungen), die vor Versuchsbeginn ermittelt wurden
- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger und anschließender 24-stündiger beidseitiger Beanspruchung
- ϕ Porosität in [m³/m³]
- m_f Masse des feuchten Baustoffs in [g]
- m_{tr} Masse des darrtrockenen Baustoffs in [g]
- u massebezogener Feuchtegehalt in [M.-%]
- ψ volumenbezogener Feuchtegehalt in [V.-%]
- m_{max} Masse des wassergesättigten Baustoffs in [g]
- u_{max} maximaler Feuchtegehalt in [M.-%]
- ψ_{max} maximaler Feuchtegehalt in [V.-%]
- ρ Rohdichte in [kg/m³]
- DFG Durchfeuchtungsgrad in [%]

Bild 84

Durchfeuchtungsgrad DFG in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln (EMW-Mz)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung

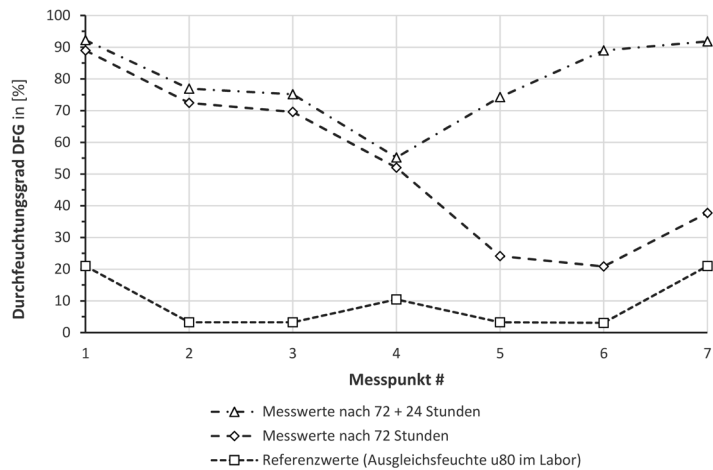


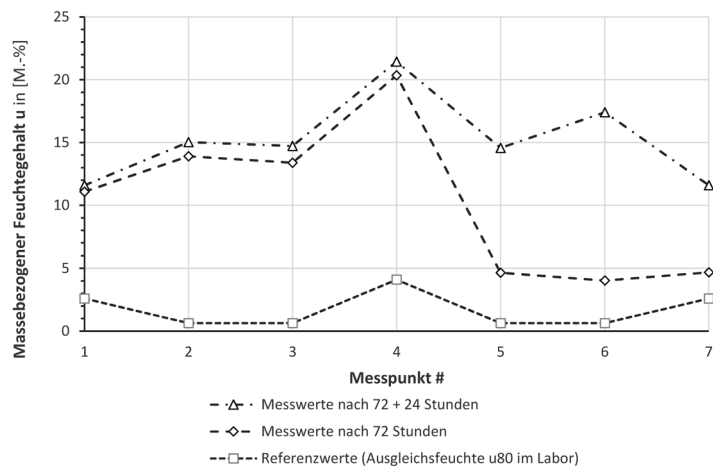
Bild 85

Massebezogener Feuchtegehalt u in [M.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Einschaliges Mauerwerk aus traditionellen Vollziegeln (EMW-Mz)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung



Anlage A2

Einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln

Messwerte nach - 72 Stunden, außenseitiger Beanspruchung - 72 + 24 Stunden, beidseitiger Beanspruchung	Mess- punkt [#]	ϕ [m ² /m ²]	m_f [g]	m_{tr} [g]	u [M.-%]	ψ [V.-%]	m_{max} [g]	m_{max} [g]	u_{max} [M.-%]	ψ_{max} [V.-%]	ρ [kg/m ³]	DFG [%]	Anmerkungen	$\Delta_{DFG,1}$ [%]	$\Delta_{DFG,2}$ [%]
AUSSEN -> INNEN															
Kalkzementputz, mineralischer Oberputz															
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	1	0,240	36,920	33,064	11,662	22,380	37,199	12,507	24,000	1,919		93,249		5,788	72,560
Messwerte nach 72 Stunden	1	0,240	40,501	36,543	10,831	21,201	41,024	12,384	24,240	1,957		87,461		66,772	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{80} im Labor)	RefWert	0,240	36,038	35,142	2,550	4,916	39,516	12,324	23,760	1,928		20,689		$\psi_{80} = 4,9 V.-%$	
Wärmedämmputz, mineralischer Unterputz															
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	2	0,480	69,427	40,516	71,357	43,157	72,672	79,365	48,000	605		89,910		4,074	77,112
Messwerte nach 72 Stunden	2	0,480	60,137	35,654	68,668	41,613	63,895	80,000	48,480	606		85,835		73,038	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{80} im Labor)	RefWert	0,480	42,508	38,596	10,136	6,081	69,473	79,200	47,520	600		12,798		$\psi_{80} = 6,1 V.-%$	
Hochlochziegel HLz, Poroton															
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	3	0,280	72,351	58,349	23,997	25,437	73,762	26,415	28,000	701		90,846		2,810	85,401
Messwerte nach 72 Stunden	3	0,280	74,987	60,839	23,255	24,897	76,751	26,415	28,280	687		88,036		82,592	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{80} im Labor)	RefWert	0,280	62,213	61,331	1,438	1,509	77,685	26,415	27,720	712		5,444		$\psi_{80} = 1,5 V.-%$	
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	4	0,280	67,151	54,643	22,890	24,264	69,077	26,415	28,000	720		86,657		3,777	81,212
Messwerte nach 72 Stunden	4	0,280	73,256	59,991	22,112	23,438	75,838	26,679	28,280	706		82,890		77,435	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{80} im Labor)	RefWert	0,280	62,213	61,331	1,438	1,509	77,695	26,415	27,720	712		5,444		wie Messpunkt 3	
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	5	0,280	69,291	55,801	24,175	26,138	70,252	25,897	28,000	728		93,351		12,588	87,907
Messwerte nach 72 Stunden	5	0,280	63,550	52,239	21,652	22,837	66,107	26,813	28,280	714		80,752		75,308	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{80} im Labor)	RefWert	0,280	62,213	61,331	1,438	1,509	77,695	26,415	27,720	712		5,444		wie Messpunkt 3	
Kalkputz, mineralischer Innenputz															
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	6	0,340	48,305	38,177	26,529	32,312	48,834	27,915	34,000	1,218		95,036		50,913	79,151
Messwerte nach 72 Stunden	6	0,340	34,095	30,221	12,819	15,152	38,914	29,052	34,340	1,182		44,123		28,238	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{80} im Labor)	RefWert	0,340	36,289	34,738	4,465	5,347	44,600	28,106	33,660	1,198		15,886		$\psi_{80} = 5,4 V.-%$	

Tabelle 52

Hygrische Messwerte für
einschaliges Mauerwerk
aus Leichthochlochziegeln

- Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte bei Laborklimabedingungen), die vor Versuchsbeginn ermittelt wurden
- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger und anschließender 24-stündiger beidseitiger Beanspruchung
- ϕ Porosität in [m³/m³]
- m_f Masse des feuchten Baustoffs in [g]
- m_{tr} Masse des darrtrockenen Baustoffs in [g]
- u massebezogener Feuchtegehalt in [M.-%]
- ψ volumenbezogener Feuchtegehalt in [V.-%]
- m_{max} Masse des wassergesättigten Baustoffs in [g]
- u_{max} maximaler Feuchtegehalt in [M.-%]
- ψ_{max} maximaler Feuchtegehalt in [V.-%]
- ρ Rohdichte in [kg/m³]
- DFG Durchfeuchtungsgrad in [%]

Bild 86

Durchfeuchtungsgrad DFG in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln (EMW-HLz)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung

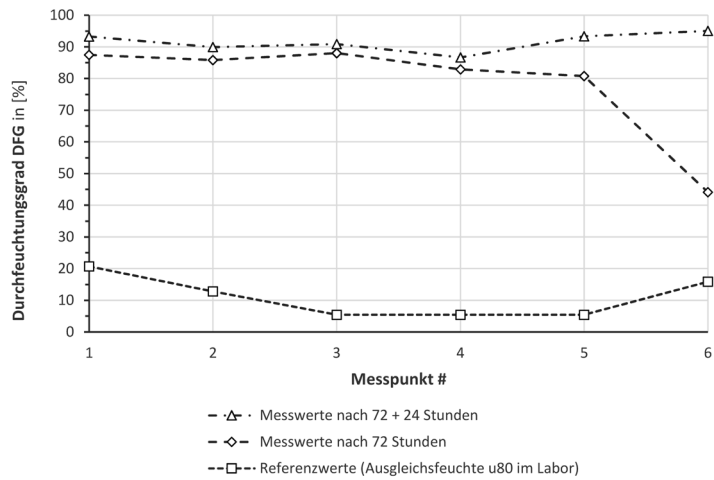


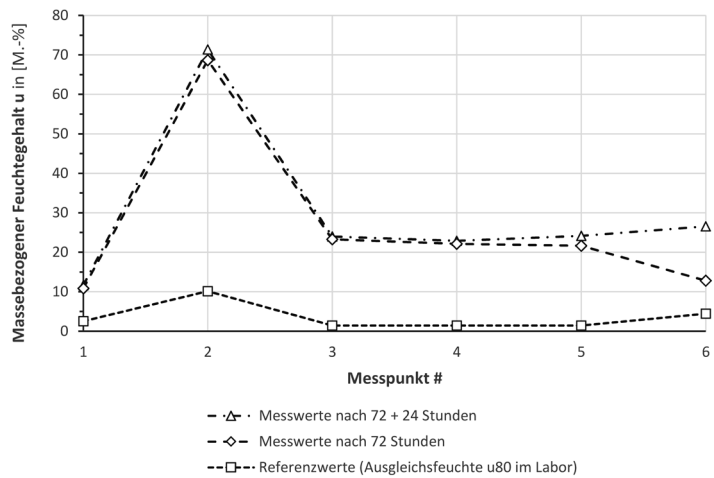
Bild 87

Massebezogener Feuchtegehalt u in [M.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Einschaliges Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln (EMW-HLz)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung



Anlage A3

Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen

Messwerte nach - 72 Stunden, außenseitiger Beanspruchung - 72 + 24 Stunden, beidseitiger Beanspruchung	Mess- punkt [#]	ϕ [m ² /m ²]	m_f [g]	m_tr [g]	u [M.-%]	ψ [V.-%]	m_max [g]	u_max [M.-%]	ψ_{max} [V.-%]	ρ [kg/m ³]	DFG [%]	Anmerkungen	$\Delta_{DFG,1}$ [%]	$\Delta_{DFG,2}$ [%]
AUSSEN->INNEN														
Kalkzementputz, mineralischer Oberputz														
Messw erte nach 72 + 24 Stunden	1	0,150	39,440	35,943	9,729	13,757	39,756	10,608	15,000	1,414	91,715		8,042	57,600
Messw erte nach 72 Stunden	1	0,150	35,799	32,813	9,100	12,676	36,346	10,876	15,150	1,393	83,672		49,558	
Referenzw erte (Ausgleichsfeuchte u_{lg} im Labor)	RefWert	0,150	31,655	30,558	3,590	5,066	33,806	10,523	14,850	1,411	34,115			
Wärmedämmputz, mineralischer Unterputz														
Messw erte nach 72 + 24 Stunden	2	0,480	61,231	35,643	71,790	43,203	64,072	79,761	48,000	602	90,006		4,908	77,551
Messw erte nach 72 Stunden	2	0,480	64,727	36,510	68,078	41,256	69,013	80,000	48,480	606	85,098		72,643	
Referenzw erte (Ausgleichsfeuchte u_{lg} im Labor)	RefWert	0,480	44,298	40,284	9,964	5,919	72,837	80,000	47,520	594	12,455			
Porenbeton-Planstein PP														
Messw erte nach 72 + 24 Stunden	3	0,850	135,050	54,361	148,432	53,275	183,100	236,822	85,000	359	62,677		4,096	61,298
Messw erte nach 72 Stunden	3	0,850	148,943	62,246	139,281	50,292	208,776	237,759	85,850	361	58,581		57,203	
Referenzw erte (Ausgleichsfeuchte u_{lg} im Labor)	RefWert	0,850	56,681	54,868	3,304	1,160	187,739	239,744	84,150	351	1,378			
Messw erte nach 72 + 24 Stunden	4	0,850	122,851	51,236	139,775	49,620	173,914	239,437	85,000	355	58,377		5,009	56,998
Messw erte nach 72 Stunden	4	0,850	140,290	62,005	126,256	45,816	207,244	236,580	85,850	363	53,367		51,989	
Referenzw erte (Ausgleichsfeuchte u_{lg} im Labor)	RefWert	0,850	56,681	54,868	3,304	1,160	187,739	239,744	84,150	351	1,378			
Messw erte nach 72 + 24 Stunden	5	0,850	89,025	55,640	60,002	21,493	187,672	237,298	85,000	358	25,285		20,074	23,907
Messw erte nach 72 Stunden	5	0,850	65,991	58,631	12,553	4,474	198,464	240,881	85,850	356	5,211		3,833	
Referenzw erte (Ausgleichsfeuchte u_{lg} im Labor)	RefWert	0,850	56,681	54,868	3,304	1,160	187,739	239,744	84,150	351	1,378			
Kalkputz, mineralischer Innenputz														
Messw erte nach 72 + 24 Stunden	6	0,340	48,495	38,481	26,023	31,478	49,297	28,108	34,000	1,210	92,581		66,103	76,830
Messw erte nach 72 Stunden	6	0,340	38,155	35,455	7,615	9,093	45,551	28,760	34,340	1,194	26,478		10,727	
Referenzw erte (Ausgleichsfeuchte u_{lg} im Labor)	RefWert	0,340	27,834	26,654	4,427	5,302	34,221	28,106	33,660	1,198	15,751			

Tabelle 53

Hygrische Messwerte für einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen

- Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte bei Laborklimabedingungen), die vor Versuchsbeginn ermittelt wurden
- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger und anschließender 24-stündiger beidseitiger Beanspruchung
- ϕ Porosität in [m³/m³]
- m_f Masse des feuchten Baustoffs in [g]
- m_{tr} Masse des darrtrockenen Baustoffs in [g]
- u massebezogener Feuchtegehalt in [M.-%]
- ψ volumenbezogener Feuchtegehalt in [V.-%]
- m_{max} Masse des wassergesättigten Baustoffs in [g]
- u_{max} maximaler Feuchtegehalt in [M.-%]
- ψ_{max} maximaler Feuchtegehalt in [V.-%]
- ρ Rohdichte in [kg/m³]
- DFG Durchfeuchtungsgrad in [%]

Bild 88

Durchfeuchtungsgrad DFG in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen (EMW-PP)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung

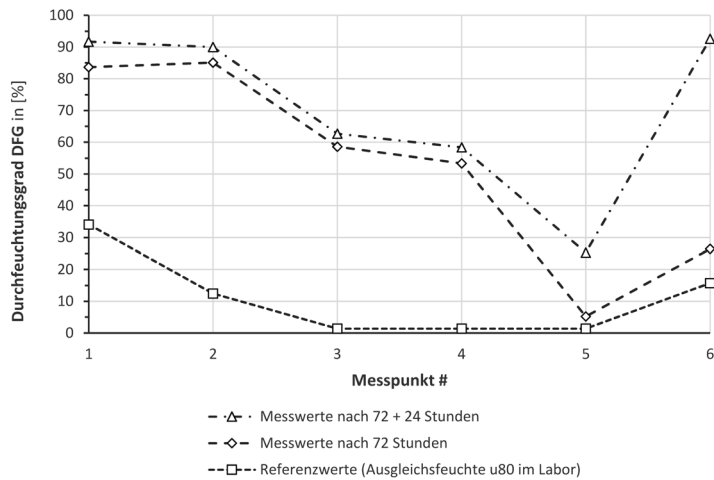


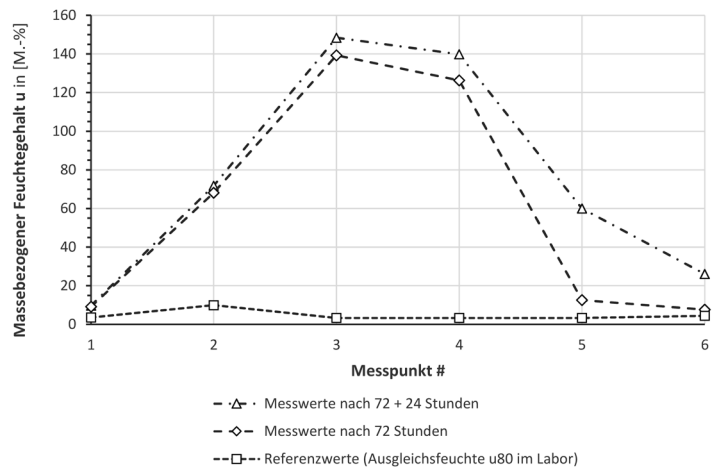
Bild 89

Massebezogener Feuchtegehalt u in [M.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Einschaliges Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen (EMW-PP)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung



Anlage A4

Einschaliges Mauerwerk aus Planziegeln mit integrierter Wärmedämmung

Messwerte nach - 72 Stunden, außenseitiger Beanspruchung - 72 + 24 Stunden, beidseitiger Beanspruchung	Φ [m²/m²]	m_f [g]	m_tr [g]	u [M.-%]	ψ [V.-%]	m_max [g]	u_max [M.-%]	ψ_max [V.-%]	ρ [kg/m³]	p_Scherben [kg/m²]	DFG [%]	Anmerkungen	Δ_DFG_1 [%]	Δ_DFG_2 [%]
AUSSEN->INNEN														
Faserleichtputzputz, mineralischer Putzmörtel														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	0,400	39,340	28,658	37,275	33,883	41,269	44,004	40,000	909		84,706		7,264	72,155
Messwerte nach 72 Stunden	0,400	46,231	34,349	34,592	31,287	49,540	44,668	40,400	904		77,443		64,891	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u _{lg} im Labor)	RefWert	0,400	36,885	34,978	5,452	50,324	43,436	39,600	912		12,552		ψ ₈₀ = 4,9 V.-%	
Planziegel mit integrierter Wärmedämmung														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	0,270	79,516	63,371	25,477	25,655	80,363	26,813	27,270	648	1,007	94,076		3,564	88,419
Messwerte nach 72 Stunden	0,270	69,007	55,574	24,171	24,194	70,565	26,975	26,730	644	1,001	90,512		84,854	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u _{lg} im Labor)	RefWert	0,270	44,108	43,445	1,526	55,106	26,841	27,135	647	1,006	5,657		ψ ₈₀ = 1,5 V.-%	
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	0,270	72,854	58,377	24,799	24,871	74,093	26,922	27,270	645	1,003	91,204		6,281	85,433
Messwerte nach 72 Stunden	0,270	55,677	45,300	22,908	23,044	57,458	26,841	27,135	647	1,006	84,924		79,152	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u _{lg} im Labor)	RefWert	0,270	44,108	43,445	1,526	55,048	26,707	26,730	651	1,011	5,772		wie Messpunkt 2	
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	0,270	77,822	62,348	24,819	25,015	79,050	26,788	26,865	649	1,008	93,115		10,734	87,390
Messwerte nach 72 Stunden	0,270	70,959	58,257	21,804	22,043	73,816	26,708	26,757	651	1,011	82,381		76,656	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u _{lg} im Labor)	RefWert	0,270	44,108	43,445	1,526	54,990	26,575	27,081	654	1,016	5,725		wie Messpunkt 2	
Kalkputz, mineralischer Innenputz														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	0,340	32,414	25,674	26,252	31,225	33,013	28,585	34,000	1,189		91,838		41,870	75,992
Messwerte nach 72 Stunden	0,340	32,923	28,754	14,498	17,159	37,015	29,016	34,340	1,183		49,967		34,122	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u _{lg} im Labor)	RefWert	0,340	40,434	38,687	4,516	49,823	28,498	33,660	1,181		15,846		ψ ₈₀ = 5,4 V.-%	

Tabelle 54

Hygrische Messwerte für einschaliges Mauerwerk aus Planziegeln mit integrierter Wärmedämmung

- Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte bei Laborklimabedingungen), die vor Versuchsbeginn ermittelt wurden
- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger und anschließender 24-stündiger beidseitiger Beanspruchung
- φ Porosität in [m³/m³]
- m_f Masse des feuchten Baustoffs in [g]
- m_{tr} Masse des darrtrockenen Baustoffs in [g]
- u massebezogener Feuchtegehalt in [M.-%]
- ψ volumenbezogener Feuchtegehalt in [V.-%]
- m_{max} Masse des wasser-gesättigten Baustoffs in [g]
- u_{max} maximaler Feuchtegehalt in [M.-%]
- ψ_{max} maximaler Feuchtegehalt in [V.-%]
- ρ Rohdichte in [kg/m³]
- DFG Durchfeuchtungsgrad in [%]

Bild 90

Durchfeuchtungsgrad DFG in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Einschaliges Mauerwerk aus Planziegeln mit integrierter Wärmedämmung (EMW-PziWD)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung

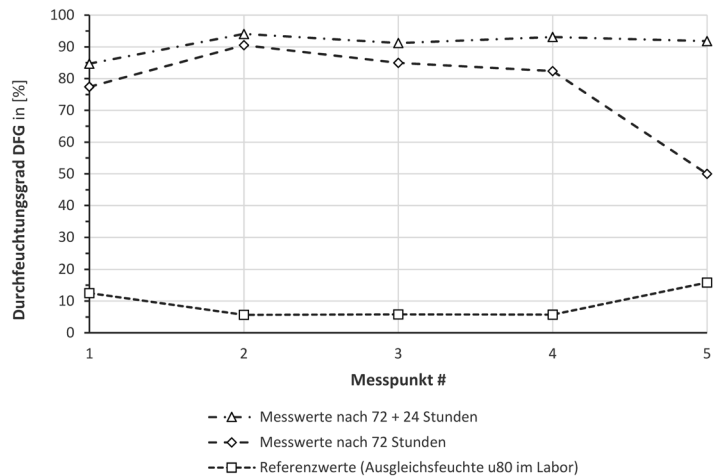


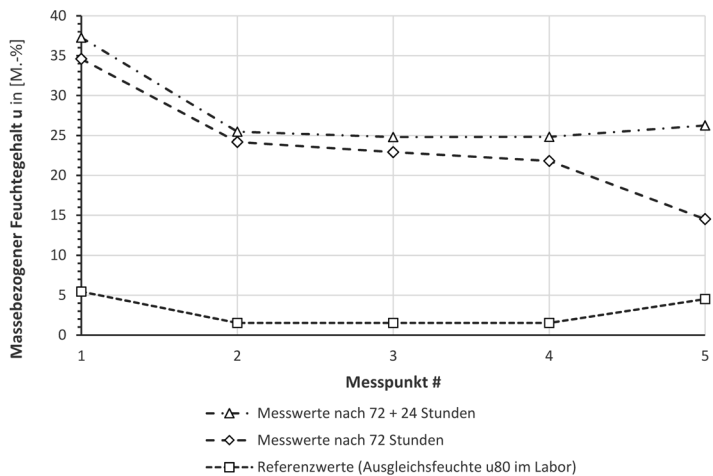
Bild 91

Massebezogener Feuchtegehalt u in [M.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Einschaliges Mauerwerk aus Planziegeln mit integrierter Wärmedämmung (EMW-PziWD)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung



Anlage A5

Einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung

Messwerte nach - 72 Stunden, außenseitiger Beanspruchung - 72 + 24 Stunden, beidseitiger Beanspruchung	Mess- punkt [#]	ϕ [m ² /m ²]	m_f [g]	m_{tr} [g]	u [M.-%]	ψ [V.-%]	m_{max} [g]	u_{max} [M.-%]	ψ_{max} [V.-%]	ρ [kg/m ³]	DFG [%]	Anmerkungen	Δ_{DFG_1} [%]	Δ_{DFG_2} [%]
A U S S E N -> I N N E N														
Kunstharzputz, organischer Oberputz														
Messw erte nach 72 + 24 Stunden	1	0,150	9,910	9,248	7,161	7,955	10,496	13,501	15,000	1,111	53,036		6,620	46,066
Messw erte nach 72 Stunden		0,150	8,780	8,267	6,205	7,032	9,361	13,369	15,150	1,133	46,416		39,446	
Referenzw erte (Ausgleichsfeuchte u_{90} , im Labor)	RefWert	0,150	10,339	10,244	0,927			13,304	14,850	1,116	6,971	$\psi_{80} = 1 \text{ V.-%}$		
Wärmedämmung, expand. Polystyrol-Hartschaum														
Messw erte nach 72 + 24 Stunden	2	0,950	67,541	1,955	3,355	3,313	50,330	125,752	6,333	333	95,000		8,995	51,711
Messw erte nach 72 Stunden		0,950	46,557	1,598	2,813	4,544	42,202	102,805	6,396	667	95,950		42,715	
Referenzw erte (Ausgleichsfeuchte u_{90} , im Labor)	RefWert	0,950	3,538	1,971	79,503		1,193	126,801	6,270	0,000	94,050	$\psi_{80} = 1,2 \text{ V.-%}$	1,268	
Leichtbeton-Hohlblock, Hbl														
Messw erte nach 72 + 24 Stunden	3	0,210	55,951	49,436	13,179	9,317	64,120	29,703	21,000	707	44,368		3,453	37,360
Messw erte nach 72 Stunden		0,210	62,187	55,265	12,525	8,678	72,015	30,612	21,210	693	40,915		33,907	
Referenzw erte (Ausgleichsfeuchte u_{90} , im Labor)	RefWert	0,210	41,090	40,256	2,072	1,457	52,277	29,563	20,790	703	7,008	$\psi_{80} = 1,5 \text{ V.-%}$		
Messw erte nach 72 + 24 Stunden	4	0,210	66,245	62,254	6,411	4,554	80,660	29,566	21,000	710	21,683		4,242	14,675
Messw erte nach 72 Stunden		0,210	60,264	57,252	5,261	3,699	74,350	30,163	21,210	703	17,442		10,434	
Referenzw erte (Ausgleichsfeuchte u_{90} , im Labor)	RefWert	0,210	41,090	40,256	2,072	1,457	52,277	29,563	20,790	703	7,008	wie Messpunkt 3		
Messw erte nach 72 + 24 Stunden	5	0,210	56,756	53,214	6,656	4,727	68,949	29,569	21,000	710	22,511		8,113	15,503
Messw erte nach 72 Stunden		0,210	62,127	59,541	4,343	3,054	77,324	30,166	21,210	703	14,398		7,390	
Referenzw erte (Ausgleichsfeuchte u_{90} , im Labor)	RefWert	0,210	41,090	40,256	2,072	1,457	52,277	29,563	20,790	703	7,008	wie Messpunkt 3		
Kalkzementputz, mineralischer Innenputz														
Messw erte nach 72 + 24 Stunden	6	0,240	41,645	38,254	8,864	17,011	43,038	12,507	24,000	1,919	70,879		45,443	49,951
Messw erte nach 72 Stunden		0,240	42,898	41,588	3,150	6,166	46,687	12,384	24,240	1,957	25,436		4,509	
Referenzw erte (Ausgleichsfeuchte u_{90} , im Labor)	RefWert	0,240	23,722	23,126	2,579	4,972	26,004	12,324	23,760	1,928	20,927	$\psi_{80} = 4,9 \text{ V.-%}$		

Tabelle 55

Hygrische Messwerte für einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung

- Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte bei Laborklimabedingungen), die vor Versuchsbeginn ermittelt wurden

- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung

- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger und anschließender 24-stündiger beidseitiger Beanspruchung

ϕ Porosität in [m³/m³]

m_f Masse des feuchten Baustoffs in [g]

m_{tr} Masse des darrtrockenen Baustoffs in [g]

u massebezogener Feuchtegehalt in [M.-%]

ψ volumenbezogener Feuchtegehalt in [V.-%]

m_{max} Masse des wassergesättigten Baustoffs in [g]

u_{max} maximaler Feuchtegehalt in [M.-%]

ψ_{max} maximaler Feuchtegehalt in [V.-%]

ρ Rohdichte in [kg/m³]

DFG Durchfeuchtungsgrad in [%]

Bild 92

Durchfeuchtungsgrad DFG in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung (EMW-Hbl_WDVS)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung

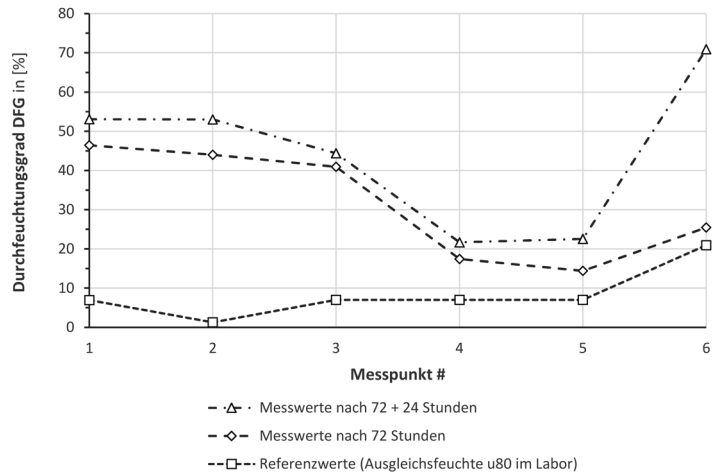


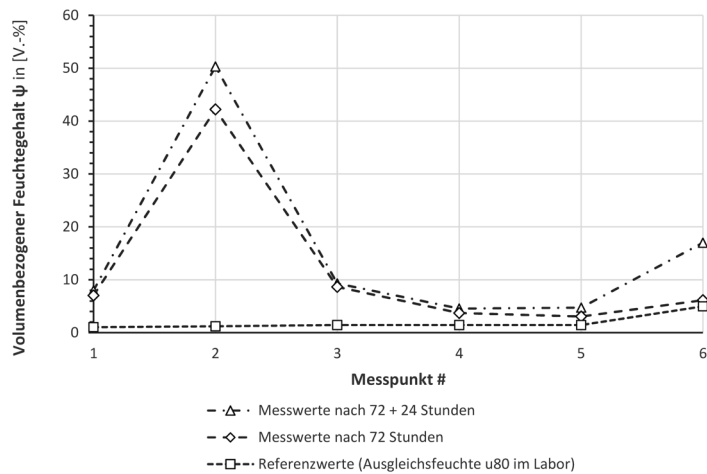
Bild 93

Volumenbezogener Feuchtegehalt ψ in [V.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Einschaliges Mauerwerk aus Leichtbeton-Hohlblöcken mit außenliegender Wärmedämmung (EMW-Hbl_WDVS)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung



Anlage A6

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit außenliegender Wärmedämmung

Messwerte nach - 72 Stunden, außenseitiger Beanspruchung - 72 + 24 Stunden, beidseitiger Beanspruchung	Mess- punkt [#]	ϕ [m ² /m ²]	m_f [g]	m_{tr} [g]	u [M.-%]	ψ [V.-%]	m_{max} [g]	u_{max} [M.-%]	ψ_{max} [V.-%]	ρ [kg/m ³]	DFG [%]	Anmerkungen	Δ_{DFG_1} [%]	Δ_{DFG_2} [%]
AUSSEN->INNEN														
Kunstharpuz, organischer Oberputz														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	1	0,150	7,365	6,538	12,656	14,061	7,420	13,501	15,000	1,111	93,739		9,745	86,342
Messwerte nach 72 Stunden	1	0,150	8,380	7,554	11,229	12,725	8,531	13,369	15,150	1,133	83,994		76,597	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{ig} , im Labor)	RefWert	0,150	12,356	12,236	0,984	1,098	13,880	13,304	14,850	1,116	7,396	$\psi_{80} = 1 \text{ V.-%}$		
Wärmedämmung, expand. Polystyrol-Hartschaum														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	2	0,950	67,569	2,039	3,213	8,300	48,207	131,176	6,333	3,333	95,000	15	2,066	49,452
Messwerte nach 72 Stunden	2	0,950	51,350	1,598	3,113	7,944	46,707	102,792	6,396	6,667	95,950	15	48,678	47,386
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{ig} , im Labor)	RefWert	0,950	3,568	1,971	81,025	1,215	126,801	6,270	0,000	94,050	15	1,292	$\psi_{80} = 1,2 \text{ V.-%}$	
Hochlochziegel HLz, Poroton														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	3	0,260	72,251	58,349	23,826	25,331	72,618	24,455	26,000	808	1,063	97,427	3,678	91,427
Messwerte nach 72 Stunden	3	0,260	74,787	60,839	22,926	24,618	75,570	24,455	26,260	792	1,074	93,748	87,748	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{ig} , im Labor)	RefWert	0,260	66,380	65,437	1,441	1,544	81,313	24,019	25,740	804	1,072	6,000	$\psi_{80} = 1,5 \text{ V.-%}$	
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	4	0,260	69,316	56,434	22,827	24,585	70,057	24,140	26,000	812	1,077	94,558	1,845	88,558
Messwerte nach 72 Stunden	4	0,260	60,135	49,137	22,381	24,346	60,882	24,140	26,260	804	1,088	92,713	86,713	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{ig} , im Labor)	RefWert	0,260	66,380	65,437	1,441	1,544	81,313	24,019	25,740	804	1,072	6,000	wie Messpunkt 3	
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	5	0,260	85,230	69,344	22,910	24,844	85,969	23,975	26,000	812	1,084	95,555	5,556	89,555
Messwerte nach 72 Stunden	5	0,260	65,034	53,349	21,903	23,634	66,204	24,337	26,260	804	1,079	89,999	83,999	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{ig} , im Labor)	RefWert	0,260	66,380	65,437	1,441	1,544	81,313	24,019	25,740	804	1,072	6,000	wie Messpunkt 3	
Kalkputz, mineralischer Innenputz														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	6	0,340	38,645	30,746	25,691	31,292	39,329	27,915	34,000	1,218	92,035		45,674	75,946
Messwerte nach 72 Stunden	6	0,340	32,095	28,335	13,270	15,920	36,365	28,623	34,340	1,200	46,360		30,272	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{ig} , im Labor)	RefWert	0,340	30,250	28,941	4,523	5,416	37,159	28,113	33,660	1,197	16,089	$\psi_{80} = 5,4 \text{ V.-%}$		

Tabelle 56

Hygrische Messwerte für einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit außenliegender Wärmedämmung

- Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte bei Laborklimabedingungen), die vor Versuchsbeginn ermittelt wurden

- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung

- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger und anschließender 24-stündiger beidseitiger Beanspruchung

ϕ Porosität in [m³/m³]

m_f Masse des feuchten Baustoffs in [g]

m_{tr} Masse des darrtrockenen Baustoffs in [g]

u massebezogener Feuchtegehalt in [M.-%]

ψ volumenbezogener Feuchtegehalt in [V.-%]

m_{max} Masse des wassergesättigten Baustoffs in [g]

u_{max} maximaler Feuchtegehalt in [M.-%]

ψ_{max} maximaler Feuchtegehalt in [V.-%]

ρ Rohdichte in [kg/m³]

DFG Durchfeuchtungsgrad in [%]

Bild 94

Durchfeuchtungsgrad DFG in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit außenliegender Wärmedämmung (EMW-HLz_WDVS)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung

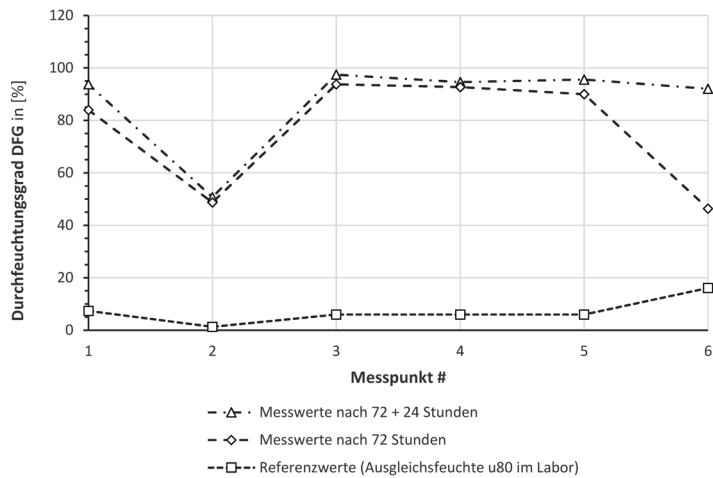


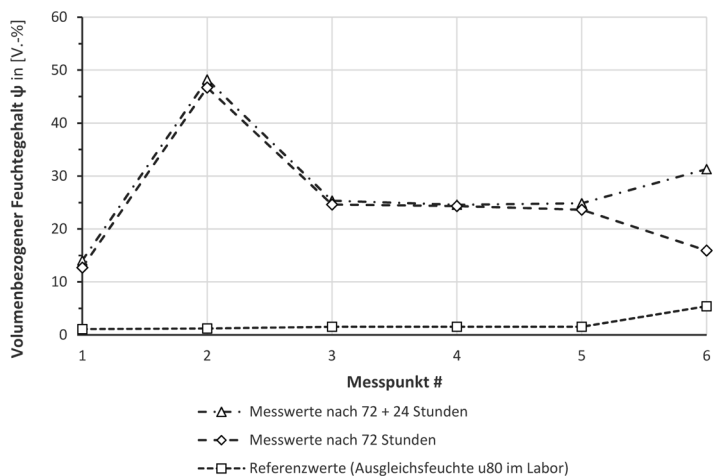
Bild 95

Volumenbezogener Feuchtegehalt ψ in [V.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit außenliegender Wärmedämmung (EMW-HLz_WDVS)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung



Anlage A7

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln vorgehängter hinterlüfteter Fassade

Messwerte nach - 72 Stunden, außenseitiger Beanspruchung - 72 + 24 Stunden, beidseitiger Beanspruchung	Messpunkt [#]	ϕ [m ² /m ²]	m_f [g]	m_{tr} [g]	u [M.-%]	ψ [V.-%]	m_{max} [g]	u_{max} [M.-%]	ψ_{max} [V.-%]	ρ [kg/m ³]	DFG [%]	Anmerkungen	Δ_{DFG_1} [%]	Δ_{DFG_2} [%]
AUSEN->INNEN														
Wärmedämmung, Mineralfaserdämmstoffplatte														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	1	0,940	97,969	9,573	923,389	92,339	99,559	940,000	94,000	100	98,233		1,915	97,580
Messwerte nach 72 Stunden	1	0,940	124,350	12,258	914,440	91,444	127,483	949,400	94,940	100	96,318		95,665	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{80} im Labor)	RefWert	0,940	10,879	10,256	6,074	0,607	106,662	930,600	83,060	100	0,653	$\psi_{80} = 0,6 V.-%$		
Hochlochziegel HLZ, Poroton														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	2	0,260	76,031	61,244	24,144	25,428	76,364	24,688	26,000	808	1,053	97,799	5,675	91,609
Messwerte nach 72 Stunden	2	0,260	60,456	49,254	22,743	24,192	61,293	24,688	26,260	792	1,064	92,124	85,934	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{80} im Labor)	RefWert	0,260	56,088	55,259	1,501	1,593	68,793	24,247	25,740	804	1,062	6,189	$\psi_{80} = 1,5 V.-%$	
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	3	0,260	71,625	58,250	22,961	24,497	72,446	24,370	26,000	812	1,067	94,219	3,188	88,029
Messwerte nach 72 Stunden	3	0,260	49,189	40,258	22,184	23,905	49,972	24,370	26,260	804	1,078	91,031	84,841	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{80} im Labor)	RefWert	0,260	56,088	55,259	1,501	1,593	68,793	24,247	25,740	804	1,062	6,189	wie Messpunkt 2	
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	4	0,260	60,482	49,257	22,789	24,480	61,179	24,204	26,000	812	1,074	94,153	4,219	87,964
Messwerte nach 72 Stunden	4	0,260	55,258	45,258	22,096	23,617	56,267	24,569	26,260	804	1,069	89,934	83,745	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{80} im Labor)	RefWert	0,260	56,088	55,259	1,501	1,593	68,793	24,247	25,740	804	1,062	6,189	wie Messpunkt 2	
Kalkputz, mineralischer Innenputz														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	5	0,340	37,787	30,254	24,899	30,327	38,699	27,915	34,000	1.218	89,198		41,086	73,183
Messwerte nach 72 Stunden	5	0,340	31,025	27,270	13,771	16,521	34,998	28,623	34,340	1.200	48,111		32,097	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{80} im Labor)	RefWert	0,340	26,401	25,264	4,502	5,391	32,438	28,113	33,660	1.197	16,015	$\psi_{80} = 5,4 V.-%$		

Tabelle 57

Hygrische Messwerte für einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln vorgehängter hinterlüfteter Fassade

- Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte bei Laborklimabedingungen), die vor Versuchsbeginn ermittelt wurden
- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger und anschließender 24-stündiger beidseitiger Beanspruchung
- ϕ Porosität in [m³/m³]
- m_f Masse des feuchten Baustoffs in [g]
- m_{tr} Masse des darrtrockenen Baustoffs in [g]
- u massebezogener Feuchtegehalt in [M.-%]
- ψ volumenbezogener Feuchtegehalt in [V.-%]
- m_{max} Masse des wassergesättigten Baustoffs in [g]
- u_{max} maximaler Feuchtegehalt in [M.-%]
- ψ_{max} maximaler Feuchtegehalt in [V.-%]
- ρ Rohdichte in [kg/m³]
- DFG Durchfeuchtungsgrad in [%]

Bild 96

Durchfeuchtungsgrad DFG in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln vorgehängter hinterlüfteter Fassade (EMW-HLz_VHF)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung

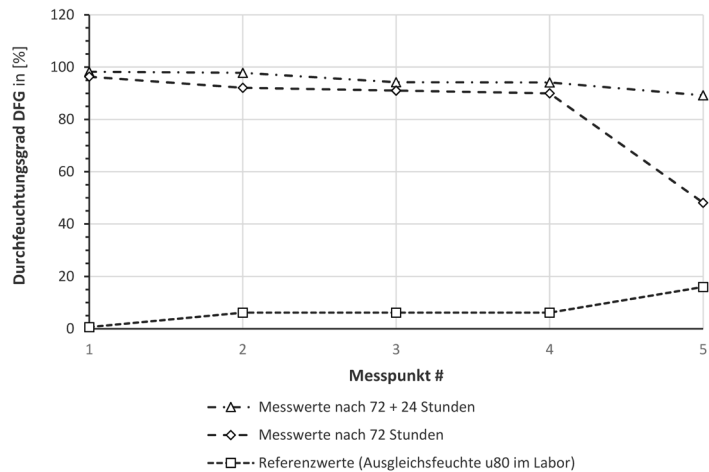


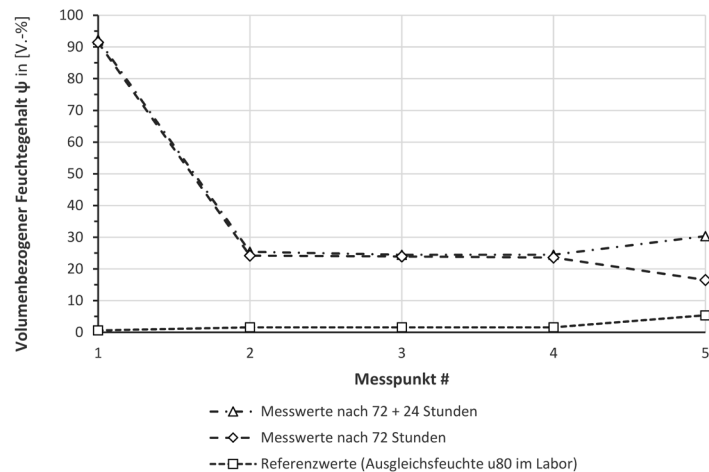
Bild 97

Volumenbezogener Feuchtegehalt ψ in [V.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Einschaliges Mauerwerk aus Hochlochziegeln vorgehängter hinterlüfteter Fassade (EMW-HLz_VHF)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung



Anlage A8

Zweischaliges Mauerwerk aus Kalksandstein und Kerndämmung

Messwerte nach - 72 Stunden, außenseitiger Beanspruchung - 72 + 24 Stunden, beidseitiger Beanspruchung	Mess- punkt [#]	ϕ [m³/m²]	m_f [g]	m_{tr} [g]	u [M.-%]	ψ [V.-%]	m_{max} [g]	u_{max} [M.-%]	ψ_{max} [V.-%]	ρ [kg/m³]	DFG [%]	Anmerkungen	Δ_{DFG_1} [%]	Δ_{DFG_2} [%]
AUSSEN-> INNEN														
Kalksand-Verblender KS-Vb														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	1	0,210	62,980	58,254	8,113	16,388	64,310	10,396	21,000	2,020	78,037		6,561	67,385
Messwerte nach 72 Stunden	1	0,210	68,015	63,258	7,520	15,160	69,848	10,521	21,210	2,016	71,476		60,824	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{90} im Labor)	RefWert	0,210	58,902	58,265	1,094	2,215	64,310	10,272	20,790	2,024	10,652		$\psi_{80} = 2,2 V.-%$	
Wärmedämmung, Mineralfaserdämmstoffplatte														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	2	0,940	93,071	9,142	918,031	91,803	95,079	940,000	94,000	100	97,663		3,361	96,981
Messwerte nach 72 Stunden	2	0,940	161,655	16,242	895,299	89,530	168,915	949,400	94,940	100	94,302		93,620	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{90} im Labor)	RefWert	0,940	10,058	9,458	6,344	0,634	98,363	930,600	93,060	100	0,682		$\psi_{80} = 0,6 V.-%$	
Kalksand-Lochstein KS-L														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	3	0,280	53,200	45,286	17,476	24,568	54,306	19,917	28,280	1,406	86,874		6,210	77,662
Messwerte nach 72 Stunden	3	0,280	49,059	42,268	16,066	22,360	50,772	20,119	27,720	1,392	80,664		71,453	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{90} im Labor)	RefWert	0,280	56,276	55,265	1,829	2,566	66,295	19,959	27,860	1,403	9,212		$\psi_{80} = 2,5 V.-%$	
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	4	0,280	59,987	52,217	14,879	21,083	62,536	19,761	28,084	1,417	75,070		20,628	65,849
Messwerte nach 72 Stunden	4	0,280	44,254	39,885	10,954	15,366	47,846	19,961	28,224	1,403	54,441		45,221	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{90} im Labor)	RefWert	0,280	56,276	55,265	1,829	2,566	66,295	19,959	27,832	1,403	9,221		wie Messpunkt 3	
Kalkzementputz, mineralischer Innenputz														
Messwerte nach 72 + 24 Stunden	5	0,240	31,479	28,254	11,414	21,904	31,788	12,507	24,000	1,919	91,267		47,029	70,334
Messwerte nach 72 Stunden	5	0,240	31,915	30,257	5,478	10,723	33,967	12,384	24,240	1,957	44,238		23,305	
Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte u_{90} im Labor)	RefWert	0,240	22,898	22,325	2,567	4,974	25,090	12,261	23,760	1,938	20,933		$\psi_{80} = 4,9 V.-%$	

Tabelle 58

Hygrische Messwerte für zweischaliges Mauerwerk aus Kalksandstein und Kerndämmung

- Referenzwerte (Ausgleichsfeuchte bei Laborklimabedingungen), die vor Versuchsbeginn ermittelt wurden
- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- Messwerte nach 72-stündiger außenseitiger und anschließender 24-stündiger beidseitiger Beanspruchung
- ϕ Porosität in [m³/m³]
- m_f Masse des feuchten Baustoffs in [g]
- m_{tr} Masse des darrtrockenen Baustoffs in [g]
- u massebezogener Feuchtegehalt in [M.-%]
- ψ volumenbezogener Feuchtegehalt in [V.-%]
- m_{max} Masse des wassergesättigten Baustoffs in [g]
- u_{max} maximaler Feuchtegehalt in [M.-%]
- ψ_{max} maximaler Feuchtegehalt in [V.-%]
- ρ Rohdichte in [kg/m³]
- DFG Durchfeuchtungsgrad in [%]

Bild 98

Durchfeuchtungsgrad DFG in [%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Zweischaliges Mauerwerk aus Kalksandstein und Kerndämmung (ZMW-KS_WZ)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung

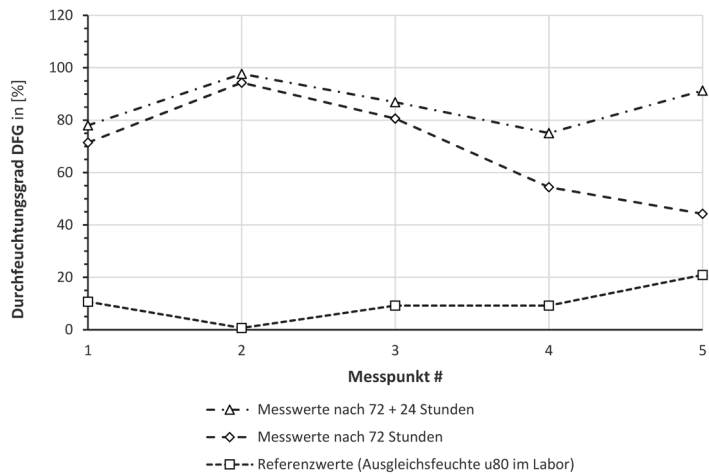


Bild 99

Volumenbezogener Feuchtegehalt ψ in [V.-%] für Messpunkte im Wandquerschnitt (Lage der Messpunkte siehe Abschnitt 6.6)

Zweischaliges Mauerwerk aus Kalksandstein und Kerndämmung (ZMW-KS_WZ)

Feuchteprofile für

- (i) den Referenzzustand vor dem Versuch
- (ii) den Zustand nach 72-stündiger außenseitiger Beanspruchung
- (iii) den Zustand nach weiterer 24-stündiger innen- und außenseitiger Beanspruchung

