

Heike Dreuse, Hans-Werner Zier,
Gabriele Grassegger-Schön

**Entwicklung eines Leitfadens
für die Planung und Ausführung
von Neuverfugungen an
Natursteinmauerwerksoberflächen zur
Verbesserung der Dauerhaftigkeit**

F 2946

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9438-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Abschlussbericht

Entwicklung eines Leitfadens für die Planung und Ausführung von Neuverfugungen an Natursteinmauerwerksoberflächen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit

Projektleiterin:

Heike Dreuse

Bearbeiter:

Heike Dreuse¹

Hans-Werner Zier¹

Gabriele Grassegger-Schön²

¹MFPA – Materialforschungs- und –prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar

²HFT – Hochschule für Technik Stuttgart

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) gefördert.

(Aktenzeichen: II 3-F20-11-1-015 / SWD-10.08.18.7-12.14)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

0	Vorbemerkungen	4
1	Einleitung	4
2	Funktionen von Verfugungen und Anforderungen	8
3	Schäden und Schadensursachen an Verfugungen	10
3.1	Schäden aus dem Inneren des Mauerwerks	11
3.2	Expositionsbedingte Schäden	13
3.3	Schäden durch Materialunverträglichkeiten	15
3.4	Fehlerhafte Ausführungen von Verfugungen	15
3.5	Grenzen für Neuverfugungen	16
4	Veränderungen in oberflächennahen Bereichen unter Nutzungsbedingungen	17
5	Erfassung thermischer und hygrischer Veränderungen	21
6	Größenordnungen thermischer und hygrischer Einflüsse	23
7	Anpassungsmöglichkeiten von Mörtelsystemen	25
8	Leitfaden für die Auswahl von Mörteln für Verfugarbeiten	26
8.1	Übersicht zum Leitplan	26
8.2	Erläuterungen zu den einzelnen Arbeitsschritten	28
8.3	Beispiel für die Anwendung der vorgeschlagenen Vorgehensweise	34
8.4	Hinweise auf besonderen Arten der Verfugung	36
8.5	Hinweise zu bindemittelspezifischen Aspekten	37
9	Literaturverzeichnis	39
10	Anlagenverzeichnis	41

0 Vorbemerkungen

Vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ wurde das Forschungsvorhaben „Entwicklung eines Leitfadens für die Planung und Ausführung von Neuverfugungen an Natursteinmauerwerksoberflächen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit“ gefördert.

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgte von Juni 2012 bis Oktober 2014 durch die Materialforschungs- und –prüfanstalt an der Bauhaus Universität Weimar und die Hochschule für Technik Stuttgart. Die Unternehmen HECK Wall Systems GmbH & Co. KG Marktredwitz, MAXIT Baustoffwerke GmbH Krölpa, Romstedt – Technologien für Restauratoren Kirchheim, Nüthen Restaurierungen GmbH & Co.KG Erfurt und Bauer-Bornemann Steinrestaurierung GmbH Bamberg unterstützten das Projekt.

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines Leitfadens zur Verknüpfung von Informationen aus Bauzustandserfassungen, von Materialeigenschaften, von nutzungsbedingten sowie expositionsbedingten Einflüssen und die Ableitung technologischer Anforderungen an Mörtelsysteme für Neuverfugungen von Natursteinmauerwerk.

Der entstandene Leitfaden soll ein Hilfsmittel für Bauherren, Planer und Ausführende sein, die Erneuerungen von Verfugungen an Natursteinsichtmauerwerk wünschen, vorbereiten und ausführen. Die erarbeitete Vorgehensweise ist im Neubaubereich ebenfalls anwendbar.

Im Rahmen der Arbeiten ergaben sich Fragen, die als bereits geklärt angenommen worden waren. Weil das nicht immer der Fall war, sind an verschiedenen Stellen orientierende Untersuchungen durchgeführt worden. Einige Fragen mussten auch offen bleiben.

1 Einleitung

In Deutschland gibt es nahezu flächendeckend Gebäude, Brücken und Stützmauern mit Sichtflächen aus Natursteinmauerwerk oder mit Natursteinverblendmauerwerk. Die regionale Verteilung und Häufigkeit der Anwendung richtet sich nach den geologischen Vorkommen von geeigneten Gesteinen und nach den historisch verfügbaren und sich entwickelnden Transportmöglichkeiten (z.B. Schiffstransport, Beginn des Bahntransportes).

Natursteinsichtmauerwerk kann in verschiedenen Ausführungsarten vorkommen. Nach [1] zählen dazu:

- Trockenmauerwerk,
- Zyklopenmauerwerk und Bruchsteinmauerwerk,
- hammergerechtes Schichtenmauerwerk,
- unregelmäßiges Schichtenmauerwerk,
- regelmäßiges Schichtenmauerwerk,
- Quadermauerwerk und
- Verblendmauerwerk (Mischmauerwerk).

Außer beim Trockenmauerwerk sind bei allen genannten Ausführungsarten der Mauerwerke nachträgliche Verfugungen mit Mörteln oder der Abgleich mit dem Mauermörtel üblich. Teilweise erfolgen Strukturierungen der Fugen an den Oberflächen.

Einige Beispiele für Ausführungsarten von Natursteinmauerwerk sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Die Bilder 1 bis 4 zeigen Beispiele von möglichen Erscheinungsformen von Natursteinmauerwerk.

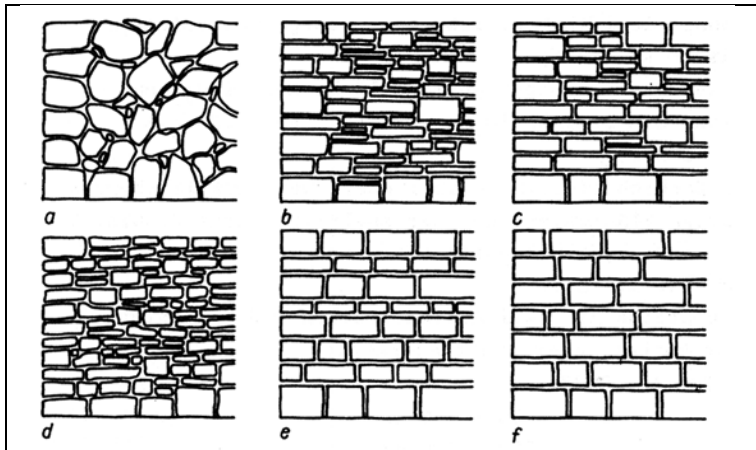


Abb. 1: Beispiele für Ausführungsarten von Natursteinmauerwerk [2]

- a – Zyklopenmauerwerk
- b – hammergerechtes Schichtenmauerwerk
- c – unregelmäßiges Schichtenmauerwerk
- d – Bruchsteinmauerwerk
- e – regelmäßiges Schichtenmauerwerk
- f – Quadermauerwerk



Bild 1: Bruchsteinmauerwerk aus gespaltenen Findlingen mit hohem Zwickelanteil aus Findlingsbruch ohne nachträgliche Verfugung mit oberflächennahen Mörtelauswitterungen



Bild 2: Historisches Feldsteinmauerwerk mit neuer, tief hinter den Steinoberflächen zurückliegender Verfugung



Bild 3: Schichtmauerwerk aus mit Kalkmörtel versetzten Sandsteinen und Gipsmörtelverfugung



Bild 4: Schichtenmauerwerk einer Stadtmauer mit sehr hohem Gipssteinanteil

Ein sehr hoher Anteil der Verfugungen an Natursteinmauerwerksoberflächen von Baudenkmalern, die zum Teil zu herausragenden Kulturgütern zählen, ist mehr oder weniger geschädigt. Die Schäden sind teils alters- und nutzungsbedingt. Es gibt aber auch Schäden, die durch die Verwendung ungeeigneter Mörtel oder Fehler bei der Verarbeitung entstanden sind.



Bild 5: Bruchsteinmauerwerk aus Kalkstein und Travertin mit starkem Bewuchs infolge Wassereintrag über die Mauerkrone



Bild 6: Wand mit stark zurückgewitterten Fugen im Natursteinmauerwerk in einer ehemaligen Klosterkirche mit Brand Schäden an Steinen



Bild 7: Mauerwerk einer Stützmauer aus Schiefergestein mit tiefen Auswitterungen der Gipsmörtel als Folge von höheren Dolomitanteilen im Gips und rückseitigem Wassereintrag



Bild 8: Ehemals verputztes Bruchsteinmauerwerk aus Sandsteinquadern mit Flusskieseln, Schieferstücken und Dachziegelbruch als Zwickelmaterial in den Fugenbereichen



Bild 9: Quadermauerwerk aus Wartburgkonglomerat als Trockenmauerwerk



Bild 10: Quadermauerwerk aus Wartburgkonglomerat mit verschiedenen Ausbesserungsmörteln in den Fugen und Bestandsmörtel (Pfeil) mit Romanzement als Bindemittel

Die Schäden an Natursteinmauerwerksoberflächen betreffen nicht nur den „alten“ unsanierten Gebäudebestand, sondern auch bereits sehr aufwendig und kostenintensiv sanierte Bauwerke.



Bild 11: Mauerwerk aus Kalkstein und Travertin aus Altsteinen wenige Jahre nach der Neuerrichtung



Bild 12: Quadermauerwerk mit vorgeblendeten Sandsteinplatten nach starker Rückwitterung (Die Kreuze kennzeichnen den verblendeten Bereich über dem Sockel.)

Bei Verwendung ungeeigneter Mörtel oder unzureichender Nachbehandlungen kann es schnell zu Schäden kommen. Die Verfugmörtel werden dann von Rissen durchzogen (Bild 11) und platzen bis in Schichtdicke der Verfugungstiefe – oft in einzelnen Schichten von 0,5 bis 1 cm Dicke – ab.

Bei stark angewitterten Natursteinoberflächen können die Oberflächenbereiche zurückgearbeitet werden und Steinplatten, die in der Größe und Art den Bestandsquadern entsprechen, vorgeblendet werden. Das Beispiel in Bild 12 zeigt, dass bei Verwendung falscher Hinterfüll- oder Klebmörtel die Schadhazone verlagert werden und vorher ungeschädigte Bereiche in Mitleidenschaft gezogen werden. Die Verblendplatten selbst sind direkt über dem Sockel ebenfalls geschädigt.



Bild 13: Bruchsteinmauerwerk aus gespaltenen Findlingen mit „erhaben“ aufgeführter Verfugung



Bild 14: Sandsteinquadermauerwerk mit Verfugung nach vorheriger Restaurierung mit Steinerfüllmörtel („E“)

Bei Neuverfugungen können schnell Schwachstellen entstehen. Zum Beispiel kann Wasser in das Mauerwerk über die Fugen eindringen, wenn Stausituationen (Bild 13) zwischen Fugenrand und Steinrand entstehen.

Zur Ausbildung von gleichmäßigen Fugengeometrien ist es ggf. erforderlich, die Steinflanken mit Steinerfüllungsmörteln (Bild 14) neu aufzubauen. Verfugmörtel müssen dann in ihren Eigenschaften auf den Naturstein und den Steinerfüllungsmörtel abgestimmt werden.

Bei sachgemäßer Ausführung von Neuverfugungen an Natursteinmauerwerk, in dem keine aktiven Feuchte- und Salzbelastungen vorhanden sind, kann mit einer Lebensdauer von 35 bis 40 Jahren [3] gerechnet werden.

In der Praxis ist die Lebensdauer oft wesentlich kürzer. Im Extremfall versagen neu ausgeführte Verfugungen in ihrer Hauptfunktion (Witterungsschutz) schon nach einer Winterperiode. In der Folge des Versagens kann es zu Störungen im Feuchtehaushalt des gesamten betroffenen Mauerwerks und längerfristig zu statischen Beeinträchtigungen kommen. Ebenso betroffen sein können von derartigem Mauerwerk umgebene Räume.

Ungeeignete Mörtel, die zur Verfugung zum Einsatz kamen, können weiterhin Schäden an der an den Mörtel angrenzenden Steinsubstanz bewirken. Daraus kann ebenfalls eine Verkürzung der Gesamtnutzungsdauer des Gebäudes oder ein unwiederbringlicher Verlust an originalen Natursteinoberflächen an Denkmälern resultieren.

In Normen (z.B. [1]), Standardwerken (z.B. [4 und 5]) und WTA-Merkblättern (z.B. [6] und [7]) werden die Qualität und der Zustand der Fugenmörtel im Mauerwerksverband vor allem nach Aspekten der Stabilität des Mauerwerks betrachtet. Besonderheiten, die bei Verfugungen von Mauerwerk vor allem bis in Fugentiefen von maximal 5 cm eine Rolle spielen, bleiben überwiegend unberücksichtigt.

Der Schutz von Natursteinmauerwerkoberflächen im Außenbereich vor dem Eintrag von Wasser und Schadstoffen erfordert eine fachgerechte Ausführung der Verfugung des Mauerwerks.

Bei historischem Mauerwerk stehen an erster Stelle Voruntersuchungen, die die statische Sicherheit, die Belastungssituationen (Feuchte, Salze) im Mauerwerk, die Erfassung des Materialbestandes (Mörtel, Stein), von Schäden am Steinmaterial (z.B. Absandungen, Abschalungen, Ausbrüche), von besonderen Expositionen (z.B. Schlagregenhäufigkeit), von baulichen Besonderheiten (z.B. Mauervorsprünge, Eckausbildungen) und von Schadensursachen (z.B. Materialunverträglichkeiten zwischen Bestand und Mörteln aus Sanierungsmaßnahmen) beinhalten müssen.

Bei der Sanierung von Natursteinmauerwerkoberflächen werden Prioritäten bei Neuverfugungen oft auf ästhetische Gesamteindrücke (z.B. Oberflächengestaltung, Farbigkeit) gesetzt. Unberücksichtigt bleiben häufig durch äußere und innere Einflussfaktoren bedingte Veränderungen am Sichtmauerwerk während der Nutzung sowie Einflüsse der verbauten Materialien (Stein und Mörtel).

Zur Gewährleistung einer hohen Ausführungsqualität und damit einer langen Lebensdauer von Verfugungen müssen geometrische (z.B. Steinabmessungen, Fugenbreiten), stoffliche (Materialeigenschaften) und verarbeitungstechnische (z.B. Profilierung der Fugenoberflächen) Faktoren gemeinsam berücksichtigt und in Einklang gebracht werden.

Grundlagen zur Bewertung der Standsicherheit, zu Voruntersuchungen, zu Einflüssen aus Belastungen der Umwelt, zu Analyse- und Bewertungsverfahren und zu Instandsetzungsmaßnahmen an Natursteinmauerwerk sind in [8] zusammengefasst. Detaillierte Aussagen zur Verfugung von Natursteinmauerwerk wurden von den Autoren nicht getroffen.

2 Funktionen von Ver fugungen und Anforderungen

Die Oberflächenerscheinung von Natursteinsichtmauerwerk ist geprägt durch das Steinmaterial, deren Oberflächenstruktur und Form, durch deren Größe und Größenverteilung sowie durch die Art der Ver fugung.

Für die Ver fugung ergeben sich vielfältige Möglichkeiten der Gestaltung nach Fugenbreiten, -farbigkeiten, -strukturen und -profilen.

Die einfachste Form der Ausbildung einer Ver fugung an einer Mauerwerks oberfläche ist das glatt an der Oberfläche ausgeführte Abziehen des Mauer Mörtels beim Versetzen der Steine. Voraussetzung dafür ist eine ausreichende Witterungsbeständigkeit des Mörtels. Es besteht ebenfalls die Möglichkeit bei dieser Gelegenheit die Fuge zu strukturieren (z.B. Fugenritzung) oder eine aus der Wandfläche herausragende Profilierung der Fuge zu erzeugen.

Für die konstruktive Mauerwerksausführung wurden oft Lehm Mörtel oder Luftkalk Mörtel verwendet. Nachträgliche Ver fugungen mit anderen Mörteln dienen dann vor allem dem Witterungsschutz des Mauerwerks. Neben Mörteln mit hydraulischen Bindemitteln oder Anteilen hydraulischer Bestandteile in den Mörtelbindemitteln kamen auch gipshaltige Mörtel und Gipsmörtel zur Anwendung.

Nachträglich ausgeführte Ver fugungen sollten bereits unmittelbar nach der Ausführung der Mauerwerkerrichtung die Mauer Mörtel besonders schützen und ggf. zusätzlich ästhetische Funktionen übernehmen, die mit den Mauer Mörteln allein nicht erreichbar wären.

Während der Nutzung sind die Wand oberflächen nicht nur der Witterung ausgesetzt, sondern auch Einflüssen von Luftschadstoffen und Niederschlagsinhaltsstoffen. Diese führen zu zusätzlichen Abnutzungserscheinungen und Schädigungen an Stein- und Mörteloberflächen. Mit erforderlichen Instandsetzungs- oder Reparaturmaßnahmen sind somit nicht nur die Materialien im Bestand zu berücksichtigen sondern auch die während der Nutzung entstandenen Veränderungen und deren Ursachen.

Hinweise zur Vorgehensweise bei der Erneuerung von Ver fugungen an Natursteinsichtmauerwerk werden in [6] gegeben. Als Inhalte von „Vorbereitenden Maßnahmen“ werden Erfassungen von Istzuständen, die Erarbeitung eines Instandsetzungskonzeptes und das Anlegen von Musterflächen gefordert. Bei der „Ausführung und Instandsetzung“ wird zwischen „Fugenreparatur“ und „Fugenerneuerung“ unterschieden. Die beschriebenen Vorgehensweisen bei den Fugenreparaturen sind vor allem auf denkmalpflegerische Anforderungen ausgelegt. Für den Fall der „Fugenerneuerung“ werden kurz vorbereitende Maßnahmen zur Sicherung von Steinflanken und beispielsweise das Versetzen von Zwickelsteinen vor dem Ver fugen genannt. Für die Materialauswahl wird eine Vielzahl von Ausgangsstoffen angegeben. Angaben zur konkreten Auswahl fehlen aber. Das „Ver fugen“ selbst wird vor allem aus technologischer Sicht beschrieben und muss auch die Vorbehandlung der Fugen und die Nachbehandlung der Mörtel beinhalten

In [9] ist die Beschreibung einer komplexen Vorbereitung und Planung von Sanierungs- und Restaurierungsmaßnahmen an Natursteinmauerwerk enthalten. Für die Ver fugmörtel („Fugendeckmörtel“) im Natursteinmauerwerk wird unter anderem gefordert, dass „sie stets etwas weicher sein sollten als der Naturstein, jedoch keineswegs so weich, dass keine Flankenhaftung mehr gewährleistet ist“. Als Entscheidungshilfe für die Ver fugmörtelauswahl sind Größenordnungen für Mörtel eigenschaften (Tabelle 1), mit Bezug auf Eigenschaften der Natursteine, angegeben.

Tabelle 1: Anforderung an Verfugmörtel für Natursteinmauerwerk [9]

Eigenschaft des Mörtels	Anforderung bezogen auf Steineigenschaft
dynamischer E-Modul	20 – 60 %
Druckfestigkeit	20 – 60 %
„Feuchtedehnkoeffizient“	50 – 100 %
„Wärmedehnkoeffizient“	50 – 150 %
„Wasseraufnahmekoeffizient“	50 – 100 %
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	50 – 150 %
Haftzugfestigkeit	0,5...1,0 Oberflächenzugfestigkeit Stein

Weitere Hinweise für die Bewertung von Mörteln in Fugen von Natursteinmauerwerk und zu Anforderungen an Verfugmörtel sind in [10] enthalten. Die dort beschriebenen „wesentlichen Anforderungen“ stimmen weitestgehend mit denen in [9] überein. Weiterhin werden in [10] „Anforderungen an Wirksamkeit, Dauerhaftigkeit und Ästhetik“ und „Anforderungen an die Verfahrenstechnik“ aufgelistet. Beschrieben werden auch verschiedene Mörtelvarianten und Kombinationen von Mörteln (mineralische Mörtel, kunststoffmodifizierte Mörtel, Reaktionsharzmörtel) sowie Varianten der Bleiverfugung.

Die Anforderungen in den bisher genannten Literaturquellen beziehen sich schwerpunktmäßig auf Mörtel- und Verbundeigenschaften. Angaben zu Mörtelzusammensetzungen von Verfugmörteln für konkrete Mauerwerke und die Einbeziehung von Einflüssen aus unterschiedlichen Nutzungsbedingungen und / oder Beanspruchungen sind oft nur angedeutet.

Nach den Angaben in [11] und [12] haben Bindemittelarten, Mörtelzusammensetzungen und Applikationstechniken große Einflüsse auf die Eigenschaften der Verfugungen. Ebenfalls hingewiesen wird auf die Bedeutung von Vorbehandlungen der Fugen vor dem Beginn der Applikation. Als mögliche Applikationstechniken werden genannt und beschrieben:

- Handverfugung als klassische Technik,
- maschinelle Verfugung im Nassspritzverfahren,
- maschinelle Verfugung im Trockenspritzverfahren und
- Verfugung im Kartuschenspritzverfahren.

In der Literatur finden sich kaum Hinweise zu Anforderungen an die Verfugmörtel, die aus geometrischen Einflüssen der Natursteine und den Fugenbreiten resultieren sowie zu kurzzeitig auftretenden Mauerwerksverformungen, die im Einbauzustand durch wechselnde äußere Einflüsse (z.B. Sonneneinstrahlung, Schlagregen) bedingt sein können.

Für die Gewährleistung eines ausreichenden Witterungsschutzes hat, neben der Witterungsbeständigkeit der Verfugmörtel, auch die Art der Ausbildung der Fugen eine große Bedeutung.

Idealerweise soll an den Wandoberflächen aufschlagendes Wasser schnell ablaufen. Diese Situation wird erreicht, wenn der Verfugmörtel bündig an die Steinflanken angearbeitet und keine Verzögerung des Fließens verursacht wird (Abb. 2).

Bei offenen Fugen läuft das Wasser in diese hinein und staut sich in Nähe zu den anstehenden Mauermörteln. Diese Situation wird auch erreicht, wenn die Verfugung auf der unteren Steinlage zurückspringend ausgeführt wird oder deutlich aus der Oberfläche herausragt (Abb. 3).

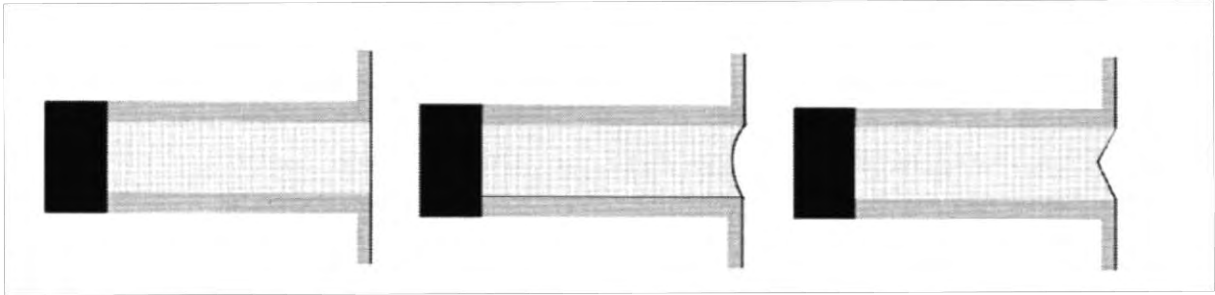


Abb. 2: Fugenausbildungen, die als „normal“ bezeichnet werden [6]

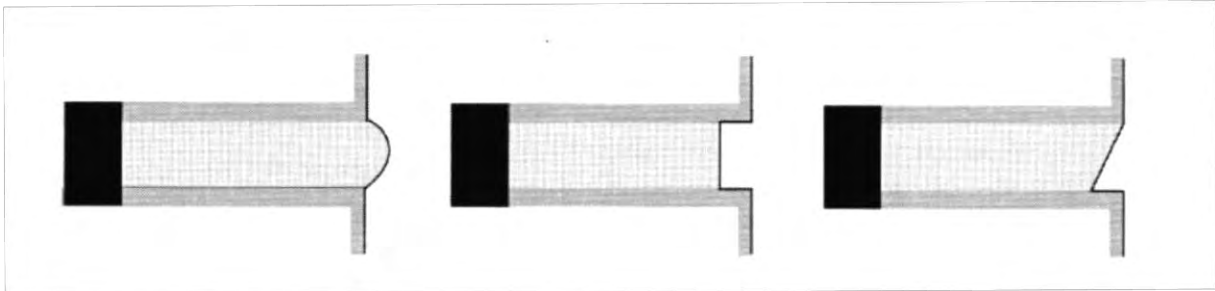


Abb. 3: Fugenausbildungen, die als „problematisch“ angesehen werden [6]

Das Wasseraufnahmevermögen (Saugverhalten) des Verfugmörtels muss an den Naturstein angepasst sein. Gleiche Werte sind hier von Vorteil, sind aber nicht immer realisierbar. Besonders bei witterungsempfindlichen Natursteinen mit höherer kapillarer Wasseraufnahme dürfen keine besonders dichten Mörtel mit sehr geringer Wasseraufnahme eingesetzt werden. Hier kann es zu Stausituationen an den Fugenflanken kommen.

3 Schäden und Schadensursachen an Verfugungen

Die optische Wirkung von Sichtmauerwerk aus Naturstein wird nicht nur durch die Ausführung (Steinarten, Steinformate, Fugenausbildung) sondern auch durch äußere Einflüsse bedingte Veränderungen (durch Bewitterung) bestimmt.

Unter der sichtbaren Oberfläche verbirgt sich ein Mauerwerk, das in unterschiedlichster Weise ausgeführt sein kann und bei der Ausführung der Verfugung ebenfalls berücksichtigt werden muss.

Hinter dem Mauerwerk können sich Hohlräume, Aufschüttungen und / oder natürliche Boden- und / oder Gesteinsschichten befinden. Die aktuelle bzw. ehemalige Nutzung von Räumen (z.B. beheizt, nicht beheizt, Stallnutzung) hinter dem Mauerwerk ist ebenfalls von Bedeutung.

An frei stehenden Mauern, Brücken und Sockeln ist mit verstärkten Einflüssen der Bewitterung zu rechnen und zusätzlich mit Wässern, die in die Mauerkronenbereiche und / oder die bodennahen Mauerwerksteile eindringen können.

Vor Beginn der Verfugung müssen die genannten Situationen im Mauerwerk erfasst und Maßnahmen zur Verhinderung von Auswirkungen auf die Neuverfugung getroffen werden. Sollten diese Maßnahmen nicht oder nur eingeschränkt ausführbar sein, ist nach der Ausführung von Verfugungen mit einer reduzierten Nutzungsdauer und / oder häufigeren Instandsetzungsmaßnahmen zu rechnen. Dann ist die Verfugung im Sinne einer Opferschicht in Anlehnung an [13] zu sehen.

Unter bestimmten Bedingungen (z.B. starke Steinschäden) muss von einer Sichtverfugung Abstand genommen werden und es muss z.B. ein Verputz den Witterungsschutz übernehmen.

Immer zu berücksichtigen ist, dass beispielsweise mit der Ausführung von Maßnahmen zur Reduktion von Feuchtebelastungen nicht kurzfristig eine signifikante Verbesserung eintritt. Während der anschließenden Austrocknungsprozesse muss weiterhin mit Anreicherungen von Salzen in Verdunstungshorizonten und an Oberflächen gerechnet werden.

3.1 Schäden aus dem Inneren des Mauerwerks

Im Inneren des Mauerwerks können sich Bedingungen verändern und diese zu sichtbaren Schäden an den Oberflächen führen.

Durch Lastumverteilungen z.B. nach Baugrundsetzungen oder Feuchteinträgen im Mauerkronenbereich kann es zu Setzungen von losem Hinterfüllmaterial in mehrschaligem Mauerwerk kommen. In der Folge verformen sich Mauerwerksschalen, Fugenflanken reißen ab und an den Wandoberflächen ablaufende Wässer dringen tief in das Mauerwerk ein.

Eine vergleichbare Situation kann entstehen, wenn an innen liegenden Fachwerkkonstruktionen starke Holzschäden (z.B. Fäulnis) auftreten und davor liegendes Natursteinmauerwerk überlastet wird.

In Abhängigkeit von der Nutzung der Gebäude (z.B. Friedhofsnutzung an Kirchen, Stallnutzung oder Lagerräume für gesalzene Lebensmittel) können Salzbelastungen im Mauerwerk vorhanden sein. Kommt es durch die beschriebenen Prozesse zu Feuchteinträgen, werden die Salze mobilisiert, umgelagert und in Abhängigkeit von ihrer Löslichkeit abgelagert. In Verbindung mit starken Feuchteinträgen können so bereits geringe Salzbelastungen Schäden an den Fassadenflächen bewirken.



Bild 15: Kalksteinmauerwerk mit Fugenreparaturen unterschiedlicher Art nach Schäden durch Feuchteinträge über die Mauerkrone



Bild 16: Notdürftig abgedeckte frei bewitterte Kalksteinmauer mit beginnenden Zerfallerscheinungen durch Feuchteinträge über rückwärtig anstehendes Erdreich



Bild 17: Kalksteinmauer mit neuer Mauerkronenabdeckung und Feuchtehorizont im unteren, rückseitig erdberührten Bereich



Bild 18: Detailansicht zu Bild 17 mit Übergangsbereich zwischen feuchtem und trockenem Mauerwerk

Im Inneren des Mauerwerks können andere Steinarten als in der Sichtfassade verbaut sein. Die Ursachen sind durch Kosten und Verfügbarkeit zur Bauzeit bedingt. Die Anforderungen an die Witterungsbeständigkeit können im Mauerwerksinneren auch geringer sein. In der Folge kann es zu unterschiedlichem Verhalten der Steine bei starker Feuchtebeaufschlagung kommen. In Abhängigkeit vom Wasseraufnahmevermögen und –speichervermögen der Materialien sind partiell auftretende höhere Belastungen möglich. Salzanreicherungen können sich in den Randbereichen bilden. Die genannten Veränderungen können optische Beeinträchtigungen an Sichtfassaden – Zerstörung einzelner Steinoberflächen, partielle Ausblühungen und Mörtelzerstörungen – mit ansonsten gleichmäßiger Ausführung bewirken.

Hinter dem Mauerwerk können sich unterschiedlich genutzte oder nicht genutzte Räume befinden. Möglich sind auch Fels und anstehendes oder aufgefülltes Erdreich und in diesem Erdreich wasserführende Schichten.



Bild 19: Stützmauer mit rückseitiger Erdanschüttung wenige Jahre nach Sanierungsmaßnahmen



Bild 20: Stützmauer mit Verformungen durch rückseitigen Erddruck oder durch voluminöse Wurzeln

Die genannten Situationen müssen vor der Reparatur oder Neuausführung von Verfügungen bekannt sein und Maßnahmen zur Sicherung und Feuchtereduktion getroffen werden.

3.2 Expositionsbedingte Schäden

Mauerwerksoberflächen, die der freien Bewitterung unterliegen, werden durch Regen-, Wind-, Frosteinwirkungen und Sonneneinstrahlung verändert.

Der Umfang der Veränderungen ist von den Eigenschaften der verbauten Materialien (Naturstein, Mörtel), von der Exposition der Flächen und der architektonischen Gliederung der Wandoberflächen abhängig.

An Brücken, mit der Gebäudehöhe und mit der Orientierung in die regionalen vorhandenen Hauptwindrichtungen können erhebliche Unterschiede bei den Oberflächenveränderungen auftreten.



Bild 21: Quadermauerwerk aus Elbsandstein in geschützter Exposition mit starker Verschmutzung



Bild 22: Quadermauerwerk aus Elbsandstein in stärkerer Bewitterung mit Steinschäden und ausgewitterten Fugen

In Innenräumen muss bei tonig gebundenen Sandsteinen unter wechselnden Feuchtebelastungen, wie sie bei Kondenswasserbildungen infolge diskontinuierlicher Nutzung (z.B. Gastronomie in Bier- oder Weinkellern) auftreten können, mit Absandungen und Gefügeschäden durch wechselnde Quell- und Schwindprozesse gerechnet werden.

Stark strukturierte Steinflächen (z.B. stark bossierte Steine) können im Außenbereich Schäden an Fugen überdecken. Teilweise werden dort offene Fugen optisch nicht wahrgenommen und ein Instandsetzungsbedarf nicht erkannt.



Bild 23: Quadermauerwerk aus Kyffhäuser-Sandstein mit tief zurückliegenden Fugen



Bild 24: Detail zu Bild 23: Die Fugenränder sind angewittert und eine nachträgliche Reparatur mit Verfugmörtel löst sich ab.

In Meeresnähe ist davon auszugehen, dass mit dem Wind und den Niederschlägen auch Salze auf die Fassadenoberflächen gelangen. Hier können oberflächennah auch an ansonsten trockenem Mauerwerk Salzbelastungen und –anreicherungen in geschädigten und offenen Fugen auftreten.

Mit vergleichbaren Situationen ist in der Nähe von Industrieanlagen und landwirtschaftlichen Großanlagen – auch wenn diese nicht mehr in Betrieb sind oder nicht mehr existieren – zu rechnen.

Verkehrsreiche Straßen in der Nähe von Gebäuden können ebenfalls zu hohen Belastungen an den Oberflächen führen. Hier sind es vor allem Bestandteile aus den Abgasen, Reifen- und Straßenbelagsabrieb, die die Wandoberflächen kontaminieren.



Bild 25: Neu aufgebaute Mauer nach wenigen Jahren Standzeit mit Schäden im Mauerkronenbereich und Kalkauswaschungen an den Wandflächen



Bild 26: Mauerkronenbereich zu Bild 26: Es kam zu Flankenabrissen der Verfugung und nach Wassereinträgen zu Frostschäden.



Bild 27: Straßenpflaster im direkten Kontakt zum Quadermauerwerk



Bild 28: Detail zu Bild 27: Wasser und Salze von der Straße dringen direkt in das Mauerwerk ein und führen zu hohen Belastungen.

Häufig sind Gebäudesockel an historischen Gebäuden als Natursteinsichtmauerwerk ausgeführt. In innerstädtischen Bereichen und an viel befahrenen Straßen unterliegen diese einer hohen Streusalzbeaufschlagung. Diese führt zu sehr hohen Salzbelastungen im Mauerwerk und an dessen Oberflächen.

Fehlende oder falsch ausgeführte Mauerkronenabdeckungen können Ursachen für Schäden an frei stehenden Mauern sein.

3.3 Schäden durch Materialunverträglichkeiten

In Ver fugungen von Natursteinsichtmauerwerk muss mit allen Bindebaustoffen in den Mörteln, die während der Nutzungsdauer zur Verfügung standen, gerechnet werden. An sehr altem Mauerwerk wird eher von Kalkmörteln ausgegangen. Ein Fehlen dieser Mörtel in den oberflächennahen Fugen bedeutet nicht, dass es schon immer eine „of-fene“ Fuge war.

Bei Reparaturen können Kalkmörtel durch Mörtel, die hydraulische Bindemittel (Romanzemente, Portlandzemente, hydraulische Kalke) oder Anteile dieser gemeinsam mit Kalk enthalten, ersetzt worden sein.

Besonders im 19. Jahrhundert ergaben sich im Zuge der industriellen Entwicklung schnelle Veränderungen bei den zur Verfügung stehenden Bindemitteln. Zementgebundene Mörtel erhielten eine gewisse Favoritenrolle bei der Ver fugung von Natursteinsichtflächen.

Neben den genannten Bindemitteln kamen auch Dolomitkalke zum Einsatz. Durch Kontakte mit schwefelhaltigen Luftschadstoffen bildeten sich häufig Magnesiumsulfate. Diese verursachen neben Schäden an den Mörteln auch Schäden an den Steinflanken.

In Regionen mit gut zugänglichen Gipsvorkommen – auch solche von geringen Mächtigkeiten – kamen Gipsmörtel im Mauerwerksbau und zur Ver fugung auch im Außenbereich zum Einsatz. Die Anwendung reicht bis in das 21. Jahrhundert.

Wenn Unverträglichkeiten nicht berücksichtigt werden, kann die Vielfalt der möglichen Bindemittel in den Mauermörteln, die mit Ver fugmörteln in Kontakt standen oder gleichzeitig Ver fugmörtelfunktionen hatten, und den nachträglich eingebrachten Ver fugmörteln zu erheblichen Schäden führen.

So können starke Schäden [14] auftreten, wenn Gipsmörtel, die als Mauermörtel verbaut sind, mit Mörteln, die hydraulische Bindemittel enthalten, in direkten Kontakt kommen.

Oft wird gewünscht, dass die Mörtel, die im historischen Bestand vorhanden waren, wieder verbaut werden. Prinzipiell ist diese Forderung legitim. Zu berücksichtigen ist aber, dass es bedingt durch eine Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte dauernde Nutzung nicht nur zu Veränderungen an den Ver fugmörteln sondern auch zu Veränderungen an den Steinen durch verschiedenste Belastungssituationen kam. In der Folge ergeben sich spezielle Anforderungen an die Mörtel, die die ursprünglich vorhandenen Bindemittel nicht erfüllen können.

3.4 Fehlerhafte Ausführungen von Ver fugungen

Ausführungen von Ver fugungen an Mauerwerk aus Natursteinen geringer Druckfestigkeiten aber ausreichender Witterungsbeständigkeit mit sehr festen Mörteln (Druckfestigkeiten $> 10 \text{ N/mm}^2$) können zu Steinschäden an den Fugenflanken führen oder auch zur Zermürbung von oberflächennahen Steinbereichen. (siehe auch Anlage D1)

Ver fugungen mit Mörteln geringer Festigkeit ($< 2 \text{ N/mm}^2$) in Mauerwerken mit sehr dichten Steinen unterliegen einer verstärkten Rückwitterung bei Expositionen mit hoher Schlagregenbelastung (z.B. Türme, Westfassaden) im Vergleich zu den Steinflächen. Es muss mit verkürzten Wartungsintervallen gerechnet werden.

Die Ausführung von nachträglichen Ver fugungen sollte in ihrer Tiefe mindestens das Zweifache, besser das Dreifache, der Fugenbreite betragen. Diese Rahmenbedingung ist allgemein bekannt, wird aber häufig ignoriert, da nach optisch schöner Ausführung die Tiefe der Ver fugung nicht mehr wahrnehmbar ist, und Schäden oft unmittelbar nach der Ausführung noch nicht sichtbar sind.

Mörtelfreie Fugen (außer im Trockenmauerwerk) sind immer ein Indiz für tief ausgewitterte Mörtel. Das Fehlen der Verfugung sollte nie als Begründung für das Belassen dieses Zustandes verwendet werden. Eine offene Fuge erlaubt verstärktes Eindringen von Wasser in das Mauerwerk und verringert dessen Nutzungsdauer.

Die Ausführung der Fugen selbst kann Schäden verstärken oder auch auslösen. Mörtel an horizontal verlaufenden Verfugungen, die über die Unterkante des Steins über der Fuge hinausreichen, verzögern den Abfluss von Wässern auf den Oberflächen, begünstigen partiell die Ablagerung von Schmutz und Schadstoffen, und nach Ausbildung einer Vorschädigung kann Wasser verstärkt in das Mauerwerk eindringen.

Bei Horizontalfugen, deren obere Kante bündig mit den Steinkanten abschließt oder etwas zurückgesetzt ist und deren unterer Abschluss ebenfalls zurückgesetzt ist, besteht die Gefahr, dass wie bei einer offenen Fuge, Wasser in das Mauerwerk eindringt. Außerdem besteht auch hier die Ablagerungsmöglichkeit von Schmutz und von Schadstoffen.

Bei stark zurückgewitterten Steinkanten, die keine exakte Anbindung der Verfugung mehr erlauben, wird in der Praxis oft ein „Fugenverputz“ (der Verfugmörtel wird ausgehend von der Fugen dünn über die Steinflanken gezogen) oder ein „steinfühiger Putz“ (es erfolgte ein Verfügen und über Fuge und Stein wird flächig ein dünner Putz aufgetragen). Beide Varianten sind sehr witterungsanfällig und in der Regel nur für temporäre Anwendungen geeignet. Dauerhafte Lösungen (mehrere Jahrzehnte) sind nicht zu erwarten.

3.5 Grenzen für Neuverfugungen

Beim Vorkommen von Natursteinen mit geringerer Witterungsbeständigkeit in den Sichtflächen und starker Anwitterung dieser z.B. infolge sehr langer Nutzungsdauer bzw. fehlender Instandhaltung, können die Steinflächen so stark abgewittert und geschädigt sein, dass eine Instandsetzung allein über eine Verfugung nicht mehr möglich ist. In diesen Fällen muss über andere Maßnahmen zum Schutz des Mauerwerks entschieden werden.

An historisch sehr wertvollen Oberflächen können unter der Maßgabe des weitestgehenden Erhaltes der optischen Erscheinung steinkonservatorische Maßnahmen (Festigung, Ergänzung mit Mörteln) die Steinoberflächen und Steinkanten neu aufgebaut werden. Es ist zu berücksichtigen, dass durch die Verwendung von Steinfestigern eine Resthydrophobie vorhanden sein kann und diese vor dem Beginn der Neuverfugung abgebaut sein muss. Dieser Prozess dauert in der Regel mindestens 6 Wochen. Bei ungünstigen Witterungsverhältnissen, z.B. langfristig hohe Luftfeuchtigkeiten, kann sich der Zeitraum verlängern.

Sind starke Schäden vorhanden und die Steinsichtigkeit der Oberflächen hat eine geringere Priorität im Vergleich zum Schutz des restlichen Bestandes kann ein flächiger Putzauftrag den Witterungsschutz des Mauerwerks gewährleisten. Fehlende Tragfähigkeiten der Untergründe können durch die Verwendung von geeigneten Putzträgern kompensiert werden. Durch farbliche und strukturelle Anpassungen der Oberflächen ist eine optische Annäherung an den ursprünglichen Bestand möglich.

Sind partiell extreme Schäden vorhanden und der überwiegende Teil der Fassadenflächen ist noch weitestgehend schadfrei – häufig bei Feuchte und Salzbelastungen in Verbindung mit Spritzwasser oder im Mauerwerk aufsteigender Feuchte – können, nach Maßnahmen gegen die Feuchteinträge, Natursteinplatten nach dem Zurückbauen der geschädigten Oberflächen eingebaut werden. Mit diesen vorgesetzten Platten können originale Steinsichtigkeiten und Fugenbilder wieder erzeugt werden. Zu beachten ist, dass geeignete Stein- und Mörtelmaterialien zum Einsatz kommen.

Bei Vorhandensein von hohen Salzbelastungen im Natursteinmauerwerk kann das Aufbringen von Putzen auf geschädigte ehemals steinsichtige Oberflächen von Vorteil sein. Der Putz verbessert den Witterungsschutz und nimmt als Opferschicht Salze auf. Zerstörungsprozesse werden von den Steinoberflächen in den Putz verlagert. (z.B. nach [13])

In Innenräumen können Putzschichten bei Vorhandensein von tonig gebundenen Sandsteinen Zerstörungsprozesse durch wechselnde Kondensatbildungs- und Trocknungsprozesse verhindern. Der Putz puffert die Feuchtebelastung für den Stein. Besonders in gastronomisch genutzten Räumen wird das Herabrieseln von abgewittertem Material verhindert.

4 Veränderungen in oberflächennahen Bereichen unter Nutzungsbedingungen

Neben Einflüssen aus Belastungssituationen im Mauerwerk und / oder baulichen Situationen hinter dem Mauerwerk werden Verfugmörtel und Natursteinoberflächen vor allem durch die Witterung und von Inhaltsstoffen in der Luft und in Niederschlägen beeinflusst.

Die Intensität der Witterungseinflüsse kann in Abhängigkeit von standortspezifischen Faktoren und / oder der Exposition bei gleichartigem Mauerwerk und gleicher Verfugung sehr unterschiedlich sein.

Durch länger andauernde Einwirkungen (Jahre bis Jahrzehnte) von Luftschadstoffen und Niederschlagsinhaltsstoffen kann es zu stofflichen Veränderungen der Mörtel- und Steinoberflächen kommen.

Besonders an den Fugenflanken zwischen Verfugmörteln und Natursteinen sind bei Beanspruchungen durch Bewitterung Probleme zu erwarten. Die oberflächennahen Kontaktzonen bis zu Tiefen von etwa 5 cm sind kurzzeitig wechselnden Feuchte- und Temperatureinflüssen wesentlich stärker ausgesetzt als tiefere Fugenbereiche.

Bei der Auswahl geeigneter Mörtel für Reparaturen oder für Neuverfugungen ist zu beachten, dass vor allem folgende Einflüsse (siehe auch Abb. 4) wirksam sind:

- Thermische Beanspruchungen der Mauerwerksoberflächen führen zu Volumenveränderungen an Steinen und Mörteln. Im Fall des Fehlens eines Verfugmörtels kann sich der Stein oberflächennah unbehindert ausdehnen und die Fuge wird schmaler. Ist Verfugmörtel vorhanden, wird der Naturstein in seiner Ausdehnung behindert und der Mörtel seinerseits dehnt sich ebenfalls aus. Auf diese Weise bauen sich Spannungen auf, die zu Schäden am Stein und / oder der Verfugung führen können.
- Dunkle Gesteine, verschmutzte Oberflächen und dunkle Anstriche auf Wandoberflächen führen zur Vergrößerung von Temperaturgradienten und damit auch zu größeren thermisch bedingten Dehnungen.
- Hygrische und nutzungsbedingte Verformungen (z.B. Überlastungen) können zu vergleichbaren Effekten, wie zuvor beschrieben, führen.
- Die hygrischen Volumenveränderungen der Natursteine können sich materialbedingt stark unterscheiden. Vor allem bei Sandsteinen mit Tonmineralbindung muss mit stärkeren hygrisch bedingten Volumenänderungen gerechnet werden. Salzbelastungen in den Steinen können die Effekte verstärken.
- Die Ausmaße von Verformungen der Steine und Mörtel sind neben den Materialeigenschaften von den Steingeometrien und den Fugenbreiten abhängig. Somit müssen auch diese Faktoren bei der Mörtelauswahl berücksichtigt werden. Bei größeren Steinformaten sind die Auswirkungen von Verformungen auf die Fugen größer und ebenfalls bei schmalen Fugen.

- Durch natürliche Verwitterungen und die Einwirkung von Luftschadstoffen kann es oberflächennah zu Steinschäden kommen. Die Steineigenschaften können sich ändern und es sind ggf. besondere Anforderungen an neue Verfugmörtel erforderlich.
- Frisch eingebrachte Verfugmörtel ändern sich in ihren Eigenschaften während der Verfestigung. Bei langsam erhärtenden Mörteln mit lang andauernder Nachverfestigung (z.B. NHL - gebundene Mörteln) können sich große Spannungen zwischen den Verfugmörteln und den Steinflanken aufbauen.
- Im Bereich von Sockeln können Auftaumittel zu Belastungen führen. Diese müssen bei der Vorbereitung von Sanierungsmaßnahmen berücksichtigt werden.

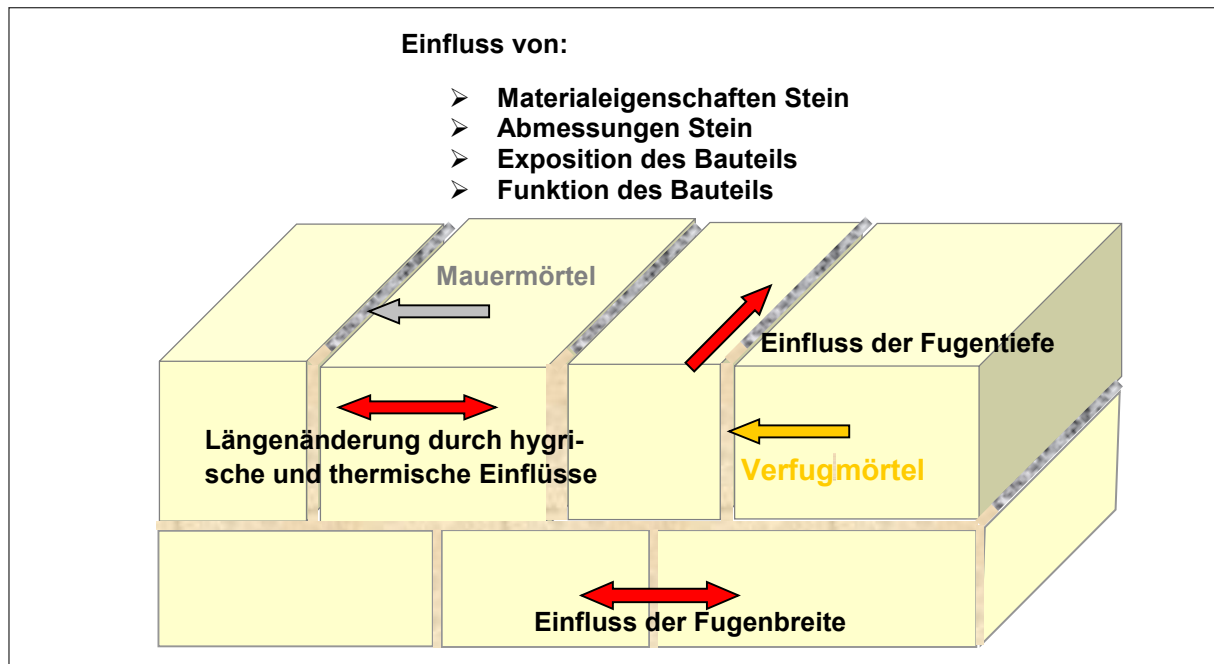


Abb. 4: Schematisierter Teilbereich eines Natursteinmauerwerkes mit Verfügen und möglichen Einflüssen während der Nutzung

Thermische Veränderungen der Natursteinmauerwerksoberflächen bei Brandeinwirkungen sind beispielsweise in Abb. 5 schematisch dargestellt. Die gleichen Veränderungen können bei quellfähigen Natursteinen (z.B. Sandsteine mit Tonmineralbindung) bei Feuchteeinwirkungen (z.B. länger anhaltender Schlagregen) oder bei allen Natursteinen durch thermische Beanspruchungen (z.B. sind Tagestemperaturdifferenzen an dunklen Bauwerksoberflächen bis über 60 K möglich) auftreten.

Beim Vorliegen eines Steinmaterials mit homogener Struktur (z.B. gleichmäßig geschichteter Sandstein; Abb. 5-2) kommt es nach thermischer Beanspruchung oberflächennah zu einer über die Gesamtfläche verteilte gleichmäßige Volumenzunahme. In Abhängigkeit von der Wärmeleitung des Steins erwärmen sich nach und nach auch tiefere Schichten. Durch die Volumenzunahmen werden, wenn die Ausdehnung durch einen Verfugmörtel behindert wird, Spannungen erzeugt. Gibt der Mörtel oder der Stein beim Überschreiten der Zugfestigkeiten nach, werden die auftretenden Spannungen abgebaut und Schäden entwickeln sich. Der Mörtel kann zermürbt werden und Steinschichten können sich an den Oberflächen schalenförmig ablösen. Beim Vorliegen eines Natursteines mit unregelmäßiger Struktur oder mit Vorschädigungen (Abb. 5-3 und 5-4) kommt es bei gleichen Beanspruchungen zu kleinteiligen Abplatzungen.

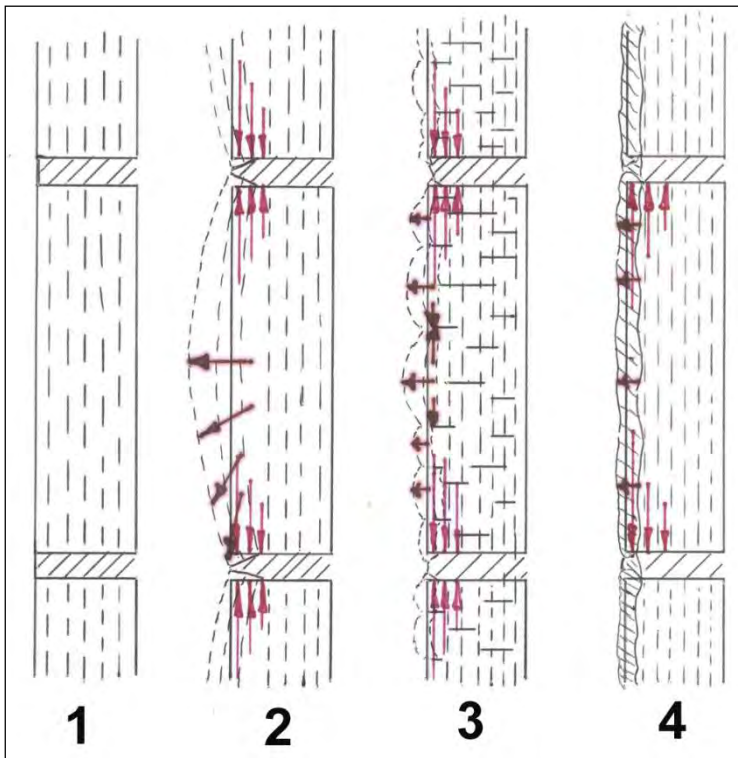


Abb. 5: Schematische Darstellung von Veränderungen an Steinoberflächen und Fugen bei oberflächennahen Verformungen nach thermischen Beanspruchungen (aus [15])

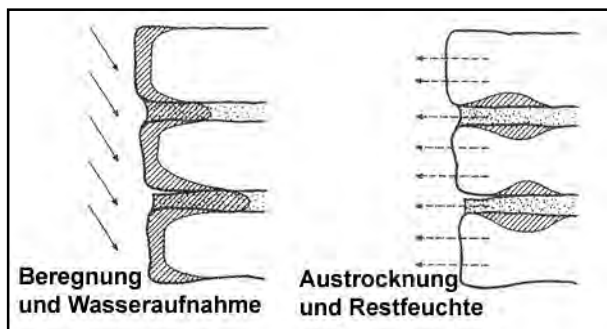
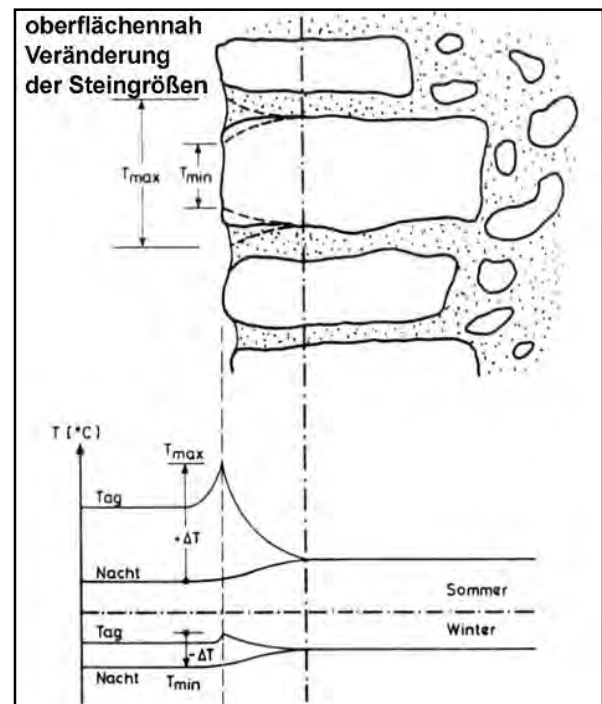


Abb. 6: Schematische Darstellung des Eindringens von Feuchtigkeit und der folgenden Austrocknung (aus [16])

Abb. 7: Schematische Darstellung der Auswirkung thermischer Veränderungen (aus [16])



In Abb. 6 sind schematisch die Wechselwirkungen zwischen Verfugung und Naturstein bei durch Niederschläge bedingten Feuchtigkeitseinträgen und anschließend beginnender Austrocknung dargestellt. Es ist erkennbar, dass sich nicht unbedingt eine in gleichmäßiger Tiefe verlaufende Feuchtefront im Mauerwerk ausbildet. Stoffliche Unterschiede zwischen den Materialien führen eher zu unregelmäßigen Feuchteverteilungen. Aus diesen ergibt sich bei Austrocknung auch die Situation, dass die Steine und die Mörteloberflächen bereits trocken sein können und die Steinflanken in den Fugen noch stärker durchfeuchtet sind. Bei unzureichender Haftung der Mörtel an den Fugenflanken kann Wasser zudem tiefer in das Mauerwerk eindringen.

Das in Abb. 7 schematisch dargestellte Beispiel zeigt die Trends der thermisch bedingten Veränderungen an den oberflächennahen Zonen der Natursteine.

Nach [16] sind die Vorgänge bei zyklischen Belastungen (trocken / feucht, dehnen / schrumpfen, kristallisieren / auflösen der Salze) über einen längeren Zeitraum nicht reversibel. Bei thermischer Belastung kommt es auf Grund des Temperaturgradienten zu unterschiedlich starken Dehnungen im Material der Gesteinsoberfläche und in dem der tiefer liegenden Bereiche.

In der nachfolgenden Abbildung ist beispielhaft die Veränderung von Temperaturverteilungen in Natursteinmauerwerk aus Reinhardtsdorfer Sandstein dargestellt.

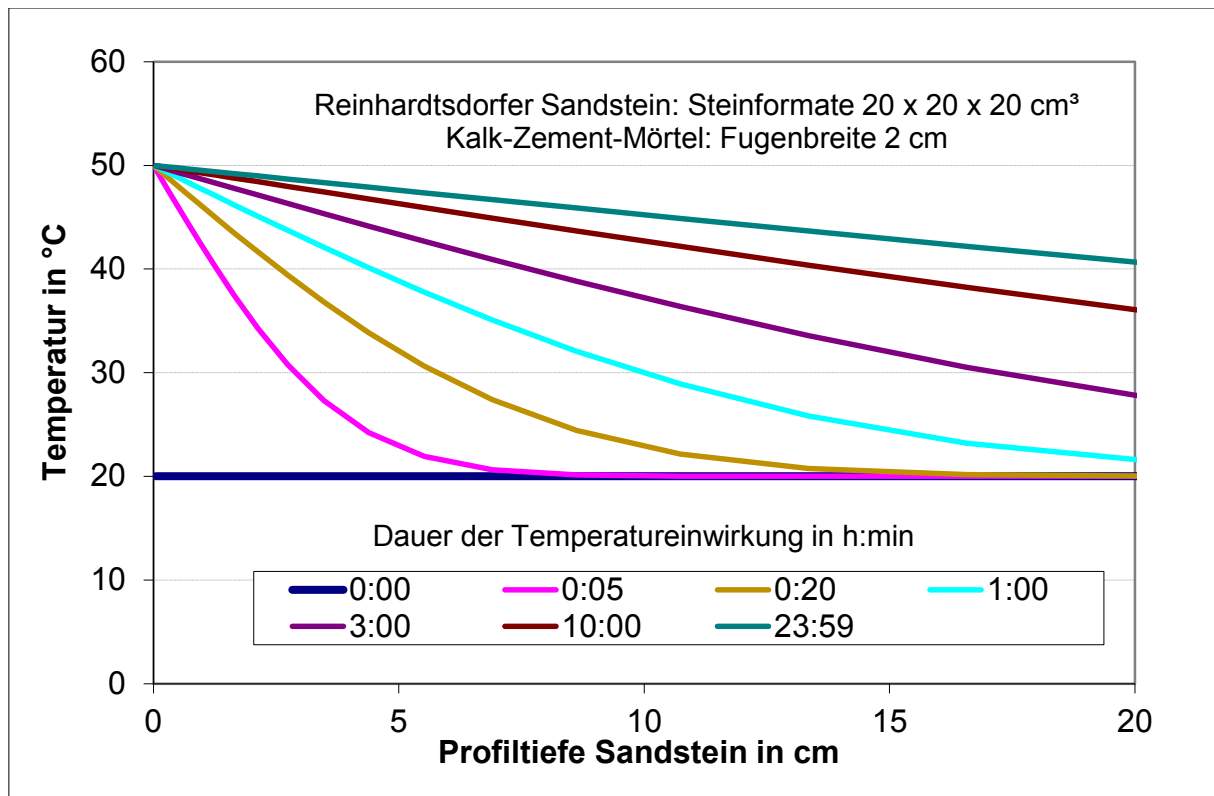


Abb. 8: Temperaturverteilung im Mauerwerk aus Reinhardtsdorfer Sandstein

Tabelle 2: Materialkennwerte aus Datenbank DELPHIN [18]

Materialkennwerte	Kalk-Zement-Mörtel	Sandstein Reinhardtsdorf
Dichte in kg/m ³	1570	1988
Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK	0,7	2,4
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	11	16
Volumetrischer Wassergehalt bei 80% relativer Luftfeuchtigkeit in m ³ /m ³	0,0252	0,00478
Offene Porosität in m ³ /m ³	0,408	0,2404
Kapillare Wasseraufnahme WA in kg/m ² √s	0,176	0,1397

Die Kurvenverläufe in Abbildung 8 (siehe auch Tabelle 2) zeigen, dass bereits nach 5 minütiger Einwirkung von Temperaturerhöhungen (etwa 30 K) starke Temperaturgradienten im Sandstein bis etwa 5 cm Tiefe auftreten. Diese Temperaturgradienten bewirken oberflächennah Spannungen im Gestein. Nach Berechnungen verringern sich diese Spannungen mit der Zeit.

Auch in [19] wird beschrieben, dass Natursteine in ihrem Gefüge durch Verwitterung mechanisch beansprucht werden. Thermische Einflüsse führen zu Dehnungen der einzelnen Mineralkörner. Feuchtigkeit bewirkt, z.B. in tonigen Lagen im Naturstein, Quellprozesse. In der Folge kommt es zu Spannungen im Gestein. Darüber hinaus können Salze im Naturstein Kristallisationsdrücke aufbauen (z.B. übersättigte Natriumchloridlösung bis 200 N/mm²), die wiederum zur mechanischen Gefügezerstörung führen können.

5 Erfassung thermischer und hygriischer Veränderungen

Hygriische und thermische Einwirkungen auf Natursteinmauerwerksoberflächen erzeugen oberflächennah Volumenveränderungen und daraus resultieren Spannungen im Stein- und Mörtelmaterial. Das Ausmaß der zu erwartenden Veränderungen ist von verschiedenen Faktoren abhängig.

Für die Erfassung der Volumenänderungen von Baustoffen kommen üblicherweise Längenänderungsmessungen zum Einsatz. Bei Messungen an Natursteinen müssen natürliche Schichtungen berücksichtigt und angegeben werden. Weiterhin sind Informationen zu den Messbedingungen erforderlich. Bei Literaturangaben sind diese nicht immer beschrieben.

Die Kriterien zur Auswahl einer geeigneten Messmethode sind u. a. die Messgenauigkeit, die Handhabung des Messgerätes, die Anzahl der Messungen, die Durchführung der Messung ohne Beeinflussung der angestrebten Messbedingungen.

Die einfachste Methode der Längenänderungsmessung ist die Verwendung eines Lineals oder wahlweise eines Messschiebers (Messgenauigkeit von 0,1 – 1 mm). Die Messungen erfolgen immer manuell zu den jeweiligen Messterminen in den festgelegten Messzyklen. Für Längenänderungsmessungen an Baustoffproben, die sich im Bereich der üblichen Nutzungsbedingungen (etwa -20 bis +80°C) oder bei Wassersättigung ergeben, sind diese einfachen Methoden ungeeignet.

Messungen an Baustoffproben können auch über aufgeklebte Messmarken an definierte Messstrecken erfolgen. Bei Mörteln können Messzapfen bereits während der Herstellung in die Prismenstirnflächen eingebettet werden.

Weitere Methoden [20] sind das Messen mit einem mechanischem Messgerät (Bild 29) oder mit einer Einspannvorrichtung nach Graf-Kaufmann (Bild 30). Die Messgenauigkeiten können – in Abhängigkeit von der verwendeten Messuhr – bis zu 0,001 mm betragen.

Die beschriebenen Messmethoden erfordern eine Entnahme der Probekörper aus dem Konditionierungsraum (Wasserbad, Klimaschrank) für die eigentliche Messung. Bei empfindlichen Proben kann es dann bereits zu Veränderungen während der Messung kommen. Bei Serienmessungen kann es durch mehrfaches Öffnen des Klimaschranks über einen entsprechenden Messzeitraum im Schrank zu signifikanten Veränderungen der Konditionen kommen. Daraus resultieren dann Fehlmessungen.



Bild 29: Längenänderungsmessung an aufgeklebten Messmarken mit Messstrecke und Messuhr

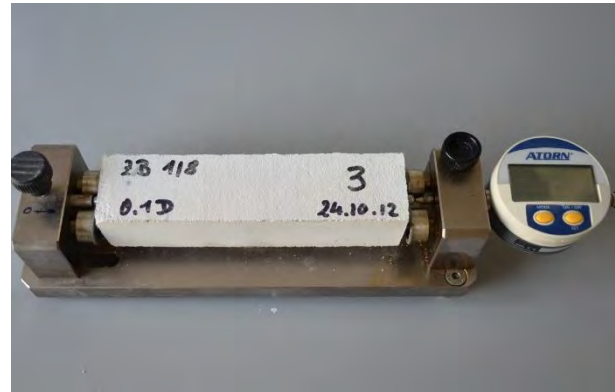


Bild 30: Längenänderungsmessung nach Graf-Kaufmann an Mörtelprismen mit Messzapfen

Für die Bewertung von geometrischen Veränderungen an Baustoffproben, infolge von kurzzeitig auftretenden klimatischen Veränderungen (Temperatur, Feuchte), sind kontinuierlich erfassende Systeme vorteilhaft.

Kontinuierliche Erfassungen von Verformungen an Bauteiloberflächen können z.B. mittels Dehnungsmessstreifen oder induktiven Wegaufnehmern (Bild 31) durchgeführt werden. Die Messgenauigkeiten liegen bei 0,001 mm.



Bild 31: Kontinuierliche Erfassung von Längenänderungen an Mörtelprismen mittels induktiven Wegaufnehmern in einem Klimaschrank

Längenänderungen und Verformungen sind auch berührungslos mit optischen Verfahren messbar. Zum Beispiel können mittels Video-Holografie [21] Mikroverformungen an Bauteiloberflächen kontinuierlich zerstörungsfrei beobachtet und erfasst werden. Verformungen an Oberflächen können in Echtzeit (Größenordnung 1/2000 mm) registriert werden.

Eine weitere berührungslos anwendbare Methode ist das Laserscanning [22].

Neben reinen Kennwerten für die Längenänderungen von Gesteinen und Mörteln sind auch die Bedingungen und deren zeitliche Veränderungen während der Nutzung von Bedeutung.

Messwerte aus Literaturangaben sind oft nach Normen ermittelt oder unter spezifischen Gesichtspunkten. So werden in [23] die hygrischen Längenänderungen nach 98 Tagen Wasserlagerung angegeben. Im oberflächennahen Bereich von Natursteinfassaden sind derartige Zeiträume mit dauerhafter Wasserbeaufschlagung eher nicht zu erwarten. Hier sind es meist nur wenige Minuten (kurze Gewitterschauer) bis mehrere Tage (z.B. Nebel, Landregen) oder bei Stützmauern aus erdberührten Bereichen ein-

dringende Wässer. Diese Bedingungen erfordern, dass mögliche geometrische Veränderungen des oberflächennahen Mauerwerks unter den zu erwartenden Nutzungsbedingungen bewertet werden müssen.

6 Größenordnungen thermischer und hygrischer Einflüsse

Oberflächen dunkler Gesteine, stark verschmutzte Natursteinoberflächen oder dunkel gestrichene Oberflächen erwärmen sich bei direkter Sonneneinstrahlung erheblich stärker als weiße oder sehr helle Oberflächen. Zu berücksichtigen sind diese Einflüsse auch bei konstruktiv bedingter teilweiser Beschattung von Wandflächen. Dort können auf kleinen Flächen große Temperaturunterschiede auftreten.

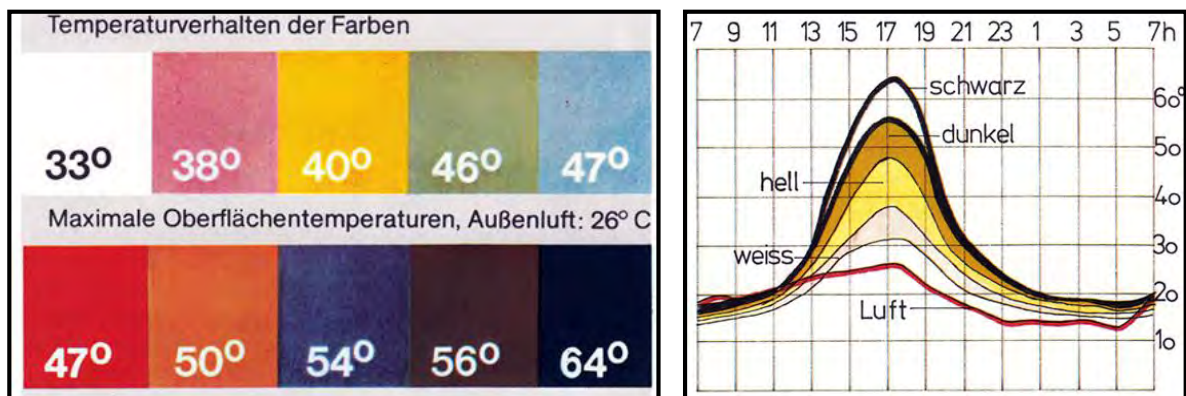


Abb. 9 und 10: Temperaturen auf farbigen Oberflächen im Vergleich zur Temperatur der Außenluft und Tageszyklus des Temperaturverlaufs von Außenputzsystemen in Abhängigkeit von der Farbigkeit der Oberflächen [24]

Die Abb. 8 und 9 zeigen beispielhaft die Temperaturen von Putzoberflächen in Abhängigkeit von der Farbe bzw. über einen fiktiven Tagesverlauf.

Aus dem Beispiel geht hervor, dass bei schwarzen Oberflächen 38 K höhere Temperaturen im Vergleich zur Lufttemperatur erreicht werden. Bei weißen Oberflächen sind es 7 K. Mit vergleichbaren Tendenzen ist auch bei Natursteinoberflächen zu rechnen. An hellen Gesteinen ist somit bei stark verschmutzten Oberflächen – im Vergleich zu sauberen Oberflächen des gleichen Gesteins – mit deutlich stärkeren thermisch bedingten Dehnungen zu rechnen.

In Anlage A sind aus Literaturquellen Kennwerte für die Verformungseigenschaften von Natursteinen und einer Mörtelauswahl zusammengestellt.

Zur modellhaften Erfassung von Eigenschaftsveränderungen im Einbauzustand von ausgewählten Natursteinen und Mörteln sind Versuchswände errichtet und an diesen Messungen durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in Anlage C zusammengestellt. Bei der Auswertung ergab sich, dass eine Zuordnung der zu erwartenden Eigenschaften in Abhängigkeit von geologischen und mineralogischen Aspekten (wie z.B. in [25]) allein nicht möglich war.

Ausgehend von den zur Verfügung stehenden Datensätzen wurden Gruppeneinteilungen (siehe Tabellen 3 bis 5) für relevante Natursteineigenschaften abgeleitet.

Tabelle 3: Wertebereiche für thermische Längenänderungen – in $10^{-6}m/m^*K$

Eigenschaftsklassen für thermische Längenänderungen (ΔT -20/+60°C)		
TL1	TL2	TL3
< 5	5 bis < 10	10 bis \leq 15

Naumburger Schaumkalk und Obernkirchner Sandstein können z.B. in die Gruppe TL2 und die Elbsandsteine überwiegend in die Gruppe TL3 eingeordnet werden.

Tabelle 4: Wertebereiche für hygri sche Längenänderungen – in mm/m

Eigenschaftsklassen für hygri sche Längenänderungen			
HL1	HL2	HL3	HL4
< 0,01	0,01 bis < 0,1	0,1 bis < 0,5	≥ 0,5

Zur Gruppe HL1 gehören z.B. Oberdorlaer Muschelkalk und Langensalzaer Travertin. Cottaer Sandstein und die Thüringer Schilf- und Lettenkohlsandsteine sind z.B. in die Gruppe HL4 einzuordnen.

Da für die Ausbildung von relevanten hygri schen Längenänderungen das Wasseraufnahmevermögen der Natursteine eine Rolle spielt, sind nachfolgend entsprechende Wertebereiche definiert worden.

Tabelle 5: Wertebereiche für Wasseraufnahme bis zur Sättigung – in M.-%

Wasseraufnahme bis zur Sättigung unter Atmosphärendruck			
WS1	WS2	WS3	WS4
< 1 M.-%	1 bis < 5 M.-%	5 bis < 10 M.-%	≥ 10 M.-%

Dichte Gesteine wie Granit und Marmor sind der Gruppe WS1 zuzuordnen, Thüringer Travertine beispielsweise in die Gruppe WS2, die Elbsandsteine in die Gruppe WS 3 und die Thüringer Schilf- und Lettenkohlsandsteine in die Gruppe WS4.

Für die in der Literatur angegebenen thermisch-hygri schen Kennwerte von Natursteinen, Mörteln und anderen Baustoffen (siehe auch Anlage A) fehlen häufig konkrete Angaben zur Untersuchungsmethode, zur Schichtung (senkrecht oder parallel bei Natursteinen) und zu den Randbedingungen der Kennwertbestimmung wie z.B. erfasster Temperaturbereich, chemische Veränderungen während der Messung u.a..

Die Wechselwirkungen zwischen Ver fugung und Steinmaterial im Natursteinmauerwerk unter Einfluss von thermisch-hygri schen Einwirkungen können mit FEM Programmen simuliert werden. Unter bestimmten Annahmen und bekannten Parameter (fast ausschließlich statisch-konstruktiv ausgelegt) werden die Berechnungen durchgeführt.

7 Anpassungsmöglichkeiten von Mörtelsystemen

Neuverfugungen und Fugenausbesserungen an Sichtflächen von Natursteinmauerwerk haben besondere Anforderungen. Die Verfugmörtel müssen an das zu verfu-gende Natursteinsichtmauerwerk angepasst werden. Dies betrifft nicht nur die ästheti-sche Anpassung, sondern auch die Anpassung der physikalischen Eigenschaften (z.B. mechanische, thermisch-hygrische) des Mörtels an die des Natursteins. Weiterhin sind chemische Verträglichkeiten zwischen Bestandsmörteln und neuen Mörteln zu berück-sichtigen. Mit der Vorbereitung der Ausführung von Verfugungen ergeben sich somit auch Fragen zur Zusammensetzung der Mörtel, zur Festigkeiten zur Festigkeitsent-wicklung. Beim Einsatz von Kalk-Zementsystemen können mittels rechnerischer An-sätze Prognosen zur Festigkeitsentwicklung der Mörtel vorgenommen werden.

Ansätze zur „Berechenbarkeit“ von Mörteln sind in [26] enthalten. Ausgegangen wurde von Mörtelgemischen, für die das Bindemittel Zement bei der Erhärtung dominiert, die Gesteinskörnungen quarzitisches und/oder aus Brechsanden bestehen. Weiterhin ist an-genommen worden, dass verarbeitungsverbessernde Additive die Abbinde- und Er-härtungsbedingungen nicht signifikant beeinflussen. Für Mehrstoffsysteme (z.B. Port-landzement-Trass-Kalk-Kombinationen) treffen die in [26] angenommenen Zusam-menhänge nicht zu. Grundsätzlich basiert der Rechenansatz auf den Eingangspara-metern Zementmenge, Zementgüte, Frischbetonrohddichte, Wasser/Feststoff-Wert und ermittelter Druckfestigkeit nach 28 Tagen. Analog zur Herleitung der Druckfestigkeiten können auch Kennwerte wie Biegezugfestigkeit und E-Modul abgeleitet werden. Zu-sammenhänge zwischen den Eigenschaftskenngrößen wie z.B. Zusammenhang Druckfestigkeit / E-Modul werden angegeben. Das Modell stellt eine Orientierungshilfe zur Abschätzung von Mörtelformulierungen da.

Ein Entwurfsverfahren für Mörtelrezepturen wird in [27] vorgestellt. In diesem werden die Zusammenhänge zwischen physikalisch-mechanischen und feuchtetechnischen Eigenschaften verbunden, sowie auf die Eigenschaften von Sandsteinen abgestimmt. Der Komplexität der Steinerfüllungsmörtel (SEM) als Mehrstoffsystem wird durch Be-rücksichtigung von spezifischen Eigenschaften Rechnung getragen. Im Ergebnis der Entwurfsplanung steht eine Mischungszusammensetzung für ein SEM unter Bezug-nahme auf das jeweils zu applizierende Sandsteinmaterial. Die Anwendung des Mo-dells erfordert die Durchführung umfangreicher Laboruntersuchungen.

Nach Angaben in [28] sind Rezepturberechnungen für Kalk-Zement-Mörtelsysteme mit bestimmten Zieldruckfestigkeiten möglich. Grundlage für die beschriebenen Berechnungsansätze bilden verschiedene Annahmen und ein umfangreiches Versuchspro-gramm. Es wurden Beziehungen von Wasser/Zement-Werten und Druckfestigkeiten sowie weitere Einflüsse wie Kalkhydrat/Zement-Wert, Zuschlagstoff/Bindemittel-Wert und eine spezielle Körnungszahl berücksichtigt. Praktische Anwendungen der Re-chenansätze in der MFPA Weimar für Mörteloptimierungen bestätigten die Richtigkeit der getroffenen Annahmen.

Es ist zu beachten, dass bei den genannten Rechenansätzen modifizierende Zusätze zu den Mörteln (z.B. Wasserrückhaltmittel, Verzögerer und Beschleuniger, Dispersi-onen, Luftporenbildner) relevante Einflüsse haben, aber in den genannten Berechnungsansätzen von den Modellen nicht berücksichtigt werden.

In Anlage B sind beispielhaft Ergebnisse von Einflüssen unterschiedlicher Mischungszusammensetzungen, Bindemittelarten und Zusätze auf Mörtel-eigenschaften zusammengestellt.

8 Leitfaden für die Auswahl von Mörteln für Verfugarbeiten

Ausgehend von den vorgestellten Zusammenhängen und Erfahrungen dient der nachfolgende Leitfaden zur Verknüpfung von Informationen aus Bauzustandserfassungen, Materialeigenschaften, nutzungs- sowie expositionsbedingten Einflüssen. Er zeigt die Vorgehensweise bei der Auswahl von Verfugmörteln und soll eine Hilfestellung für die Ableitung von technologischen Anforderungen und die Auswahl von geeigneten Systemen für Neuverfugungen unter den spezifischen Anforderungen von Natursteinmauerwerk sein.

8.1 Übersicht zum Leitplan

Die nachfolgende Abbildung 11 enthält zur Orientierung einen schematisierten Ablauf des Leitplanes. Aufgezeigt werden Einzelschritte und Stellen, an denen Entscheidungen über Wege der weiteren Vorgehensweise zu fällen sind, die zur Findung geeigneter Mörtelsystem erforderlich sein können.

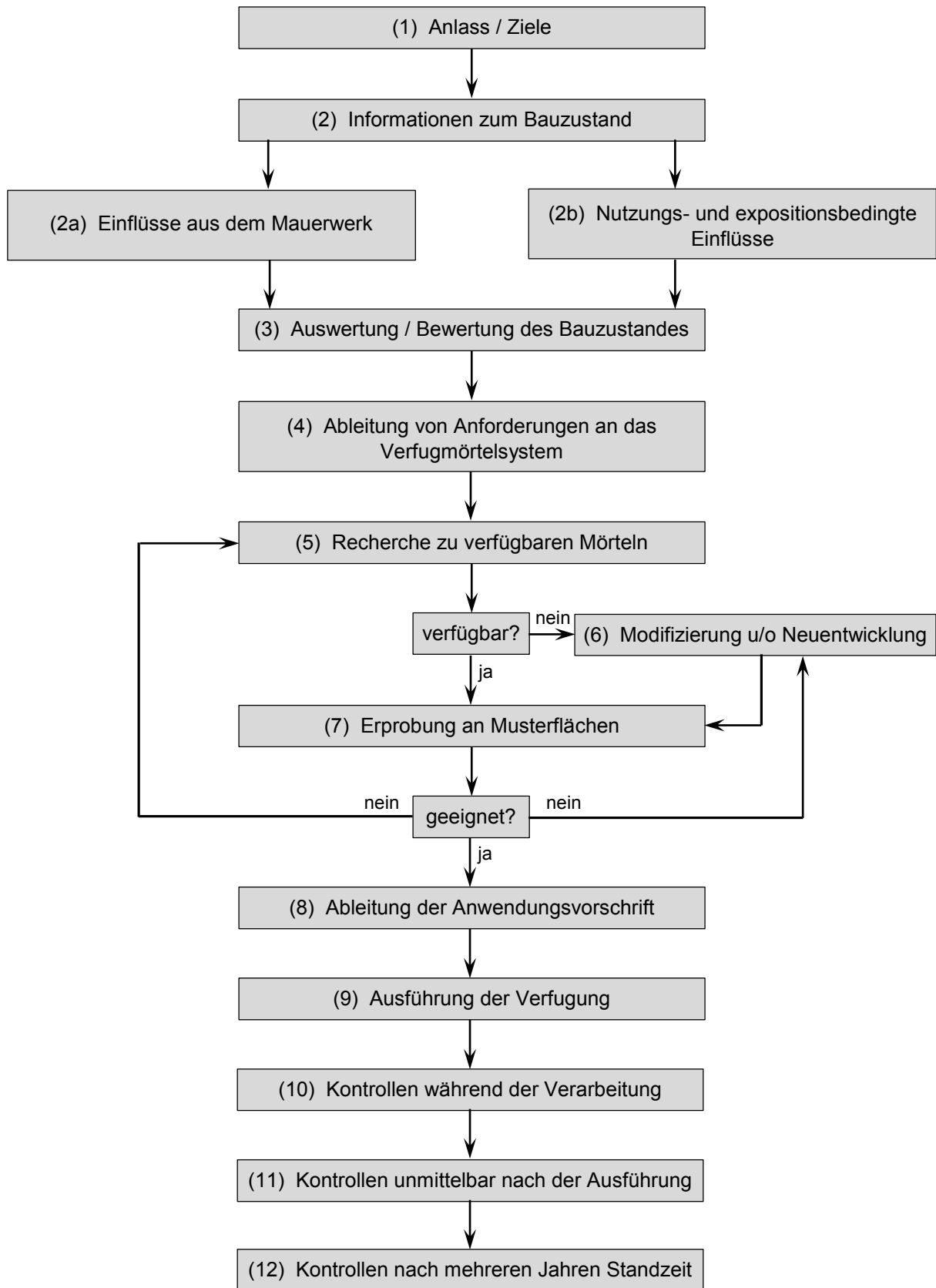


Abb. 11: Schematisierter Ablauf für die Neuverfugung an Natursteinmauerwerks-
oberflächen

8.2 Erläuterungen zu den einzelnen Arbeitsschritten

(Schritt 1) Anlass für neue Verfugungen und Ziele

Anlass für Erneuerungen, Ergänzungen oder Veränderungen an Verfugungen von Natursteinmauerwerk sind in der Regel signifikante Verschleißerscheinungen oder starke Schädigungen an Fugen oder am Mauerwerk. Im Denkmalsbereich kann auch die Wiederherstellung einer historischen Verfugungsvariante und der Ersatz heterogener Reparaturmaßnahmen Grund für eine Erneuerung sein.

Vor Beginn konkreter Planungsmaßnahmen und vor der Auslösung eines Auftrages zur Verfugung müssen die Ziele für die geplante Ausführung beschrieben werden.

Der Bauherr (Privatperson oder Institution) formuliert häufig Sanierungsziele, ohne sich der Komplexität der Einflüsse bewusst zu sein. Diese Sanierungsziele werden oft in folgender Reihenfolge aufgestellt:

- Einstellung einer gewünschten Farbigkeit der Neuverfugung,
- Ausbildung der Struktur und Profilierung der Neuverfugung,
- Anforderungen an die Mörtelmaterialien und / oder
- Nachstellung eines vorhandenen Befundes.

Die genannten Sanierungsziele basieren vor allem auf optischen Erscheinungen und teilweise auch Erfahrungen an anderen Objekten.

Voraussetzungen einer fachgerechten und nachhaltigen Sanierung sind erweiterte Kenntnisse zum Bauzustand und deren Interpretation.

(Schritt 2) Erfassung von Informationen zum Bauzustand

Zunächst sollten visuell einfach erfassbare Informationen aufgenommen werden. Diese müssen Aussagen zur Funktion des Mauerwerks, zum Erhaltungszustand und auch zu Materialien enthalten.

Das Mauerwerk ist nach den folgenden Aspekten einzustufen:

- Das Sichtmauerwerk umschließt Räume eines Gebäudes und ist der freien Bewitterung ausgesetzt. Die umschlossenen Räume können unterschiedlichen Nutzungen (Kalträume, beheizte Räume u.ä.), die Auswirkungen auf das Mauerwerk haben, unterliegen.
- Das Sichtmauerwerk ist eine Stützwand und ist an Felsen angelehnt oder mit Lockermaterial hinterfüllt. Hier ist auch zu berücksichtigen, dass rückseitig Wasser eindringen kann und mit diesem gelöste Salze.
- Es handelt sich um frei stehendes Mauerwerk. Dieses Mauerwerk ist von allen Seiten bewittert. Besonders zu beachten ist hier das Vorhandensein und die Funktion der Mauerkronenabdichtung. Hier kann Wasser direkt eindringen oder bei vorhandener Abdeckung kann es zu stärkeren Spitzwassereinträgen am Mauerfuß kommen.
- Sichtmauerwerk kann auch im Inneren von Mauerwerk eine Rolle spielen. Besonders in Kellerräumen können Feuchte- und Salzbelastungen zu Schäden führen.
- In der Vergangenheit erfolgten Nutzungen und Umnutzungen von Räumen (z.B. Stall, besondere industrielle Nutzung), die an das Mauerwerk angrenzen.

Vor Beginn von Verfugarbeiten müssen Entscheidungen zu grundlegenden vorbereitenden Arbeiten am Mauerwerk getroffen werden. Dazu sind Informationen zu folgenden Fragen zu erfassen:

- Sind Risse und Verformungen, die auf statische Probleme, die aus dem Baugrund oder aus Schäden im Mauerwerk selbst resultieren, vorhanden?
- Gibt es Anzeichen für Schäden, die auf eine unzureichende Witterungsbeständigkeit der Natursteine hinweisen?
- Gibt es Anzeichen für Feuchte- und Salzbelastungen im Mauerwerk? Lassen sich bereits Ursachen dafür erkennen?
- Zeichnen sich Bau- und / oder Reparaturphasen mit unterschiedlichen Arten der Mauerwerksausbildung und / oder unterschiedlichen Schädigungsarten ab?
- Sind Reste von Putzen, die vor einer Steinsichtigkeit bestanden vorhanden, oder deuten die Struktur der Oberflächen und die verbaute Steinart an, dass das Mauerwerk ursprünglich für eine Verputzung vorgesehen war?

Als Voraussetzung für die Auswahl von Mörteln für Neuverfugungen, Fugenausbesserungen und Reparaturen müssen folgende Informationen erfasst werden:

- Abmessungen der Natursteine (dominierende Maße und Extremwerte),
- Fugenbreiten und Fugentiefen (dominierende Maße und Extremwerte),
- Natursteinarten und Erhaltungszustände (Schäden, Erhaltung der Kanten u.ä.),
- Mauermörtel im Bestand unmittelbar unter der geplanten Neuverfugung,
- vorhandene Verfugmörtel ggf. als Basis für Nachstellungen,
- Geometrien (Profile) von im Bestand vorhandenen Verfugungen,
- Feuchteverteilungen im Mauerwerk an repräsentativen Achsen,
- Salzverteilungen im Mauerwerk an repräsentativen Achsen,
- Expositionsrichtungen und Art der Umgebung (dichte Bebauung, Höhenlage, Hanglagen u.ä.) bei Mauerwerk in freier Bewitterung und
- Arten von Verschmutzungen an den Wandoberflächen.

Neben den Erfassungen sind an repräsentativen Proben analytische Untersuchungen zur Charakterisierung der Mörtel, der Natursteine, der Salz- und Feuchtebelastungen durchzuführen.

(Schritt 3) Auswertung der Informationen zum Bauzustand und Bewertung

Unter dem Schritt 2 erfasste Informationen müssen ausgewertet und interpretiert werden. Im Ergebnis müssen zunächst folgende Fragen beantwortet werden:

- Sind statische Sicherungsmaßnahmen vor der Ausführung der Verfugungsarbeiten erforderlich?
- Müssen Maßnahmen zur Reduktion von Feuchtebelastungen durchgeführt werden?
- Sind Maßnahmen zur Salzreduktion erforderlich und müssen Salzbelastungen bei der Auswahl der Mörtelsysteme berücksichtigt werden?
- Erfordern Schäden an den Natursteinen eine steinkonservatorische Behandlung (Steinfestigung, Steinergänzung, Steinaustausch)?
- Lässt die Situation an den Steinoberflächen der Wand bei sehr starken Schäden überhaupt eine Neuverfugung mit vertretbarem Aufwand zu oder muss ein Schutz der Wand mit einem Putz oder einer Verkleidung realisiert werden?
- Müssen bei frei stehenden Mauern nicht vorhandene oder nicht funktionierende Abdichtungen an Mauerkronen ausgeführt bzw. erneuert werden?

Ergeben sich aus den genannten Fragen Erfordernisse für vorbereitende Sanierungsmaßnahmen, sind diese vor der Neuverfugung auszuführen. Es ist zu berücksichtigen,

dass nach diesen Maßnahmen Zeiten für Austrocknung und Stabilisierung der Situation erforderlich sind. Die Zeiträume können mehrere Monate bis mehrere Jahre in Abhängigkeit von der konkreten Situation umfassen.

Sind keine vorbereitenden Maßnahmen erforderlich oder diese sind bereits abgeschlossen, kann mit der Vorbereitung der Verfügun begonnen werden.

Die Anforderungen an Mörtel für Neuverfugungen richten sich dann nach dem Ziel der Anwendung. So kann der Verfugmörtel ausschließlich eine schützende Funktion für das Mauerwerk übernehmen, indem er das Eindringen von Wasser behindert oder verhindert. Darüber hinaus können ästhetische oder denkmalpflegerische Forderungen erforderlich werden. In allen Fällen müssen geeignete Mörtel ausgewählt werden. Für die Vorauswahl von Mörteln für die Verfügun ergibt sich folgende Vorgehensweise:

- Es ist eine Zusammenstellung von Angaben zu Steinformaten und Steinarten sowie eine Ableitung von Häufigkeiten und Verteilungen an den Wandflächen zu erstellen. Einfließen müssen auch Informationen zu Natursteinarten.
- Es ist eine Zusammenstellung von Angaben zu Fugenbreiten und Fugentiefen sowie eine Ableitung von Häufigkeiten und Verteilungen an den Wandflächen zu erstellen.
- Die Bewertung der Feuchtebelastungen im Mauerwerk liefert Hinweise für erforderliche Mörtel Eigenschaften. Sehr hohe Belastungen erfordern besondere Vorarbeiten (siehe oben) und leicht erhöhte Feuchtegehalte können ggf. durch eine gezielte Mörtelauswahl (gute Feuchtetransporteigenschaften) hingenommen werden.
- Aus den Ergebnissen der Untersuchungen zu Salzbelastungen und Verteilungen müssen Anforderungen an die Bindemittel in den Mörteln abgeleitet werden.
- Die Zusammensetzungen der Mauermörtel im Bestand müssen bewertet werden. Hier muss eine chemische Verträglichkeit der Bestandsmörtel mit den Verfugmörteln gegeben sein.
- Es sind relevante Steineigenschaften zu erfassen, und / oder Recherche zu bekannten Daten nach petrografischer Einordnung durchzuführen. Zu berücksichtigen sind folgende Eigenschaften:
 - Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, dynamischer E-Modul
 - hygrische und thermische Ausdehnungskoeffizienten
 - kapillares Wasseraufnahmevermögen
 - Wasserdampfdiffusionswiderstand
 - Farbigkeit, Patinierung, Verschmutzung der Oberflächen
- Ein Vergleich der Ergebnisse mit Situationen an anderen Objekten, die bereits überarbeitet wurden und einige Jahre Standzeit besitzen, kann bereits zu konkreten Lösungsansätzen für die Mörtelauswahl führen und Aufwendungen für Vorarbeiten reduzieren.

(Schritt 4) Ableitung von Anforderungen an das Verfugmörtelsystem

Bereits bei den vorbereitenden Maßnahmen müssen potentielle Materialunverträglichkeiten zwischen Materialien im Bestand und den für die Sanierungsmaßnahmen eingesetzten Materialien berücksichtigt werden.

Die nachfolgenden Unverträglichkeiten sind zu berücksichtigen:

- Gipshaltige Mörtel oder Gipsmörtel als Mauermörtel erfordern besondere Vorgehensweisen. Hier muss mit Schäden gerechnet werden, wenn mineralische Mörtel (siehe auch [14] WTA-Merkblatt Gips) für Verfugungen eingesetzt werden.

- Belastungen mit bauschädlichen Salzen führen zur Einschränkung der Bindemittelwahl. Ausschließlich carbonatisch erhärtenden Bindemittel (Kalke der Qualität CL 90) werden durch Nitrate in ihrer Festigkeitsentwicklung stark gestört. Mit Auswirkungen durch hohe Nitratbelastungen ist auch bei hydraulischen Kalken (z.B. CL 70, CL 80, NHL) zu rechnen.
- Bindemittel, die in der Vergangenheit in Mauer- und Verfügmörteln eingesetzt wurden, können ebenfalls bei nicht Beachtung zu Schäden führen. Beispielsweise zu nennen wären Mörtel mit Sulfathüttenzementen oder Mörtel mit dolomitischen Kalken, die Sulfatbelastungen (z.B. „saurer Regen“) ausgesetzt waren.

Aus dem oberflächennahen Mauerwerksaufbau müssen die folgenden Randbedingungen für die Mörtelwahl bzw. Nachstellung berücksichtigt werden:

- Aus den Fugenbreiten ergeben sich Anforderungen an die Gesteinskörnungen in den Verfügmörteln. Das Größtkorn soll nach Erfahrungen etwa 1/3 der Fugenbreite betragen. Ist der Einsatz gröberer Körnungen geplant, sind umfangreichere Anpassungen und Erprobungen erforderlich.
- Bei sehr breiten Fugen, die mit feinen Mörteln verschlossen werden sollen, sind ab Fugenbreiten > 3 cm geeignete Zwickelmaterialien (Natursteinstücke, abhängig von der Bestandssituation) oder mehrschichtige Ausführungen der Verfügun vorzusehen.
- Es ist zu berücksichtigen, dass Abhängigkeiten zwischen Fugenbreiten, Steinformaten und Steineigenschaften bestehen, die bei thermischen und hygrischen Beanspruchungen zu Veränderungen der Fugengeometrien führen können (siehe Abschnitte 4 und 5). Eine Bewertung dieses Potentials ist vorzunehmen. Mit der Größe der Natursteine bei gleichzeitiger Verringerung der Fugenbreite steigen die Anforderungen an die Mörtelanpassung.
- Für die orientierende Einordnung der mechanischen Eigenschaften der Verfügmörtel können Größenordnungen (siehe Abschnitt 1) auf der Basis der entsprechenden Natursteineigenschaften angenommen werden.
- Das Wasseraufnahmevermögen des Verfügmörtels sollte sich ebenfalls an dem der Natursteine orientieren. Bei Steinen unterschiedlicher Eigenschaften in einer Mauer sind Prioritäten (z.B. Orientierung auf die Hauptsteinart und die Steinart mit dem höchsten Wasseraufnahmevermögen; geringe Schäden sind hinzunehmen) unter Einbeziehung des Bauherrn in Abhängigkeit vom konkreten Bestand festzulegen.

Die Verfügmörtelwahl erfordert folgende Anforderungen für die Eigenschaften und Mörtelzusammensetzung:

- Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, dynamischer E-Modul,
- hygrische und thermische Ausdehnungskoeffizienten,
- kapillares Wasseraufnahmevermögen,
- Wasserdampfdiffusionswiderstand,
- Farbigkeit,
- Art der Gesteinskörnungen, Kornverteilung und Größtkorn,
- Art der Bindemittel bzw. Bindemittelkombinationen,
- Anforderungen an die Feuchtetransportfähigkeit und
- Anforderungen an die Fähigkeit zur Salzeinlagerung

Bei denkmalpflegerischen Forderungen zur möglichst exakten Nachstellung der „Originalmörtel“ ist zu berücksichtigen, dass die Mörtel nach ihrem Einbau unterschiedlichsten Einwirkungen unterlagen und auch Veränderungen am Mauerwerk selbst

stattfinden. Somit sind hier Kompromisslösungen anzustreben und die Grenzen des Möglichen auszuloten.

(Schritt 5) Recherche zu verfügbaren Mörteln

Ausgehend von den unter Schritt 4 festgelegten Anforderungen an den Verfugmörtel sollten vor einer kompletten Mörtelentwicklung Recherchen zu verfügbaren und erprobten Lösungen erfolgen.

Verfügbare Lösungen können sein:

- konfektionierte Trockenmörtel, die den Anforderungen gerecht werden,
- konfektionierte Trockenmörtel, die über geringe Modifizierungen an die Anforderungen angepasst werden können und
- Mörtel nach Sonderrezepturen, deren Entwicklung für andere Objekte erfolgte, die aber die Forderungen erfüllen und als Trockenmörtel verfügbar oder nach Rezeptur unter Baustellenbedingungen herstellbar sind.

Bei der Herstellung von Mörteln unter Baustellenbedingungen ist zu beachten, dass sehr große Anstrengungen zur Rezeptureinhaltung unternommen werden müssen. Diese betreffen Dosiergenauigkeiten, Feuchtegehalte der Gesteinskörnungen und Dosiergenauigkeiten von modifizierenden Zusätzen.

(Schritt 6) Neuentwicklung von Verfugmörteln

Sollten sich nach Schritt 5 keine geeigneten Mörtel ergeben, müssen Sonderrezepturen auf der Basis der Anforderungen in Schritt 4 erarbeitet werden.

Einige Ansätze für die Steuerung von Mörtel Eigenschaften sind im den Abschnitt 7 und der Anlage B1 erläutert worden.

Neuentwicklungen erfordern Erfahrungen und sollten nur von nachweislich geeigneten Personen oder Einrichtungen durchgeführt werden. Zu beachten ist, dass in Abhängigkeit von den Bindemittelsystemen und auch der Beschaffbarkeit spezieller Ausgangsstoffe (z.B. Gesteinskörnungen) Entwicklungszeiten von etwa 6 Monate erforderlich sind. In besonderen Fällen können sich auch längere Zeiten ergeben.

Vorteilhaft ist, wenn vor Beginn der Mörtelentwicklung eine spätere konfektionierte Herstellung avisiert wird. Dazu sind im Vorfeld Informationen von geeigneten Mörtelproduzenten zu verfügbaren Ausgangsstoffen, die relevant sind, einzuholen.

(Schritt 7) Erprobung an Musterflächen

Vor dem großflächigen Einsatz der Verfugmörtel muss eine Erprobung an Muster- bzw. Testflächen erfolgen. Vor der Bewertung des Ergebnisses und dem Abgleich mit dem Sanierungsziel muss eine ausreichende Standzeit (mindestens 4 Wochen) gewährleistet sein.

Bei positivem Ergebnis der Bewertung kann die Anwendung erfolgen. Empfehlenswert ist die Erarbeitung einer Anwendungsvorschrift.

Sollten Korrekturen notwendig werden, müssen eine Neuauswahl, weitere Modifizierung oder Neuentwicklung der Mörtel (Schritte 5 bzw. 6) erfolgen.

(Schritt 8) Ableitung einer Anwendungsvorschrift

In der Anwendungsvorschrift für den Verfugmörtel sollten die folgenden Aspekte berücksichtigt werden:

- Standzeiten nach vorbereitender Maßnahmen zur Mauerwerkssicherung oder nach Abdichtungsarbeiten, die zwingend einzuhalten sind,
- Standzeiten, die sich aus Maßnahmen zur Natursteinrestaurierung ergeben, sind ebenfalls zu berücksichtigen,
- Vorbereitende Maßnahmen für die Neuverfugung müssen das Ausräumen der Fugen auf eine vorgegebene Mindesttiefe (in Abhängigkeit von der Situation mindestens das 2fache der Fugenbreite, besser das 3fache der Fugenbreite) beinhalten,
- unmittelbar vor Beginn der Verfugung sind Maßnahmen zur Vorbereitung der Fugenflanken (Anfeuchten, Vornässen, mit Haftmittlern vorbehandeln o.ä.) festzulegen,
- maximale Zeiträume zwischen der Vorbereitung und dem Beginn der Verfugung sind anzugeben,
- Angaben zur Ausführung des Fugenprofils (siehe auch Abschnitt 2) sind vorzugeben und auf Besonderheiten der Anbindung an die Steinflanken ist hinzuweisen,
- langsam erhärtende Mörtelsysteme (Bindemittel CL 90, CL 80, CL 70, NHL, Trasskalk) erfordern langandauernde Nachbehandlungen, deren Art und Umfang festzulegen ist,
- für langsam erhärtende Mörtelsysteme müssen jahreszeitliche Zeiträume vorgegeben werden, die eine ausreichende Verfestigung unter frostfreien Bedingungen erlauben,
- bei langsam erhärtenden Mörtelsystemen muss das Nacherhärtungspotential berücksichtigt werden. (siehe auch Anlage B2)
- Angaben zur Art der Verarbeitungstechnologie (z.B. Handverfugung, Verfugung im Trockenspritzverfahren) müssen, da die Mörtel Eigenschaften einem starken Einfluss der Technologie unterliegen, vorgegeben werden.

(Schritt 9) Ausführung der Verfugung

Vor Beginn der Ausführung der Verfugung muss eine Überprüfung der Eignung der Verarbeiter erfolgen.

Eine Einweisung in die geplanten Abläufe, Abstimmungen zur handwerklichen Ausführung und das Anlegen von Testflächen verhindern Missverständnisse zwischen Bauherren, Planern und Bauausführenden.

Die Anwendungsvorschrift ist den Bauausführenden zu übergeben und sie muss jederzeit auf der Baustelle für die Verarbeiter zugänglich sein.

Die Führung eines Bautagebuches, in dem die Einhaltung der Vorgaben durch den Verarbeiter dokumentiert wird, ist erforderlich.

(Schritt 10) Kontrollen während der Verarbeitung

Während der Sanierungsarbeiten sollten Kontrollen zur Einhaltung spezifischer Verarbeitungsrichtlinien (z.B. Zeiten der Nachbehandlung) durchgeführt und dokumentiert werden. Veränderungen an der Verfugung während der Applikation sollten ebenfalls aufgenommen und dokumentiert werden, um ggf. noch nicht erfasste Einflussfaktoren zu berücksichtigen.

(Schritt 11) Kontrollen unmittelbar nach der Ausführung

Mit dem Abschluss der Verfugungsarbeiten muss eine Kontrolle der korrekten Ausführung erfolgen. Das Ergebnis ist zu protokollieren.

(Schritt 12) Kontrollen nach mehreren Jahren Standzeit

Nach einem Zeitraum zwischen 2 und 4 Jahren sollten Nachkontrollen durchgeführt werden. Damit können Abschätzungen über die angestrebte Nutzungsdauer und zukünftigen Instandsetzungsintervallen erfolgen.

8.3 Beispiel für die Anwendung der vorgeschlagenen Vorgehensweise

Auf der Wartburg bei Eisenach kamen für die Errichtung der Gebäude und Wehrmauern überwiegend Wartburgkonglomerat aber auch Rätsandstein und Buntsandstein zum Einsatz. Carbonatgesteine spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Bedingt durch die extreme Exposition waren über die Jahrhunderte mehrfach Umbauten, Ausbesserungen und Neubauten erforderlich. Bei Zustandsuntersuchungen wurden alle regional üblichen Mörtelbindemittel (Kalke, Gips) und in Bauphasen ab der Mitte des 19. Jahrhunderts auch Roman- und Portlandzemente nachgewiesen.

Für die Sanierung der Sichtmauerwerke, die überwiegend Wartburgkonglomerat als Naturstein enthielten, wurden ab etwa dem Jahr 2000 Rezepturen entwickelt, erprobt und systematisch weiterentwickelt. Zunächst waren Baustellenmischungen für unterschiedliche Verfugungsarten vorgesehen. Ab 2012 war absehbar, dass die Sanierung der sehr großen Flächen an den Wehrmauern in mehreren Etappen erfolgen mussten, und unterschiedliche Ausführungsfirmen mit der Ausführung beauftragt werden sollten. Deshalb erfolgte eine zielgerichtete Weiterentwicklung zu einem Verfugmörtelsystem für Sichtmauerwerk aus Wartburgkonglomerat.

Als eine Hauptursache für Schäden an den Wehrmauern sind in das Mauerwerk eindringende Sickerwässer und später auch über offene Fugen eindringende Wässer zu nennen. Hierdurch wurden Salze und Gips aus Mauermörteln mobilisiert.



Bild 32: Mauerwerk südliche Wehrmauer der Wartburg vor der Sanierung



Bild 33: Nordseite der Dirnitz auf der Wartburg mit alten Fugenausbesserungen

Vor Beginn der Verfugungsmaßnahmen an den Wehrmauern wurden umfangreiche Maßnahmen zur Reduktion der Wassereinträge durchgeführt. Partiiell mussten Teilbereiche zurückgebaut und neu aufgemauert werden.

Bei der Mörtelentwicklung waren Fugenbreiten zwischen 1 und 6 cm zu berücksichtigen. Im Extremfall waren es auch 15 cm. Die Steinformate variierten zwischen 10 und 80 cm in der Länge und zwischen 5 und 45 cm in der Höhe.

Für Proben aus dem Wartburgkonglomerat wurden Druckfestigkeiten zwischen 104 und 136 N/mm² bestimmt sowie Wasseraufnahmekoeffizienten zwischen 0,36 - 1,24 kg/(m²·√h). Bedingt durch die dunkle Färbung waren in Verbindung mit entsprechender Exposition hohe Oberflächentemperaturen zu erwarten.

Aus der Ist Situation im Bestand wurden Grundanforderungen, Vorgaben für die Bindemittel und Gesteinskörnungen sowie erforderliche Modifizierungen formuliert. Zusätzliche Anforderungen ergaben sich aus spezifischen Salzbelastungen und / oder extremen Expositionen und besondere Anforderungen aus denkmalpflegerischen Forderungen.

Auf der Basis von etwa 12 Jahre alten Musterachsen mit Baustellenmörteln erfolgte eine Recherche zu Möglichkeiten einer konfektionierten Herstellung und der Berücksichtigung von in den Mischwerken der Trockenmörtelindustrie zur Verfügung stehenden Ausgangsstoffe.

Unter Verwendung bekannter Zusammenhänge wurden mehrere Grundrezepturen berechnet, im Labormaßstab erprobt und systematisch durch Modifizierungen weiterentwickelt.

Nach dem Anlegen der Testflächen, das unter denkmalpflegerischer und restauratorischer Begleitung durch einen Fachbetrieb erfolgte, wurden strukturelle und farbliche Anpassungen an den Rezepturen vorgenommen. Gleichzeitig stellte ein Mörtelhersteller Mustermischungen zur Verfügung.



Bild 34: Teil der südlichen Wehrmauer nach der Sanierung



Bild 35: Mauer neben der Dirnitz nach der Sanierung

Im Ergebnis (siehe auch Bilder 34 und 35) entstand ein spezielles Verfugmörtelsystem für Sichtmauerwerk aus Wartburgkonglomerat. Dieses Mörtelsystem besteht aus 3 Sieblinien von farbigen Gesteinskörnungen mit Größtkorn von 2, 4 und 6 mm. Als Bindemittel kommen bis zu zwei Zementarten (mit hohem Sulfatwiderstand und niedrigem wirksamen Alkaligehalt) sowie Kalkhydrat der Qualität CL 90 zum Einsatz. Zur Modifizierung dienen Wasserrückhaltmittel, Zusätze zur Steuerung der Wasseraufnahme und eine Acrylatdispersion zur Erzeugung von Poren und zur Verbesserung der Flankenhaftung.

Seitens der Restauratoren wurde eine Mischbarkeit der erprobten Mörtelvarianten aus dem System untereinander gefordert und diese Forderung durch Feinabstimmung der Rezepturen realisiert.

Mit Pigmentzusätzen (z.B. Eisenoxidpigmente) sind farbliche Anpassungen, die nicht allein über die Variation der zementären Bindemittel möglich sind, realisierbar.

Die Mörtel für die Restaurierungsmaßnahme werden durch einen Trockenmörtelhersteller mit gleichbleibender Qualität hergestellt.

Bei der Sanierung der Wehrmauern und von Gebäuden auf der Wartburg konnte das Mörtelsystem durch verschiedene Verarbeiter in unveränderter Qualität eingesetzt werden. (siehe auch Anlage D5)

Eine Anwendung an Gebäuden mit Sichtmauerwerk in der Region um Eisenach, an denen das gleiche Steinmaterial zum Einsatz kam, ist möglich.

8.4 Hinweise zu besonderen Ausführungen der Verfugung

An historischem Mauerwerk treten ab Mitte des 19. Jahrhunderts oft erhabene Verfugungen auf. Möglich wurden diese mit dem verstärkten Aufkommen hydraulischer Bindemittel. Diese Verfugungen ragen aus der senkrechten Wandfläche heraus und können bei Beschädigungen Wassereinträge in das Mauerwerk begünstigen. Bei Ausbesserungen an diesen Verfugungen oder deren Erneuerung ist neben der Mörtelauswahl eine besondere Sorgfalt bei der handwerklichen Ausführung erforderlich.

Besondere Ansprüche sind auch an Fugen im Bereich von Mauerkronen oder schrägen Mauerwerksflächen (z.B. Pfeiler) zu stellen. Bei Vorhandensein von Natursteinen mit sehr geringer Wasseraufnahme (z.B. dichter Kalkstein, Granit) sind Systeme, die mehrschichtig ausgeführt werden, einsetzbar. Zu diesen Systemen gehören z.B. „Sandwich-Verfugungen“ [29]. Bei diesem System wird nach dem tiefen Ausräumen der Bestandsfugen eine dauerelastische tiefliegende abdichtende Verfugung auf „Acryl-Basis“ ausgeführt. Zum späteren Verbund mit der Sichtverfugung werden Streifen aus Edelstahlgewebe eingelegt.

Möglich ist auch die Ausbildung einer tiefer liegenden Abdichtung in der Fuge auf der Basis dauerelastischer Beschichtungen, die einen festen Verbund zwischen Tiefen- und Deckverfugung erlauben (siehe auch Anlage D5).

In beiden Fällen sind die Mörtel der Sichtverfugung wasserabweisend einzustellen. Bei Mauerkronen muss zusätzlich über Gefälleausbildungen ein schnelles Abfließen von Wasser gewährleistet werden.

Die genannten Abdichtungen sind für saugende Natursteine (z.B. Sandsteine) nicht geeignet. Hier sollten für die zuvor genannten Anwendungen flächige Abdichtungen (z.B. großformatige Platten, Verblechungen, Dachziegeleindeckungen) ausgeführt werden.

Bei Mauerwerk mit Restfeuchtebelastungen, die nach Trockenlegungsmaßnahmen noch vorhanden sind oder bei Feuchtebelastungen im Inneren des Mauerwerks, die toleriert werden müssen, kann über die Verfugmörtelauswahl oder Anpassung ein Feuchtetransport aufrechterhalten werden. Möglich wird das durch Mörtel, die einen guten Kapillartransport von Wasser erlauben oder durch Mörtel mit Drainagefähigkeiten. Letztere können auch bei temporär auftretenden Schichtwässern, die das Mauerwerk durchdringen können, zum schnelleren Abfluss beitragen.

Altes Mauerwerk kann mit Salzen belastet sein. Im Zuge von Trockenlegungsmaßnahmen kann es zu Salzanreicherungen in den oberflächennahen Fugenbereichen kommen. Neue Verfugmörtel können so ausgerüstet werden, dass in deren erhöhten Porenanteil Salze eingelagert werden können. Die Salze dringen so nicht in die Natursteine ein, und auch die Optik der Oberflächen wird weniger beeinträchtigt. Vor dem Einsatz porenhydrophob ausgerüsteter Verfugmörtel muss immer die Eignung für den konkreten Anwendungsfall nachgewiesen werden. Ansonsten besteht die Gefahr starker Natursteinschäden.

Neben der klassischen Handverfugung werden, besonders bei größeren Flächen, maschinelle Verfahren (Nass- und Trockenspritzverfahren) zur Neuverfugung gewünscht. Hier ist zu berücksichtigen, dass bei Verwendung gleicher Mörtel im Vergleich zur Handverfugung erheblich höhere Festigkeiten im eingebauten Mörtel erreicht werden.

Die Mörtel werden mit hohem Druck in die Fugen gespritzt. Daraus resultieren hohe Verdichtungen. Beim Trockenspritzverfahren erhöhen geringere Wasser/Bindemittel-Werte zusätzlich die Festigkeiten. Besonders bei Sandsteinen und Mischmauerwerk muss bei Nichtbeachtung mit schnellen Schadensausbildungen gerechnet werden. (siehe auch Anlage D1) Einsätze bei dichten und hochfesten Gesteinen sind weniger gefährlich. Bei der maschinellen Verfugung ist weiterhin zu beachten, dass Nachreinigungen erforderlich werden. Diese können Veränderungen am ästhetischen Gesamteindruck (z.B. Verlust von Patinierungen, Bindemittelschleierreste, Zerstörung von Bearbeitungsspuren auf Steinoberflächen) verursachen.

Sockelzonen von Natursteinmauerwerk unterliegen häufig Mehrfachbelastungen. Aus erdberührten Teilen des Mauerwerks steigt Wasser im Inneren auf und verdunstet im Bereich der Sockel. Mit diesen Wässern können Salze umgelagert und angereichert werden. Weiterhin unterliegen die Sockelzonen Spritzwasser- und Tausalzeinflüssen. Bei der Auswahl von Mörteln für Verfugungen müssen diese Einflüsse berücksichtigt werden. Es ist von kürzeren Instandsetzungsintervallen auszugehen. Im Falle besonders hoher Beanspruchungen sollten die Verfugungen als temporäre Maßnahmen („Opferfuge“) mit verringerter Nutzungsdauer gesehen werden.

8.5 Hinweise zu bindemittelspezifischen Aspekten

Verfugmörtel müssen in ihren Eigenschaften, unabhängig von einer vorgegebenen Bindemittelart, den geforderten Ansprüchen gerecht werden.

In manchen Fällen (z.B. denkmalpflegerische Anforderungen) werden Bindemittelarten für die Mörtel vorgegeben. Für die einzelnen Bindemittel ergeben sich spezifische Randbedingungen, die vor deren Auswahl berücksichtigt werden müssen.

Kalkhydrat (CL 90) kann als trocken gelöstes Pulver oder als Sumpfkalk zum Einsatz kommen. Zu beachten ist, dass bei einwirkenden Witterungseinflüssen an den Oberflächen stärkere Abwitterungen auftreten. Besonders Nitratbelastungen im Mauerwerk führen zu irreversiblen Erhärtungsstörungen.

Als Bindemittel werden auch so genannte „Muschelkalke“ verwendet. Dabei kann es sich um Zusätze von Muschelschalenbruch zu anderen Kalken handeln oder um aus Muschelschalen gebrannten Kalk. Zusätze von hydraulischen Bestandteilen sind ebenfalls möglich. Es gelten die Einschränkungen wie bei Kalkhydrat oder hydraulischen Kalken.

Natürliche Hydraulische Kalke (NHL) besitzen ein sehr hohes Nacherhärtungspotential. Angestrebte Druckfestigkeiten nach 28 Tagen Verfestigungsdauer von etwa 2 N/mm² können nach etwa 1,5 Jahren und zyklischer Feuchteeinwirkung auf etwa 9 N/mm² steigen [30]. Je nach Mörtelrezeptur und Festigkeitsklasse des Kalkes sind auch noch höhere Festigkeiten möglich (siehe auch Anlage B2). Das Nacherhärtungspotential muss vor allem bei gewünschten Anwendungen an Natursteinen geringerer Festigkeit und mit Vorschädigungen berücksichtigt und bedacht werden.

Bei der Erhärtung von Trasskalken wird Calciumhydroxid aus dem Kalk durch Bestandteile aus dem Trass gebunden. Kommt es zu einer schnellen Austrocknung der Mörtel, wird diese Bindung be- oder verhindert. Die Anwendung von Trasskalken in Verfugmörteln erfordert somit lange Nachbehandlungszeiten zur Ausbildung ausreichender Festigkeitseigenschaften. Es müssen ggf. längere Gerüststandzeiten für die Realisierung dieser Nachbehandlung eingeplant werden.

Alkalien aus Trasskalken können wasserlösliche Alkalicarbonate bilden. Bei Einwirkungen von Wasser werden diese gelöst und umgelagert. In der Folge kann es zu Salzausblühungen auf Fugen- und Steinoberflächen kommen.

Bei der Verwendung von Dolomitkalken als Bindemittel in Verfugmörteln muss vor allem auf Salzbelastungen im Mauerwerksbestand geachtet werden. Während der Nutzung besteht die Gefahr der Bildung von leicht in Wasser löslichen Magnesiumsalzen (siehe auch [31]).

Vor allem im 19. Jahrhundert kamen Romanzemente [32] zum Einsatz. Wegen der Vielzahl der Hersteller und verwendeten Rohstoffe in der Vergangenheit sind die Zusammensetzungen sehr heterogen. Die Verwendung von Romanzement in neuen Verfugmörteln erfordert den Einsatz erprobter Mörtel und Erfahrungen vom Verarbeiter. Es ist zu berücksichtigen, dass sich hohe Mörtelfestigkeiten entwickeln können.

Ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden Portlandzemente in Verfugmörteln eingesetzt. Entstanden sind unterschiedlichste Fugenformen, die ohne hochhydraulische Bindemittel nicht denkbar wären. Eine auf historischen Rezepturen basierende Nachstellung von Zementmörteln zur Verfugung ist kritisch zu sehen. Aufgrund anderer Aufmahltechnologien haben moderne Zemente andere zeitliche Erhärtungsverläufe und Wasseransprüche. In der Folge steigt z.B. die Neigung zu Schwindrissen.

In historischem Mauerwerk können auch gipshaltige Mörtel oder Gipsmörtel als Verfug- und oder Mauermörtel vorkommen. In Abhängigkeit von den Belastungen mit Salzen und / oder Feuchtigkeit bestehen enge Grenzen bei der Auswahl von Bindemitteln für Verfugmörtel. Gips als Bindemittel scheidet bei den genannten Belastungen aus und ist nur bei trockenem Mauerwerk anwendbar. Für hydraulische und latent hydraulische Bindemittel ergeben sich ebenfalls erhebliche Einschränkungen (siehe auch [14]) Lösungsmöglichkeiten bieten hier geeignete Kunststoffdispersionen, -emulsionen oder Reaktionsharze. Die Eignung ist in jedem Fall nachzuweisen.

Eine klassische Art der Verfugung ist die mit Blei. Je nach der Lage der Fugen und den Steinarten können Fugen mit flüssigen Blei vergossen oder mit Bleiwolle verstemmt werden. Die Verarbeitung erfordert ein hohes Maß an handwerklichem Können.

9 Literaturverzeichnis

- 1 DIN 1053-1: 1996-11 Mauerwerk - Teil1: Berechnung und Ausführung
- 2 Peschel, A. Natursteine. - VEB Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1983
- 3 Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hrsg.) Leitfaden nachhaltiges Bauen, Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Liegenschaften, Anlage 6, Januar 2001
- 4 Jäger, W. (Hrsg.) Mauerwerkskalender 2013, Verlag Ernst & Sohn Berlin, 2013
- 5 Jäger, W. (Hrsg.) Mauerwerkskalender 2008, Verlag Ernst & Sohn Berlin, 2008
- 6 WTA-Merkblatt 3-12-99 Natursteinrestaurierung nach WTA IV: Fugen, 2001
- 7 WTA-Merkblatt 4-05-99 Beurteilung von Mauerwerk – Mauerwerksdiagnostik, 1999
- 8 Patitz, G., Grassegger, G., Wölbart, O. Natursteinbauwerke Untersuchen – Bewerten – Instandsetzen, Fraunhofer IRB Verlag, Konrad Theiss Verlag 2015
- 9 Snetlage, R. Leitfaden Steinkonservierung, 3. Auflage, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2008
- 10 Knöfel, D. u. Schubert, P. (Hrsg.) Handbuch – Mörtel und Steinerfüllstoffe in der Denkmalpflege; Verlag Ernst Sohn, 1993
- 11 Egloffstein, P. Ein Schutzschild für die Fassade.- In: B+B, 2013, Heft März, S. 14-17
- 12 Egloffstein, P. Mineralische Mörtel und Putze zur Sanierung historischer Mauerwerksbauten.- In: Mauerwerkskalender 2013, Verlag Ernst & Sohn Berlin, 2013, S.: 107 - 133
- 13 WTA-Merkblatt 2-10-06 Opferputze, 2007
- 14 WTA-Merkblatt 2-11-07 Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Fassaden, 2007
- 15 Zier, H.-W. u. Weise, G. Brandschäden an Natursteinen – Dargestellt am Beispiel des Kirchenbrandes in Riethnordhausen.- In: WTA-Journal, 2005, Heft 1, S. 35 - 63
- 16 Budelmann, H., Weiß, D. u. Rostásy, F. Verbund zwischen Fugenmörtel und Naturstein – Anforderungen und Prüfung; Prüfverfahren .- In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 2, 1993, S. 1080 - 1091
- 17 Siedel, H. Instandsetzung verwitterter Natursteinoberflächen an historischen Bauwerken .- In: Mauerwerkskalender 2013, Verlag Ernst & Sohn Berlin, 2013, S.: 63 - 105
- 18 Wagner, R. Simulation mit Programm DELPHIN, MFPA 2014
- 19 Venzmer u.a. Sanierung feuchter und versalzener Wände; Verlag für das Bauwesen Berlin, 1991, S. 27, Tabelle 1.4
- 20 DIN 52450: 1985-08 Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe – Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern

- 21 Hinsch, K. u. Mein-
Ischmidt, P. Optische Messung der thermischen und hygrischen Dehnung an Steinskulptur Nr.4.- In: Die Steinskulptur am Zentralbau des Jagdschlusses Clemenswerth/Emsland, Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege, 1998
- 22 Zheng, B., Schwieger, V.
u. Grassegger-Schön,
G. Detection of hydrothermal deformations of sandstone using laser scanning. 2nd Joint Symposium on Deformation Monitoring, Nottingham, UK, 09.-10.09.2013
- 23 Hörenbaum, W. Verwitterungsmechanismen und Dauerhaftigkeit von Sandsteinsichtmauerwerk.- TH Karlsruhe, Dissertation, 2005
- 24 anonym Der Modernisierungs-Berater Außenputze.- Informationsreihe des Bundesarbeitskreises Altbauerneuerung e.V., 1996
- 25 Grimm, W.-D. Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland.- Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Arbeitsheft 50, (1990)
- 26 Siech, H.-J., Mörtelkenndaten, Korrelationen, Anwendungen.- In: Mauerwerk, Berlin, 2008, Heft 3, S. 134 - 138
- 27 MIKOS, E. Ein neues Entwurfsverfahren für Steinerergänzungsmörtel (SEM).- In: Steinerergänzung – Mörtel für die Steinrestaurierung, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 1999, S. 30-39
- 28 Weise, G. u. Zier, H.-W. Untersuchungen zur Ermittlung von Zusammenhängen zwischen Mischungsverhältnissen, Zuschlagstoffparametern und Druckfestigkeiten bei Putzmörteln. - In: Betontechnik, 1989, Nr. 1, S. 27 - 30
- 29 Website Fa. Bennert
GmbH <http://www.bennert.de/gegen-das-niederschlagswasser-im-glockenturm>
- 30 Herausgeber Institut für
Steinkonservierung e.V. Neue Erkenntnisse zu den Eigenschaften von NHL - gebundenen Mörteln .- IFS-Bericht Nr. 26-2007
- 31 Herausgeber Institut für
Steinkonservierung e.V. Umweltbedingte Gebäudeschäden an Denkmälern durch die Verwendung von Dolomitmörteln .- IFS-Bericht Nr. 16 - 2003
- 32 Herausgeber Institut für
Steinkonservierung e.V. Hydraulische Bindemittel im 19. Jahrhundert auf dem Gebiet der heutigen Bundesländer Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen .- IFS-Bericht Nr. 43 – 2012

10 Anlagenverzeichnis

Anlage A:	Eigenschaften von Natursteinen und anderen Baustoffen nach Literaturangaben	1
Anlage B:	Untersuchungen an Mörteln	6
Anlage C:	Orientierende Untersuchungen an Modellwänden	3
Anlagen D	Beispiele für Verfugmörtelanwendungen	24
Anlage D1:	Schloss Mansfeld	33
Anlage D2:	Gotha Schloss Friedenstein	37
Anlage D3:	Worms Dom St. Peter	41
Anlage D4:	Kyffhäuser-Denkmal	44
Anlage D5:	Wartburg bei Eisenach	47
Anlage D6:	Verschiedene Objekte	53
Anlage E:	Angaben zu den Verfugmörteln der ausgewählten Objekte	55
Anlage F:	Kurzzusammenfassung der Bachelorarbeit von Alexandra Wohlrab (HFT Stuttgart, 2014)	58

Anlage A: Eigenschaften von Natursteinen und anderen Baustoffen nach Literaturangaben

Tabelle A1: Hygrische und thermische Dehnung ausgewählter Natursteine

	Hygrische Dehnung in mm/m		Thermische Dehnung in $10^{-6}/K^*$	
		⊥		⊥
Kyffhäuser Sandsteine (Oberkarbon) [A2]	0,51	0,9	k.A.	k.A.
Sandsteine Seeberg und Madelungen (Rätsandstein, Oberer Keuper) [A2]	0,04	0,13	k.A.	k.A.
Oberdorlaer Muschelkalk [A2]	-0,01	<0,01	k.A.	k.A.
Kirchheimer Muschelkalk [A7]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Langensalzaer Travertin [A2]	<0,01	<0,01	k.A.	k.A.
Ehringsdorfer Travertin [A2]	0,07	0,03	k.A.	k.A.
Cottaer Sandstein [A3, A5]	0,04-0,5	0,5-1,2	10,93	11,54
Reinhardtsdorfer Sandstein [A3]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Postaer Sandstein [A3]	k.A.	k.A.	10,85	10,12
Schilf- und Lettenkohlsandsteine Thüringen [A1]	0,61	k.A.	k.A.	k.A.
Schilf- und Lettenkohlsandsteine Bayern [A1]	0,72	1,38	k.A.	k.A.
Schilf- und Lettenkohlsandsteine Württemberg [A1]	0,33	0,47	k.A.	k.A.
Heilbronner Schilfsandstein [A6]	1,51**	0,93**	7,39	7,32
Obernkirchner Sandstein [A7]	k.A.	k.A.	13,59	13,34
Sander Schilfsandstein [A7]	k.A.	k.A.	11,16	10,05
Nebraer Sandstein [A7, A8]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Udelfanger Sandstein [A7]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Friedewalder Sandstein [A7]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Rüthener Grünsandstein [A7]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Granite [A7]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Wartburgkonglomerat [A9]	-0,313		12,31	k.A.

* Mittelwerte aus Einzelwerten in Literaturangaben

** hygrischer Dehnkoeffizient in $10^{-5}/\%$ relativer Feuchte

k.A. keine Angaben in der aufgeführten Literatur

|| Parallel zur Lagerfläche

⊥ senkrecht zur Lagerfläche

Tabelle A2: Wasseraufnahme und Sättigungsgrad ausgewählter Natursteine

	Wasseraufnahme (Atmosphärendruck) in M.-%*	Sättigungsgrad*
Kyffhäuser Sandsteine (Oberkarbon) [A2]	3,57	0,98
Sandsteine Seeberg und Made- lungen (Rätsandstein, Oberer Keuper) [A2]	6,08	0,77
Oberdorlaer Muschelkalk [A2]	2,32	0,62
Kirchheimer Muschelkalk [A7]	0,51	0,67
Langensalzaer Travertin [A2]	3,6	0,79
Ehringsdorfer Travertin [A2]	2,43	0,72
Cottaer Sandstein [A3, A5]	k.A.	k.A.
Reinhardtsdorfer Sandstein [A3]	9,5	k.A.
Postaer Sandstein [A3]	8,9	k.A.
Schilf- und Lettenkohlend- steine Thüringen [A1]	7,4	k.A.
Schilf- und Lettenkohlend- steine Bayern [A1]	9,69	0,83
Schilf- und Lettenkohlend- steine Württemberg [A1]	5,77	0,71
Kyffhäuser Sandsteine (Oberkarbon) [A2]	6,88	0,68
Heilbronner Schilfsandstein [A6]	k.A.	k.A.
Obernkirchner Sandstein [A7]	5,12	0,52
Sander Schilfsandstein [A7]	k.A.	k.A.
Nebraer Sandstein [A7, A8]	7,6	0,7
Udelfanger Sandstein [A7]	6,02	0,63
Friedewalder Sandstein [A7]	3,98	0,5
Rüthener Grünsandstein [A7]	7,04	0,61
Granite [A7]	0,31	0,75
Wartburgkonglomerat [A9]	k.A.	k.A.

* Mittelwerte aus Einzelwerten in Literaturangaben
k.A. keine Angaben in der aufgeführten Literatur

Tabelle A3: Mechanische Kennwerte ausgewählter Natursteine

	Dynamischer E-Modul in kN/mm ² *		Biegezugfestigkeit in N/mm ² *		Druckfestigkeit in N/mm ² *	
		⊥	=	⊥		⊥
Kyffhäuser Sandsteine (Oberkarbon) [A2]	22,13	14,9	11,97	11,68	74	78
Sandsteine Seeberg und Madelungen (Rätsandstein, Oberer Keuper) [A2]	27,49	21,05	11,05	9,6	74,5	79
Oberdorlaer Muschelkalk [A2]	32,64	30,2	6,7	6,2	57	38
Kirchheimer Muschelkalk [A7]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	74	35
Langensalzaer Travertin [A2]	49,1	47,26	7,6	8,3	k.A.	k.A.
Ehringsdorfer Travertin [A2]	53,53	55,16	9,8	9,5	48	22
Cottaer Sandstein [A3, A5]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Reinhardtsdorfer Sandstein [A3]	k.A.	k.A.	k.A.	4,3	k.A.	45
Postaer Sandstein [A3]	k.A.	k.A.	k.A.	4,2	k.A.	44,7
Schilf- und Lettenkohlsandsteine Thüringen [A1]	k.A.	k.A.	k.A.	4,3	k.A.	55
Schilf- und Lettenkohlsandsteine Bayern [A1]	6,8	7,85	3,1	3,2	30,97	35,42
Schilf- und Lettenkohlsandsteine Württemberg [A1]	5,4	4,3	3,05	2,35	43,5	52,75
Kyffhäuser Sandsteine (Oberkarbon) [A2]	8,6	8,3	4,1	5,76	42,44	50,86
Heilbronner Schilfsandstein [A6]	11,16	13,67	k.A.	3,46	75,51	68,49
Obernkirchner Sandstein [A7]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Sander Schilfsandstein [A7]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Nebraer Sandstein [A7, A8, A9]	11,87		3,2 / 2,2		45 / 34,9	
Udelfanger Sandstein [A7]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Friedewalder Sandstein [A7]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Rüthener Grünsandstein [A7]	k.A.	k.A.	8		k.A.	k.A.
Granite [A7]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Wartburgkonglomerat [A4]	51,2		k.A.	k.A.	119,8	

* Mittelwerte aus Einzelwerten in Literaturangaben

k.A. keine Angaben in der aufgeführten Literatur

|| Parallel zur Lagerfläche

⊥ senkrecht zur Lagerfläche

= vertikal zur Lagerfläche (Sonderfall)

Tabelle A4: Dichte und Porosität ausgewählter Natursteine

	Rohdichte in g/cm ³ *	Reindichte in g/cm ^{3*}	Gesamtporosität in Vol.-%*
Kyffhäuser Sandsteine (Oberkarbon) [A2]	2,34	2,77	14,11
Sandsteine Seeberg und Madelungen (Rätsandstein, Oberer Keuper) [A2]	2,12	2,49	13,66
Oberdorlaer Muschelkalk [A2]	2,25	2,80	19,64
Kirchheimer Muschelkalk [A7]	2,64	2,72	1,9
Langensalzaer Travertin [A2]	2,25	2,73	17,58
Ehringsdorfer Travertin [A2]	2,34	2,75	14,91
Cottaer Sandstein [A3, A5]	1,82	2,73	33,4
Reinhardtsdorfer Sandstein [A3]	2,66	2,05	22,7
Postaer Sandstein [A3]	2,65	2,02	23,9
Schilf- und Lettenkohlsandsteine Thüringen [A1]	2,66	2,09	21,5
Schilf- und Lettenkohlsandsteine Bayern [A1]	1,97	2,68	26,32
Schilf- und Lettenkohlsandsteine Württemberg [A1]	2,21	2,69	35,69
Kyffhäuser Sandsteine (Oberkarbon) [A2]	2,11	2,68	20,55
Heilbronner Schilfsandstein [A6]			
Obernkirchner Sandstein [A7]	2,15	2,67	19,4
Sander Schilfsandstein [A7]	2,2	2,66	17,2
Nebraer Sandstein [A7, A8]	1,97		
Udelfanger Sandstein [A7]	2,31	2,67	20,3
Friedewalder Sandstein [A7]	2,22	2,65	16,05
Rüthener Grünsandstein [A7]	2,08	2,73	23,97
Granite [A7]	2,65	2,60	0,9
Wartburgkonglomerat [A4]	2,6	k.A.	k.A.

* Mittelwerte aus Einzelwerten in Literaturangaben

k.A. keine Angaben

Tabelle A5: Werte für thermische und hygri sche Längenänderungen (ohne Angaben von Temperaturbereichen) verschiedener Baustoffe nach [A10]

	$\alpha \cdot 10^{-6}$ in m/m*K	Quellen/Schwinden in mm/m
Beton allgemein	10	0,12-0,16
Betonwerkstein	11-18	0,2
Zementmörtel	10-11	0,2
Kalkzementmörtel	9-10	0,22
Kalkmörtel	8-9	0,70
Kalksandstein	6-8	0,10
Kalksteine (Dolomit)	7	0,09-0,16
Travertin	6	0,10-0,12
Ziegelsteine	4-6	0,06-0,08
Sandsteine	12	0,3-0,6
Quarzit	13	k.A.
Granit	8	0,06-0,18
Basalt	9	0,35

Literaturverzeichnis zu den Tabellen A1 bis A5

- A1 Kirsten, H. Herkunft, Eigenschaften und Konservierungsmöglichkeiten von Lettenkeuper- und Schilfsandsteinen an Baudenkmalen in Thüringen; Weimar, Bauhaus-Universität, Dissertation 2009
- A2 Katzschmann L., Aselmeyer G., Auras M. Natursteinkataster Thüringen, IFS Bericht Nr. 23, 2006
- A3 Ehling A., Siedel H. Bausandsteine in Deutschland, Band 2, S. 234-238 (Tabelle Werte von Grunert 1982)
- A4 Zier, H.-W. Untersuchungsbericht B16.11.079.01, Untersuchungen zur Anpassung von Verfugmörteln an den Bestand der Wehrmauern der Wartburg, MFPA
- A5 Ibach W., Sobott R. In: Vollkonservierung von Cottaer Sandstein, Tagung: Elbsandstein, ARKUS-Tagung Dresden 2007, S. 113-120
- A6 Grassegger et al. Wie belastbar und heterogen ist Sandstein? Ergebnisse von experimentellen Daten und FE-Simulationen an Baden-Württembergischen Schilfsandsteinen
- A7 Grimm, W.-D. Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland, München 1990
- A8 Szilagyi J. Leitgesteine für die Denkmalpflege: Untersuchungen petrografischer Eigenschaften an Leitgesteinen der Denkmalpflege, Forschungsbericht, TU Dresden, August 1995
- A9 Dreuse, H., Zier, H.-W. aus eigenen Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes
- A10 Weber, H. Fassadenschutz und Bausanierung – Leitfaden für die Konservierung und Restaurierung von Gebäuden, expert Verlag, 1988, S. 44

Anlage B: Untersuchungen an Mörteln

B1 Variation der Eigenschaften von Kalk-Zement-Mörteln

Für die Charakterisierung der Zusammenhänge zwischen Rezepturparametern und Mörtelkennwerten wurden Modellmörtel mit unterschiedlicher Zusammensetzung entwickelt. Grundlagen für diese Mörtel bildeten Modellansätze für Putzmörtel nach [B1]. Es wurden die dort genannten Zusammenhänge zwischen Wasser/Zement-Wert und Druckfestigkeit auf Verfugmörtelsysteme übertragen. Dabei wird davon ausgegangen, dass große Gemeinsamkeiten zwischen den Verarbeitungseigenschaften von Putz- und Verfugmörteln bestehen.

Bindemittelsysteme auf der Basis von Kalkhydrat und Zement bieten große Vorteile für die gezielte Einstellung von mechanischen Mörtelkennwerten. Wird davon ausgegangen, dass die Kalkkomponente (Kalkhydratqualität CL 90) keine hydraulischen Eigenschaften besitzt, kann die Mörtelfestigkeit über die Zementkomponente (Zementart und Zementgehalt) gesteuert werden. Die Größenordnung der zu erwartenden mechanischen Festigkeiten ergibt sich aus dem Verhältnis von Zementanteil im Mörtel und der Wassermenge, die zur Erreichung einer verarbeitungsgerechten Konsistenz zugegeben werden muss. Die genannten Zusammenhänge sind beispielsweise in [B1] als $\text{Druckfestigkeit} = 17,1 \cdot (\text{Wasser/Zement-Wert})^{-1,69}$ für eine Zementart beschrieben worden.

Für Modellmörtel wurden unter Verwendung des genannten Zusammenhangs Mörtelrezepturen mit Zieldruckfestigkeiten von 3, 5 und 8 N/mm² berechnet. Weiterhin erfolgte eine Variation bei der Zusammensetzung der Gesteinskörnung. Es ist von stetigen Sieblinien ausgegangen worden, und das Größtkorn wurde mit 0,5, 1 und 2 mm variiert. Es kam ausschließlich Quarzkörnung zur Anwendung.

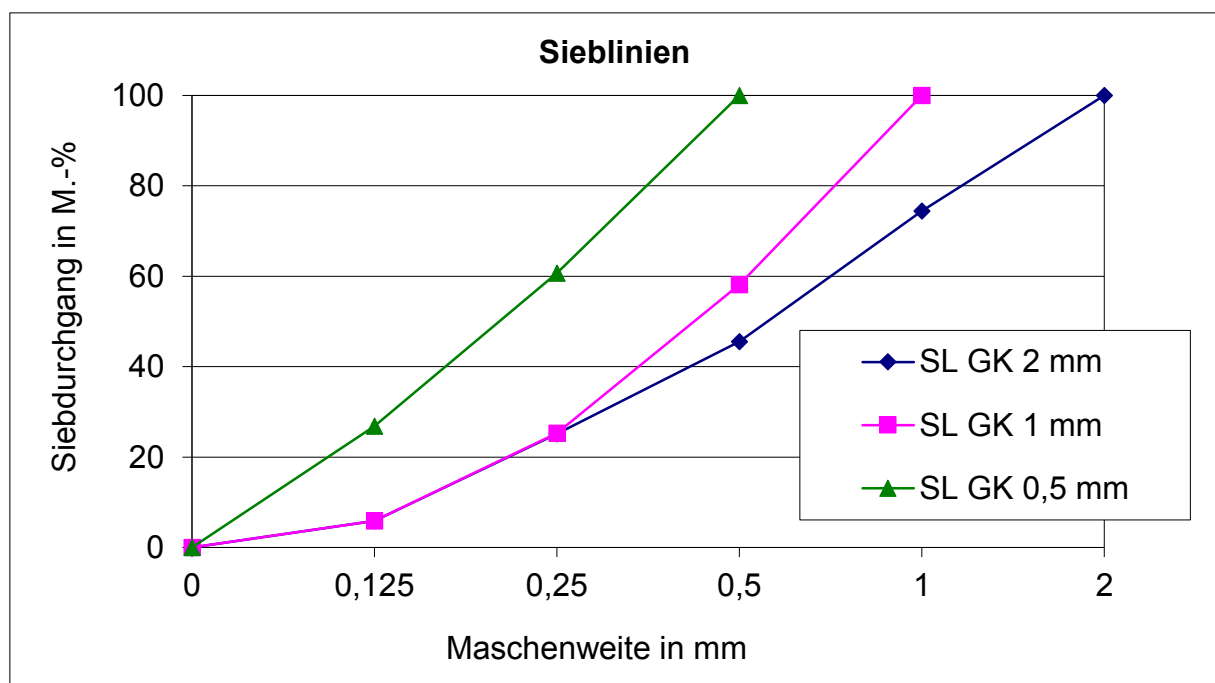


Abb. B1: Sieblinien der Quarzkörnung mit Größtkörnungen 0,5, 1 und 2 mm

Zur Erweiterung des Kenntnisstandes wurden für die Versuche neben der Zementart (vergleichbar mit CEM I 32,5), die in der Literaturquelle [B1] angegeben wurde, Zemente höherer Festigkeitsklassen (42,5 und 52,5) mit berücksichtigt. In den Berechnungsansätzen wurden 3 Mischungsverhältnisse von Kalkhydrat (CL 90) zu Zement auf Basis von langjährigen Erfahrungen gewählt. An einer Rezepturauswahl sind zusätzlich Auswirkungen verschiedener Zusätze (Acrylatdispersion, Methylcellulose, Stearat) auf die Mörtel Eigenschaften untersucht worden.

Tabelle B1: Kennzeichnung der Modellmörtelsysteme

Kennzeichnung der Proben: „ZB“- Projektkürzel, 1. Zahl - Größtkorn der Gesteinskörnung, 2. Zahl - rechnerisch ermittelte Druckfestigkeit (RF) – „0“ – nicht modifizierte Rezeptur, letzte Zahl - Festigkeitsklasse des verwendeten Zementes („MT“ – Masseteile, „TM“ – Trockenmörtel)

Kennzeichnung	RF in N/mm ²	Verhältnis Kalkhydrat zu Zement in MT	Verhältnis Ge- steinskörnung zu Bindemittel in MT	w/z-Wert	Größt- korn in mm
Größtkorn 0,5/1/2 mm - rechnerische Druckfestigkeit 3/5/8 N/mm ² - Zementfestigkeitsklasse 32,5					
ZB 0,5/3-0-32,5	3	2,59	2,46	2,80	0,5
ZB 0,5/5-0-32,5	5	1,79	2,34	2,09	0,5
ZB 0,5/8-0-32,5	8	1,24	2,22	1,61	0,5
ZB 1/3-0-32,5	3	2,59	2,46	2,80	1
ZB 1/5-0-32,5	5	1,79	2,34	2,09	1
ZB 1/8-0-32,5	8	1,24	2,22	1,61	1
ZB 2/3-0-32,5	3	2,59	2,46	2,80	2
ZB 2/5-0-32,5	5	1,79	2,34	2,09	2
ZB 2/8-0-32,5	8	1,24	2,22	1,61	2
Größtkorn 0,5/1/2 mm - rechnerische Druckfestigkeit 3/5/8 N/mm ² - Zementfestigkeitsklasse 42,5					
ZB 0,5/3-0-42,5	3	2,59	2,46	2,80	0,5
ZB 0,5/5-0-42,5	5	1,79	2,34	2,09	0,5
ZB 0,5/8-0-42,5	8	1,24	2,22	1,61	0,5
ZB 1/3-0-42,5	3	2,59	2,46	2,80	1
ZB 1/5-0-42,5	5	1,79	2,34	2,09	1
ZB 1/8-0-42,5	8	1,24	2,22	1,61	1
ZB 2/3-0-42,5	3	2,59	2,46	2,80	2
ZB 2/5-0-42,5	5	1,79	2,34	2,09	2
ZB 2/8-0-42,5	8	1,24	2,22	1,61	2
Größtkorn 0,5/1/2 mm - rechnerische Druckfestigkeit 3/5/8 N/mm ² - Zementfestigkeitsklasse 52,5					
ZB 0,5/3-0-52,5	3	2,59	2,46	2,80	0,5
ZB 0,5/5-0-52,5	5	1,79	2,34	2,09	0,5
ZB 0,5/8-0-52,5	8	1,24	2,22	1,61	0,5
ZB 1/3-0-52,5	3	2,59	2,46	2,80	1
ZB 1/5-0-52,5	5	1,79	2,34	2,09	1
ZB 1/8-0-52,5	8	1,24	2,22	1,61	1
ZB 2/3-0-52,5	3	2,59	2,46	2,80	2
ZB 2/5-0-52,5	5	1,79	2,34	2,09	2
ZB 2/8-0-52,5	8	1,24	2,22	1,61	2

Tabelle B2: Kennzeichnung der Modellmörtelsysteme

Kennzeichnung der Proben: „ZB“- Projektkürzel, 1. Zahl - Größtkorn der Gesteinskörnung, 2. Zahl - rechnerisch ermittelte Druckfestigkeit (RF) – „D“, „MC“, „ST“ – modifizierende Zusätze, letzte Zahl - Festigkeitsklasse des verwendeten Zementes („MT“ – Masseteile, „TM“ – Trockenmörtel, * - im Wasser/Zement-Wert wurde der Wasseranteil aus der Dispersion mit berücksichtigt)

Kennzeichnung	RF in N/mm ²	Verhältnis Kalkhydrat zu Zement in MT	Verhältnis Gesteinskörnung zu Bindemittel in MT	w/z-Wert	Größtkorn in mm	Zusätze in M.-% bez. auf TM
Größtkorn 1 mm - rechnerische Druckfestigkeit 3/5/8 N/mm ² - Zementfestigkeitsklasse 42,5 - Modifizierung mit Dispersion						
ZB 1/3-0,1D-42,5	3	2,59	2,46	2,79*	1	0,1
ZB 1/3-0,15D-42,5	3	2,59	2,46	2,79*	1	0,15
ZB 1/3-0,2D-42,5	3	2,59	2,46	2,79*	1	0,2
ZB 1/5-0,1D-42,5	5	1,79	2,34	2,08*	1	0,1
ZB 1/5-0,15D-42,5	5	1,79	2,34	2,08*	1	0,15
ZB 1/5-0,2D-42,5	5	1,79	2,34	2,08*	1	0,2
ZB 1/8-0,1D-42,5	8	1,24	2,22	1,60*	1	0,1
ZB 1/8-0,15D-42,5	8	1,24	2,22	1,60*	1	0,15
ZB 1/8-0,2D-42,5	8	1,24	2,22	1,60*	1	0,2
Größtkorn 1 mm - rechnerische Druckfestigkeit 3/5/8 N/mm ² - Zementfestigkeitsklasse 42,5 - Modifizierung mit Methylcellulose						
ZB 1/3-0,1MC-42,5	3	2,59	2,46	2,80	1	0,1
ZB 1/3-0,2MC-42,5	3	2,59	2,46	2,80	1	0,2
ZB 1/5-0,1MC-42,5	5	1,79	2,34	2,09	1	0,1
ZB 1/5-0,2MC-42,5	5	1,79	2,34	2,09	1	0,2
ZB 1/8-0,1MC-42,5	8	1,24	2,22	1,61	1	0,1
ZB 1/8-0,2MC-42,5	8	1,24	2,22	1,61	1	0,2
Größtkorn 1 mm - rechnerische Druckfestigkeit 3/5/8 N/mm ² - Zementfestigkeitsklasse 42,5 - Modifizierung mit Stearat						
ZB 1/3-0,1ST-42,5	3	2,59	2,46	2,80	1	0,1
ZB 1/3-0,2ST-42,5	3	2,59	2,46	2,80	1	0,2
ZB 1/5-0,1ST-42,5	5	1,79	2,34	2,09	1	0,1
ZB 1/5-0,2ST-42,5	5	1,79	2,34	2,09	1	0,2
ZB 1/8-0,1ST-42,5	8	1,24	2,22	1,61	1	0,1
ZB 1/8-0,2ST-42,5	8	1,24	2,22	1,61	1	0,2

Die Modellmörtel wurden in Anlehnung an DIN 18555-3 [B2] hergestellt und gelagert. An Modellmörteln der zuvor angegebenen Rezepturen wurden die mechanischen Kennwerte Druck- und Biegezugfestigkeiten, Rohdichten sowie der dynamische E-Modul nach 28 Tagen Verfestigungsdauer ermittelt.

Die Untersuchungen erfolgte an Probekörpern der Abmessungen 4 x 4 x 16 cm³ in Anlehnung an DIN EN 196-1 [B3]. Die Untersuchungen zum dynamischen E-Modul wurden in Anlehnung an DIN EN 12504-4 [B4] durchgeführt.

Die ermittelten Kennwerte sowie Angabe zu den Normdruckfestigkeiten der verwendeten Zemente sind in Tabelle B3 enthalten.

Tabelle B3: Normdruckfestigkeiten der verwendeten Zemente sowie Druck-, Biegezugfestigkeiten und E-Module der nicht modifizierten Modellmörtel nach 28 Tagen Verfestigungsdauer

Bezeichnung	Zement-normdruckfestigkeit in N/mm ²	Mörteldruckfestigkeit in N/mm ²	Mörtelbiegezugfestigkeit in N/mm ²	dynamischer E.-Modul der Mörtel in kN/mm ²
Zementart CEMI 32,5				
ZB 0,5/3-0-32,5	40,4	3,8	1,1	5,75
ZB 0,5/5-0-32,5		5,8	1,5	8,45
ZB 0,5/8-0-32,5		9,1	2,2	11,22
ZB 1/3-0-32,5		2,5	0,8	4,42
ZB 1/5-0-32,5		4,6	1,2	6,20
ZB 1/8-0-32,5		7,3	1,9	8,42
ZB 2/3-0-32,5		2,7	1,3	4,70
ZB 2/5-0-32,5		4,5	2	6,31
ZB 2/8-0-32,5		6,6	3	8,27
Zementart CEMI 42,5				
ZB 0,5/3-0-42,5	55,1	5,5	1,3	6,35
ZB 0,5/5-0-42,5		9,3	2,3	9,40
ZB 0,5/8-0-42,5		13,9	3,3	11,86
ZB 1/3-0-42,5		5,2	1,3	6,76
ZB 1/5-0-42,5		8,4	2,1	9,56
ZB 1/8-0-42,5		12,2	3,0	11,82
ZB 2/3-0-42,5		4,8	1,3	6,68
ZB 2/5-0-42,5		8,1	2,0	9,44
ZB 2/8-0-42,5		12,4	3,0	12,14
Zementart CEMI 52,5				
ZB 0,5/3-0-52,5	56,2	5,7	1,4	6,85
ZB 0,5/5-0-52,5		10,1	2,5	9,73
ZB 0,5/8-0-52,5		14,8	3,4	12,12
ZB 1/3-0-52,5		4,8	1,3	6,48
ZB 1/5-0-52,5		8,2	2	9,18
ZB 1/8-0-52,5		12,5	3	11,84
ZB 2/3-0-52,5		4,9	1,3	6,74
ZB 2/5-0-52,5		8,1	2	9,29
ZB 2/8-0-52,5		12,5	3	12,28

Tabelle B4 enthält die ermittelten Kennwerte modifizierter Modellmörtel.

Tabelle B4: Normdruckfestigkeiten der verwendeten Zemente sowie Druck-, Biegezugfestigkeiten und E-Module der modifizierten Modellmörtel nach 28 Tagen Verfestigungsdauer

Bezeichnung	Zement-normdruckfestigkeit in N/mm ²	Mörteldruckfestigkeit in N/mm ²	Mörtelbiegezugfestigkeit in N/mm ²	dynamischer E.-Modul der Mörtel in kN/mm ²
Zementart CEM I 42,5				
ZB-1-3-0,10D	55,1	4,4	1,2	5,942
ZB-1-3-0,15D		4,1	1,2	5,614
ZB-1-3-0,20D		4,2	1,2	5,494
ZB-1-5-0,10D		7,2	1,9	8,481
ZB-1-5-0,15D		6,8	1,9	8,345
ZB-1-5-0,20D		6,7	1,7	7,794
ZB-1-8-0,10D		10,7	2,8	10,984
ZB-1-8-0,15D		10,9	2,8	10,752
ZB-1-8-0,20D		10,2	2,8	10,43
Zementart CEM I 42,5				
ZB-1-3-0,1MC	55,1	4,5	1,4	5,476
ZB-1-3-0,2MC		4,3	1,3	5,429
ZB-1-5-0,1MC		7,8	2,1	8,238
ZB-1-5-0,2MC		5,9	1,8	6,857
ZB-1-8-0,1MC		11,1	2,8	10,628
ZB-1-8-0,2MC		8,6	2,2	8,36
Zementart CEM I 42,5				
ZB-1-3-0,1ST	55,1	4,3	1,2	5,93
ZB-1-3-0,2ST		4,4	1,2	6,006
ZB-1-5-0,1ST		7,3	1,8	8,564
ZB-1-5-0,2ST		7,6	1,8	8,81
ZB-1-8-0,1ST		11,7	2,8	11,706
ZB-1-8-0,2ST		11,2	2,7	11,16

Ein Vergleich der berechneten Druckfestigkeiten aus dem Modellansatz nach [B1] mit den experimentell ermittelten Werten ergab erwartungsgemäß große Unterschiede zu den Mörteln mit Zementen der Festigkeitsklassen 42,5 und 52,5 N/mm². Diese Unterschiede stehen in direktem Zusammenhang mit den Normdruckfestigkeiten der eingesetzten Zemente (siehe Abbildung B2). Die Größenordnungen der Festigkeiten unter Verwendung einer Zementart beruhen auf den unterschiedlichen Zementgehalten in den Mörteln.

In Abbildung B2 sind die experimentell ermittelten Normdruckfestigkeiten der Zemente zusammengestellt.

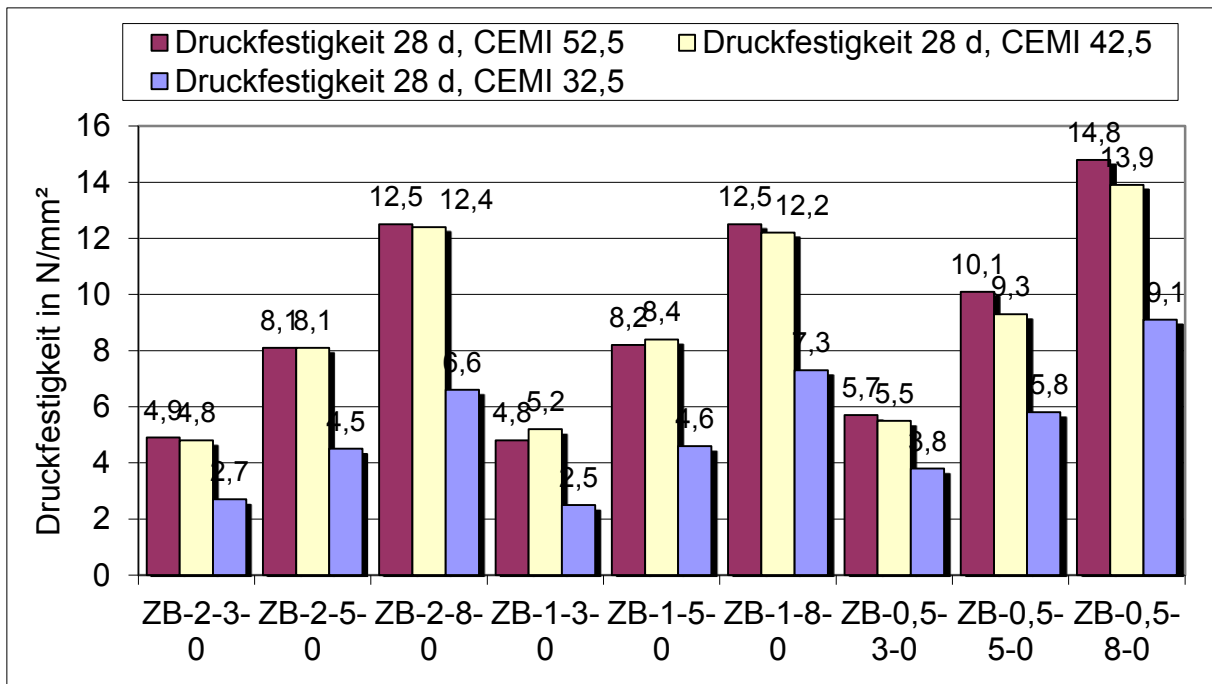


Abb. B2: Druckfestigkeiten von Modellmörteln mit unterschiedlichen Größtkörnungen, unterschiedlichen Zementen und Zementgehalten

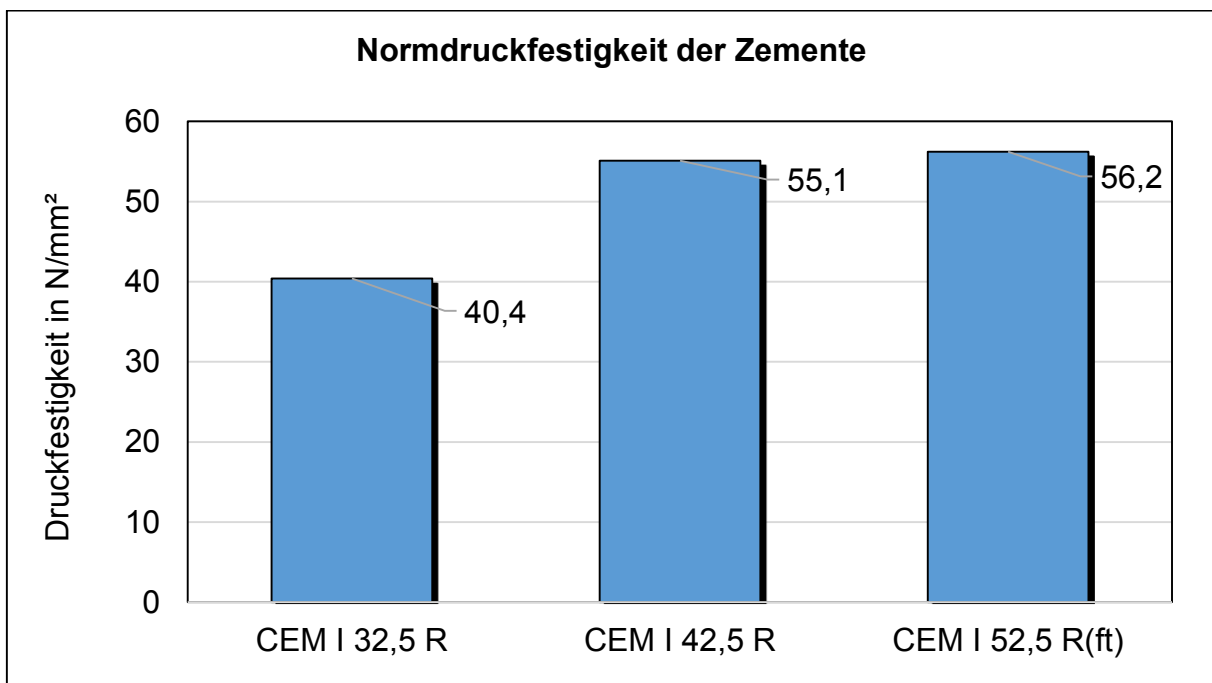


Abb. B3: Normdruckfestigkeiten der Zemente nach DIN EN 196-1 [B2]

Die ermittelten Normdruckfestigkeiten betragen beim CEMI 42,5 55,1 N/mm² und beim CEMI 52,5 56,2 N/mm². Die mit der Zementauswahl erwarteten Unterschiede sind zwischen den beiden Zementen sehr gering. Dahingegen lag die Normdruckfestigkeit vom CEMI 32,5 R mit 40,4 N/mm² im Bereich der deklarierten Festigkeit. Die Mörtel-druckfestigkeiten nach 28 Tagen mussten bei den Rezepturen mit CEMI 42,5 und CEMI 52,5 wegen der höheren Normfestigkeit deutlich höher liegen als nach dem berechneten Ansatz. Dieses Ergebnis wurde erwartet. Bestätigt wurde die Nutzbarkeit

des rechnerischen Ansatzes für den Zement der Festigkeitsklasse 32,5 N/mm². Auf Mörtel mit höherfesten Zementen (CEMI 42,5 und 52,5) ist der rechnerische Ansatz direkt nicht mehr anwendbar. Unter Annahme eines Korrekturfaktors von 1,7 kann er für Mörtel mit höherfesten Zementen zur Berechnung von Orientierungswerten verwendet werden. Als Basis für den Korrekturfaktor dienen Korrelationen zwischen Druckfestigkeiten und w/z-Werten, die aus den experimentellen Ergebnissen ermittelt wurden. Für die Modellmörtel sind die funktionalen Zusammenhänge in den Abbildungen B4 bis B6 zusammengestellt.

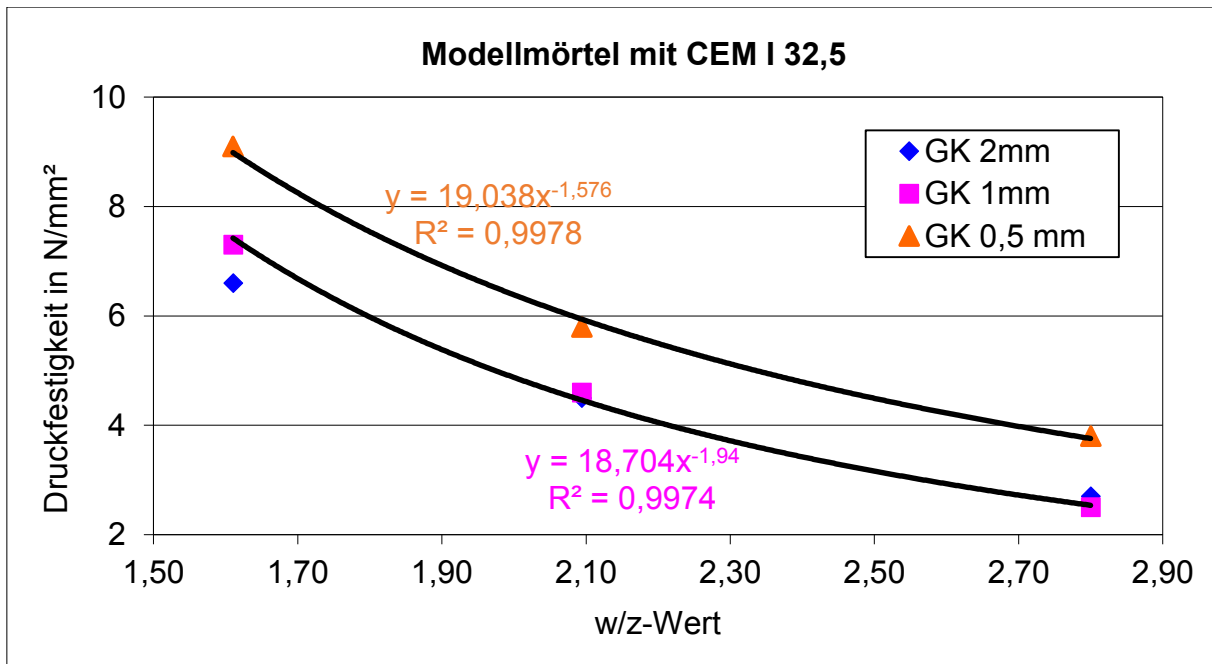


Abb. B4: Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Wasser/Zement-Wert von Modellmörteln mit unterschiedlichem Größtkorn unter Verwendung von CEMI 32,5

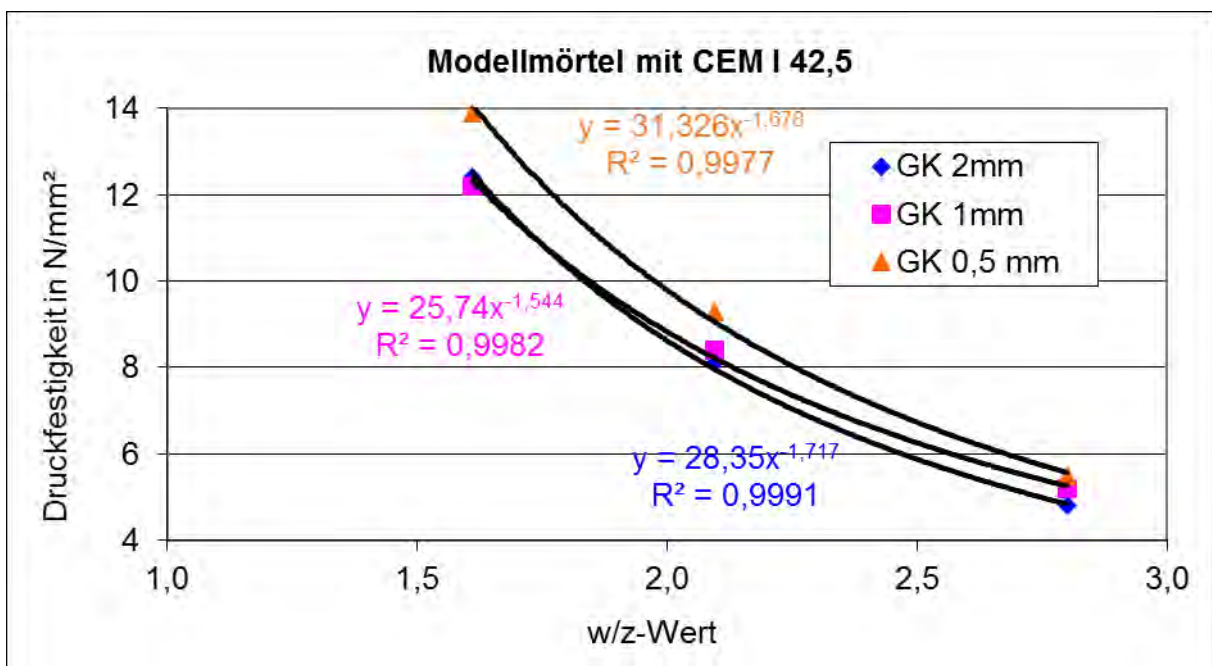


Abb. B5: Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Wasser/Zement-Wert von Modellmörteln mit unterschiedlichem Größtkorn unter Verwendung von CEM I 42,5

Für die Mörtel mit den beiden Zementarten ergeben sich tendenziell vergleichbare Zusammenhänge.

Zwischen den dargestellten Parametern besteht ein exponentieller Zusammenhang. Es werden Bestimmtheitsmaße von 0,99 erreicht. Es deutet sich eine Abhängigkeit von der Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung – hier gekennzeichnet über das Größtkorn – an. Sehr ähnliche Kurvenverläufe ergeben sich für die Mörtel mit Größtkorn 1 und 2 mm. Davon zu etwas höheren Festigkeiten verschoben verläuft die Kurve des Mörtels mit Größtkorn 0,5 mm. Der feine Mörtel ließ sich im Laborversuch besser verdichten als die beiden anderen. Daraus resultieren die höheren Festigkeitswerte bei gleichen Wasser/Zement-Werten.

Auf Kalk-Zement-Mörtelsysteme unter Zugabe von eigenschaftsverbessernden Zusätzen kann ebenfalls der genannte Modellansatz angewendet werden. Auch hier sind die Festigkeitsklassen der Zemente zu berücksichtigen. In Abbildung B6 sind die Zusammenhänge zwischen Druckfestigkeiten und w/z-Wert an diesen Mörteln unter Zugabe von Dispersion in Gehalten von 0,1, 0,15 und 0,2 M.-% bezogen auf den Trockenmörtel sowie ohne Dispersionszusatz dargestellt.

Dispersionen in bestimmten Größenordnungen verbessern die Verarbeitungseigenschaften des Frischmörtels.

Geeignete ACRYLATdispersionen verbessern nicht nur die Flankenhaftung, sondern können auch zur gezielten Steuerung der Festigkeitseigenschaften eingesetzt werden.

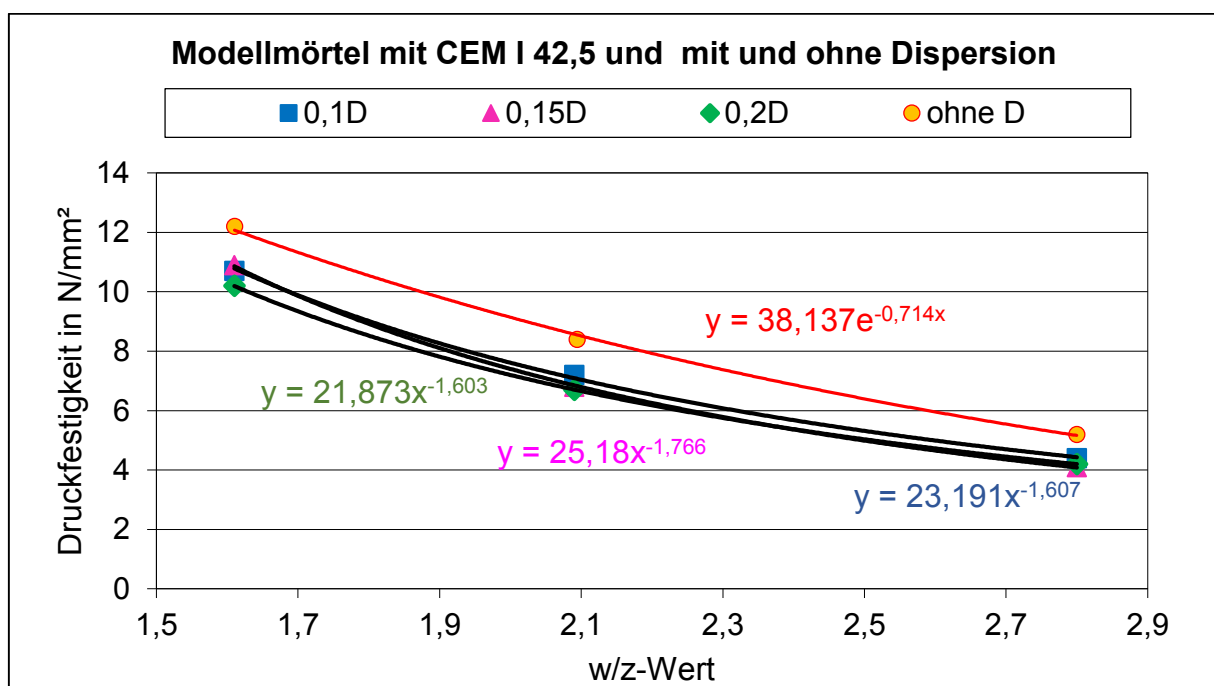


Abb. B6: Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Wasser/Zement-Wert für Rezepturen mit Größtkorn 1 mm, Zementfestigkeitsklasse 42,5 und Dispersionszusatz

Zwischen den dargestellten Parametern besteht auch hier ein exponentieller Zusammenhang. Es ist ein deutlicher Einfluss der Dispersionszusätze im Vergleich zu den dispersionsfreien Mörteln erkennbar. Durch die Dispersionszusätze verringern sich die Druckfestigkeiten bei vergleichbaren Wasser/Zement-Werten. Die Ursache dafür sind Luftporeneinträge in die Frischmörtel während der intensiven Durchmischung der Mörtelausgangsstoffe.

B2 Variation der Eigenschaften von Mörteln mit natürlich hydraulischen Kalken oder Trasskalk als Bindemittel

Für die Untersuchungen an Mörteln mit Bindemittel auf der Basis natürlich hydraulischer Kalke und Trass wurden die in Tabelle B5 aufgeführten Bindemittel verwendet.

Tabelle B5: Verwendete Bindemittel

Bindemittel	Mörtelbezeichnung
Natürlicher Hydraulischer Kalk En 459-1 NHL 2	ZB1-NHL 2
Natürlicher Hydraulischer Kalk En 459-1 NHL 5	ZB1-NHL 5
Natürlicher Hydraulischer Kalk En 459-1 NHL 2-Z5	ZB1-NHL 2-Z

Die Mörtel wurden auf der Basis der Zusammensetzung des Modellmörtels ZB 1-3-0 (Größtkorn 1 mm, rechnerisch ermittelte Druckfestigkeit 3 N/mm², ohne eigenschaftsbeeinflussende Zusätze; siehe auch Abschnitt B1) mit einem Zement CEM I 42,5 nach [B2] hergestellt. Die im Mörtel enthaltenen Bindemittel Kalkhydrat und Zement wurden jeweils durch gleiche Volumenanteile der Bindemittel NHL 2, NHL 5 oder NHL 2-Z ausgetauscht. Die Wasser/Bindemittel-Werte wurden entsprechend der Rezepturen der Modellmörtel konstant gehalten. Es wurde eine für Verfugmörtel geeignete verarbeitungsgerechte Konsistenz eingestellt.

Die Prismen wurden in der Form 4 Tage gelagert, entformt bis 14 Tage nach Mörtelherstellung, bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit gelagert und anschließend zusätzlich 1x wöchentlich durch kurzzeitiges Tauchen in Wasser nachbehandelt.

An den Mörteln wurden Druck- und Biegezugfestigkeiten, Rohdichten sowie der dynamische E-Modul entsprechend der Ausführungen im Abschnitt B1 ermittelt.

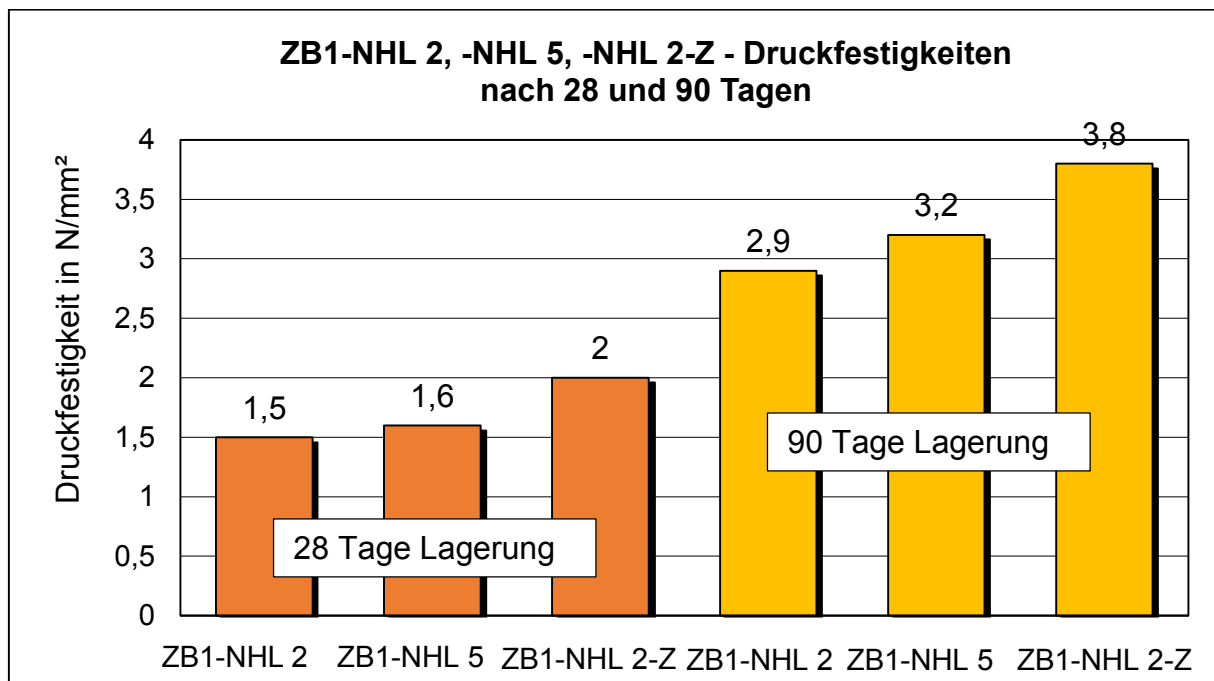


Abb. B7: Druckfestigkeiten der Mörtel mit NHL 2, NHL 5 und NHL 2-Z als Bindemittel nach 28 und 90 Tagen Verfestigungsdauer und Nachbehandlung

Es zeichnen sich erwartungsgemäß Unterschiede zwischen den Mörteln mit Bindemitteln NHL 2, NHL 5 und NHL 2-Z ab. Diese stehen im Zusammenhang mit den Normdruckfestigkeiten der Bindemittel (siehe Abbildung B7). Von 28 zu 90 Tagen Lagerungsdauer kommt es nochmals zu einer deutlichen Festigkeitszunahme. Die Ergebnisse bestätigen die in [B6] dargestellten Untersuchungen. Nach weiterer gleichartiger Lagerung ist mit Festigkeitszuwächsen zu rechnen.

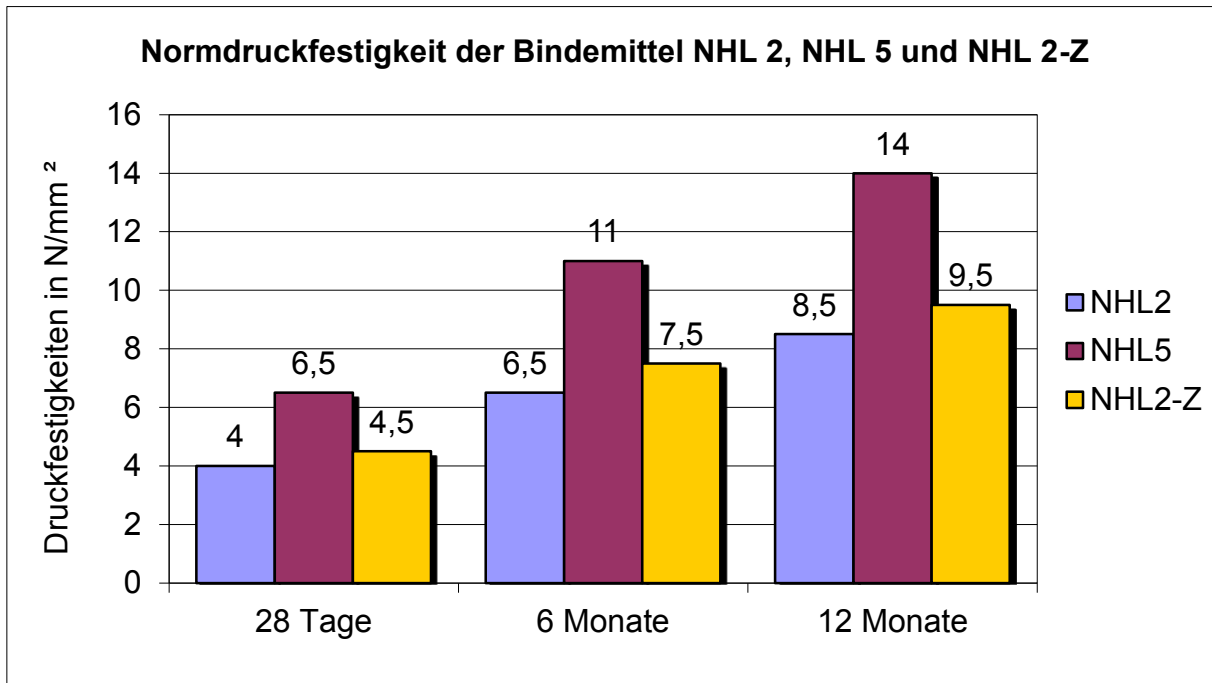


Abb. B8: Normdruckfestigkeiten der Bindemittel n NHL 2, NHL 5 und NHL 2-Z nach 28 Tagen, 6 und 12 Monaten Verfestigungsdauer [B5]

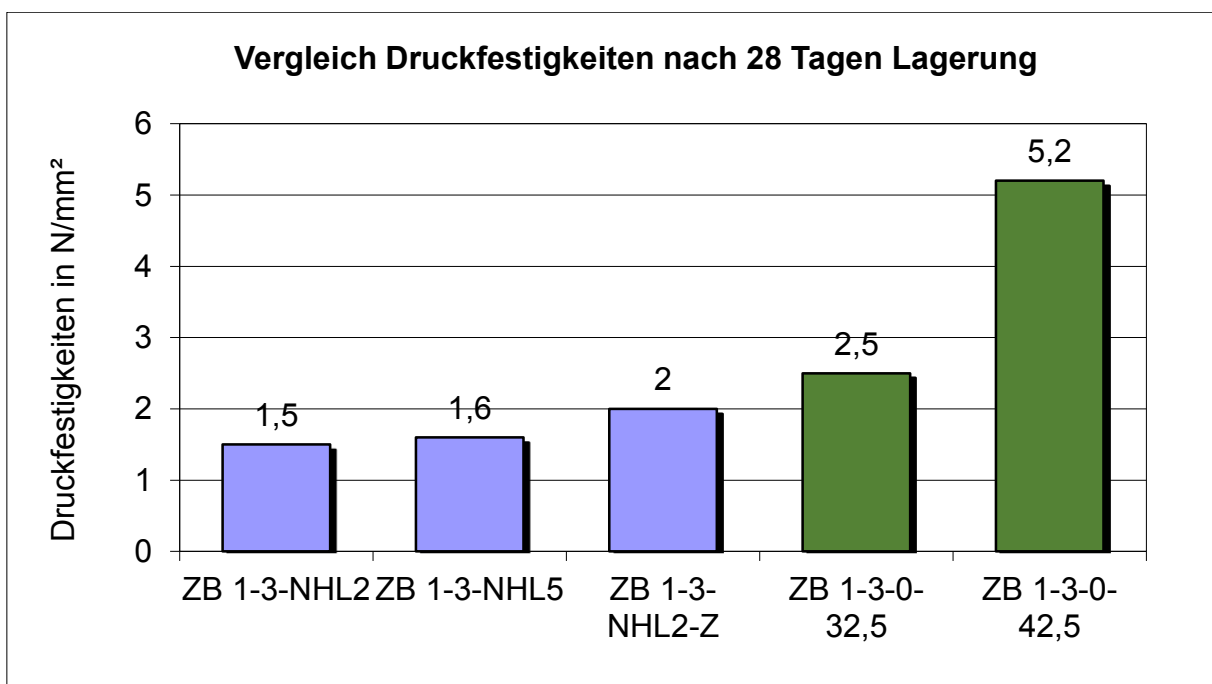


Abb. B9: Druckfestigkeiten nach 28 Tagen Verfestigungsdauer von Modellmörteln mit Bindemitteln NHL 2, NHL 5 und NHL 2-Z sowie CEM I 32,5 und CEM I 42,5

Kalk-Zement-Mörtel erreichen nach 28 Tagen höhere Festigkeiten als die NHL-gebundenen Mörtel. In den Zementen wird die Festigkeitsentwicklung vor allem durch die calciumreichen Calciumsilikatphasen bestimmt. Diese Phasen werden zum überwiegenden Teil in den ersten 28 Tagen der Verfestigung umgesetzt.

Natürlich hydraulische Kalke enthalten im Gegensatz zu Zementen calciumärmere hydraulisch reagierende Phasen und zusätzlich höhere Anteile an freiem Kalk. Daraus resultiert eine langsamere Verfestigung.

In Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen während der Erhärtung und / oder den Nachbehandlungsmaßnahmen kann es zu beträchtlichen Festigkeitssteigerungen im Vergleich zu den nach 28 Tagen Verfestigungsdauer erreichten Werten kommen.

Nach Untersuchungsergebnissen in [B7] können die Mörtelfestigkeiten nach etwa 300 Tagen Verfestigungsdauer bis etwa auf das 8-fache der nach 28 Tagen erreichten Werte steigen.

B 3 Thermisch-hygrische Eigenschaften ausgewählter Modellmörtel mit Kalk und Zement als Bindemittel

An Modellmörteln mit Kalk und Zement als Bindemittel wurden Untersuchungen zur hygrischen und thermischen Längenänderung und zur kapillaren Wasseraufnahme durchgeführt. Darüber hinaus wurde der Wasserdampfdiffusionswiderstandswert bestimmt. Nachfolgend sind einige Ergebnisse exemplarisch zusammengestellt.

B3.1 Hygrische Längenänderung

An einer Modellmörtelauswahl sind Untersuchungen zur Erfassung von Kennwerten für hygrische Längenänderungen durchgeführt worden.

Die Mörtelproben (Prismen der Größe 4 x 4 x 16 cm³) lagerten ca. 4 - 6 Monate bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte. Die maximal möglichen hygrischen Längenänderungen wurden durch unter Wasser Lagerung der Prismen ermittelt. Nullmessungen zur Erfassung der Ausgangssituation erfolgten vor Beginn der Wasserlagerung. Nach 3 Tagen wurden die Prismen aus dem Wasserbad entnommen und die Längenänderung erfasst.

An einer Prismenauswahl erfolgte die Ermittlung der Längenänderung in Anlehnung an DIN 52450 [B8]. Anderen Prismen wurden Messmarken (100 mm Messstrecke) aufgeklebt und die Längenänderungen mit einer Messuhr erfasst.

Für die Mörtel ergaben sich hygrische Längenänderungen zwischen 0,06 und 0,23 mm/m. Es deuteten sich Einflüsse vom Größtkorn der Gesteinskörnung im Mörtel und Zugaben modifizierender Zusätze zum Mörtel an.

Abbildung B10 enthält Ergebnisse für Kalk-Zement-Mörtel unter Verwendung eines Zementes CEM I 42,5, gleichbleibenden Kalk-Zement-Verhältnissen, Gesteinskörnungen mit unterschiedlichem Größtkorn und verschiedenen modifizierenden Zusätzen.

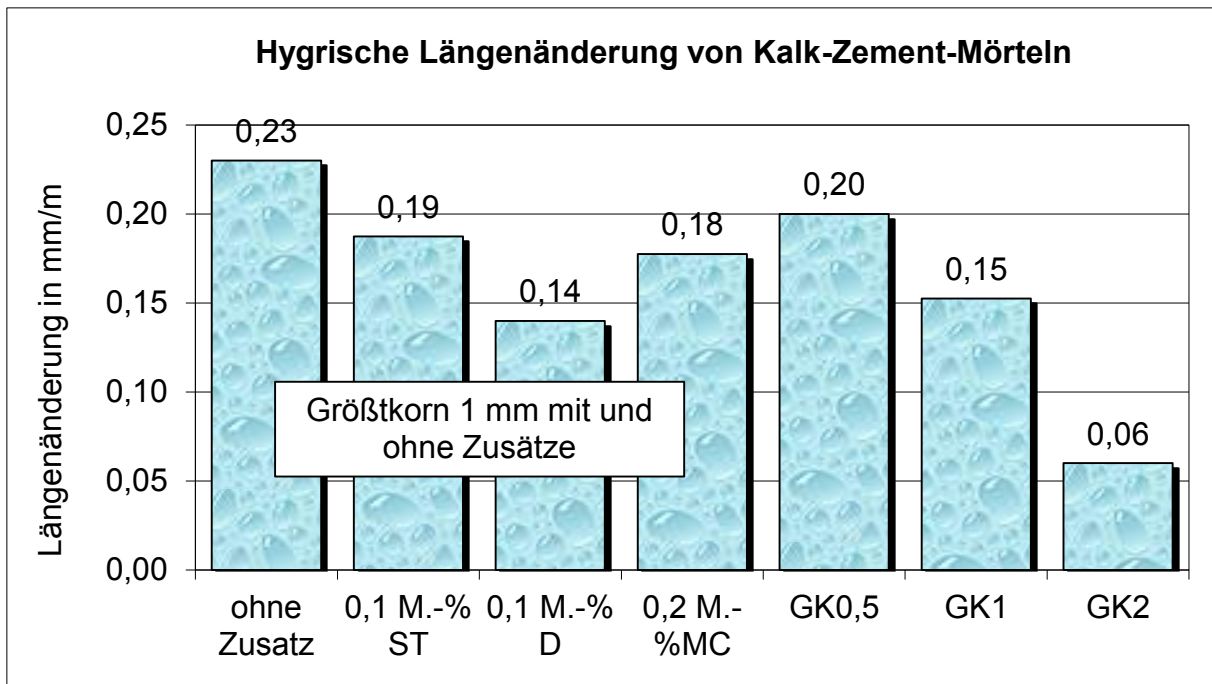


Abb. B10: Hygrische Längenänderung von Modellmörteln, ermittelt an Prismen mit Messmarken, 100 mm Messstrecke, nach 3 Tagen unter Wasser Lagerung

Bei gleichbleibender Rezepturzusammensetzung mit gleichem Größtkorn (1 mm) reduziert sich die hygrische Längenänderung durch Zusätze wie Stearat, (ST) Dispersion (D) und Methylcellulose (MC). Ebenfalls nimmt die hygrische Längenänderung bei gleichbleibender Rezepturzusammensetzung mit Vergrößerung der Gesteinskörnung ab.

B3.2 Kapillare Wasseraufnahme

Wie bei der Ermittlung der hygrischen Längenänderung sind an einer Auswahl von Modellmörteln auf Kalk-Zement-Basis mit CEM I 42,5, gleichbleibendem Kalk-Zement-Verhältnis, Größtkorn 1 mm und verschiedenen modifizierenden Zusätzen Untersuchungen zur kapillaren Wasseraufnahme und zum Wasserdampfdiffusionswiderstand durchgeführt worden.

Die Ermittlung des kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgte in Anlehnung an DIN 52617 [B9]. Die Scheibendicke betrug 2 cm.

In Abbildung 11 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Über einen Zeitraum von 24 Stunden sind die Kurvenverläufe für die kapillare Wasseraufnahme aufgenommen worden. Die nachfolgend angegebenen Werte für die kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten wurden anhand von Daten aus dem linearen Verlauf der kapillaren Wasseraufnahme über \sqrt{t} (nach etwa 0,5 Stunden) ermittelt.

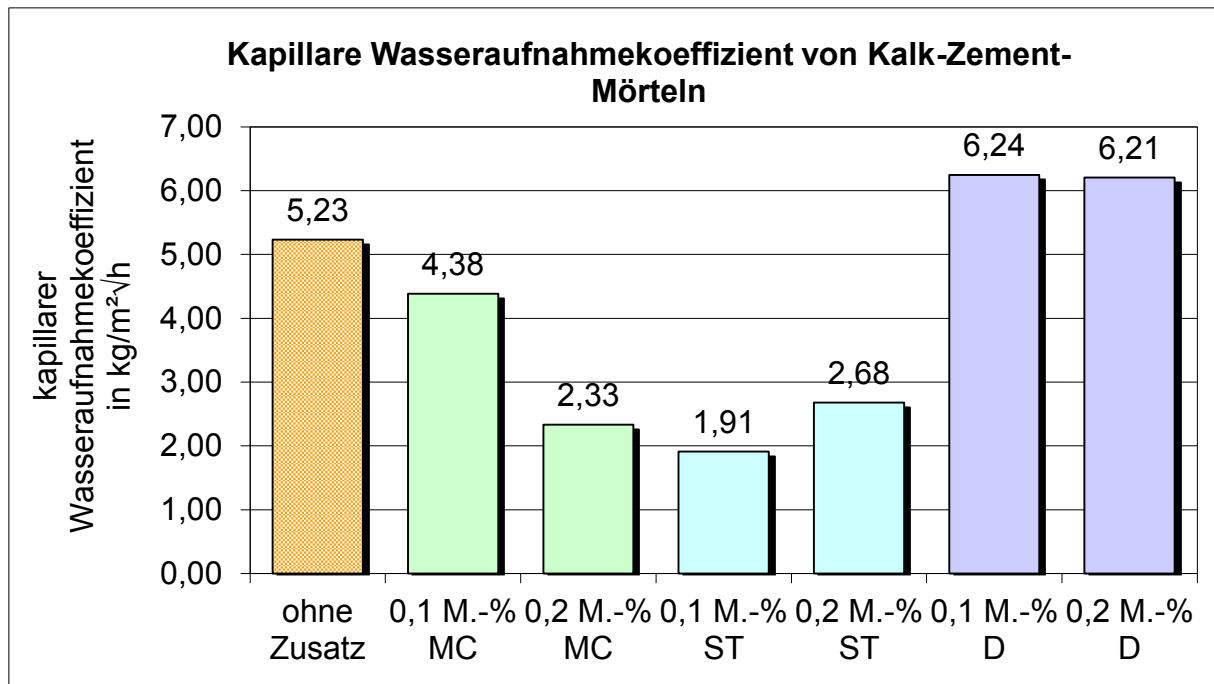


Abb. B11: Kapillare Wasseraufnahme von Modellmörteln, ermittelt an Probekörpern mit und ohne modifizierende Zusätze

Die kapillare Wasseraufnahme wird durch Zusätze wie Stearat, (ST) Dispersion (D) und Methylcellulose (MC) beeinflusst. Methylcellulose und Stearat reduzieren die kapillare Wasseraufnahme. Die hier verwendete Dispersion führt zu einer Erhöhung der Werte.

Die Ergebnisse zeigen, dass neben der Mischungszusammensetzung auch modifizierende Zusätze zur Einstellung spezifischer Mörtel Eigenschaften geeignet sind.

B3.3 Wasserdampfdiffusionswiderstand

Nach DIN EN 1931 [B10] erfolgten Untersuchungen zur Ermittlung der Wasserdampfdiffusionswiderstände im Trockenbereichsverfahren (23-0/50). Erfasst werden sollten die Einflüsse von modifizierenden Zusätzen im Mörtel. Es kamen die gleichen Probekörper wie unter B3.2 zu Einsatz. Zusätzlich sind Kalk-Zement-Mörtel mit unterschiedlichen Zementarten untersucht worden.

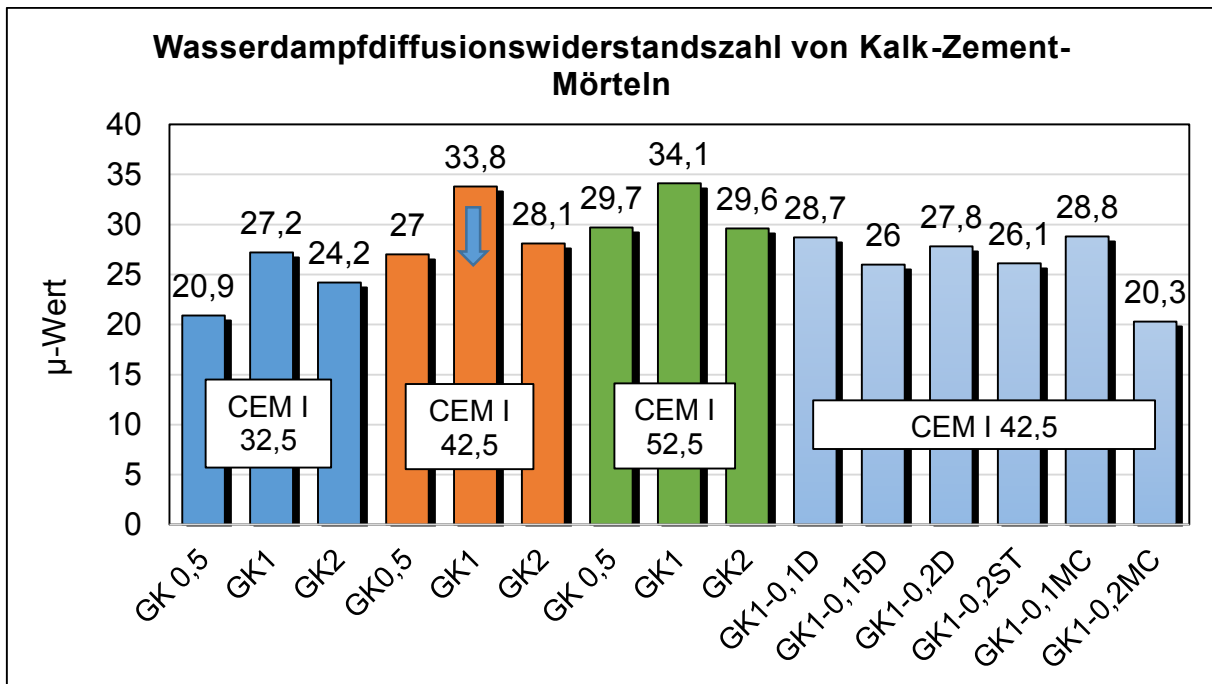


Abb. B12: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ von Modellmörteln, ermittelt an Probekörpern mit unterschiedlichen Zementen sowie mit und ohne eigenschaftsbeeinflussenden Zusätzen

Insgesamt ergeben sich Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen zwischen 20 und 35. Es deutet sich ein Einfluss der Zementart an, der auf eine Zunahme der Werte mit der Erhöhung der Festigkeitsklasse des Zementes hinweist. Im Vergleich zum Mörtel „GK1“ (Pfeil) ohne modifizierende Zusätze können durch Anwendungen der angegebenen Zusätze Reduktionen der Werte erzeugt werden.

B3.4 Thermische Längenänderung

Untersuchungen zur thermischen Längenänderungen wurden an Modellmörteln unterschiedlicher Zusammensetzung durchgeführt. Nachfolgend sind anhand ausgewählter Beispiele einige Ergebnisse zusammengestellt.

Für die Erfassung der Daten wurde ein Temperaturbereich von -20 und $+60^\circ\text{C}$ gewählt. Mit den Messungen wurde nach Vorkonditionierung der Proben bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit begonnen. Zunächst ist die Temperatur in 10 K Stufen – mit Haltezeiten von 4 Stunden je Temperaturstufe – auf $+60^\circ\text{C}$ erhöht worden. Die absolute Luftfeuchtigkeit im Messraum blieb konstant, d.h. die relative Luftfeuchtigkeit stellte sich in Abhängigkeit von der Temperatur ein. Nach Erreichen der Temperatur von $+60^\circ\text{C}$ erfolgte die Abkühlung in 20 K Stufen mit den gleichen Haltezeiten und gleichen absoluten Luftfeuchten. Anschließend wurden die Messungen wiederholt.

Mit den Messungen bei tiefen Temperaturen wurde ebenfalls nach Vorkonditionierung der Proben bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit begonnen.

Zunächst ist die Temperatur in 10 K Stufen – mit Haltezeiten von 4 Stunden je Temperaturstufe – auf -20°C abgesenkt worden. Die absolute Luftfeuchtigkeit im Messraum blieb konstant. Nach Erreichen der Temperatur von -20°C erfolgte die Aufheizung in 20 K Stufen mit den gleichen Haltezeiten und gleichen absoluten Luftfeuchten. Anschließend wurden die Messungen wiederholt.

Während der thermischen Konditionierung der Proben wurde die Längenänderung kontinuierlich mit induktiven Wegaufnehmern aufgezeichnet.

Um praxisnahe Messergebnisse zu erzielen, wurde die absolute Luftfeuchte im Messraum konstant gehalten. Bei Verringerung der Temperaturen kam es unter den gewählten Ausgangsbedingungen zu Taupunktunterschreitungen im Temperaturbereich zwischen 10 und 12°C. Mit derartigen Erscheinungen ist bei Temperaturwechseln über Tageszyklen auch unter realen Bedingungen zu rechnen. Zum Zeitpunkt der Messungen hatten die Mörtelproben mindestens ein Alter von 20 Monaten.

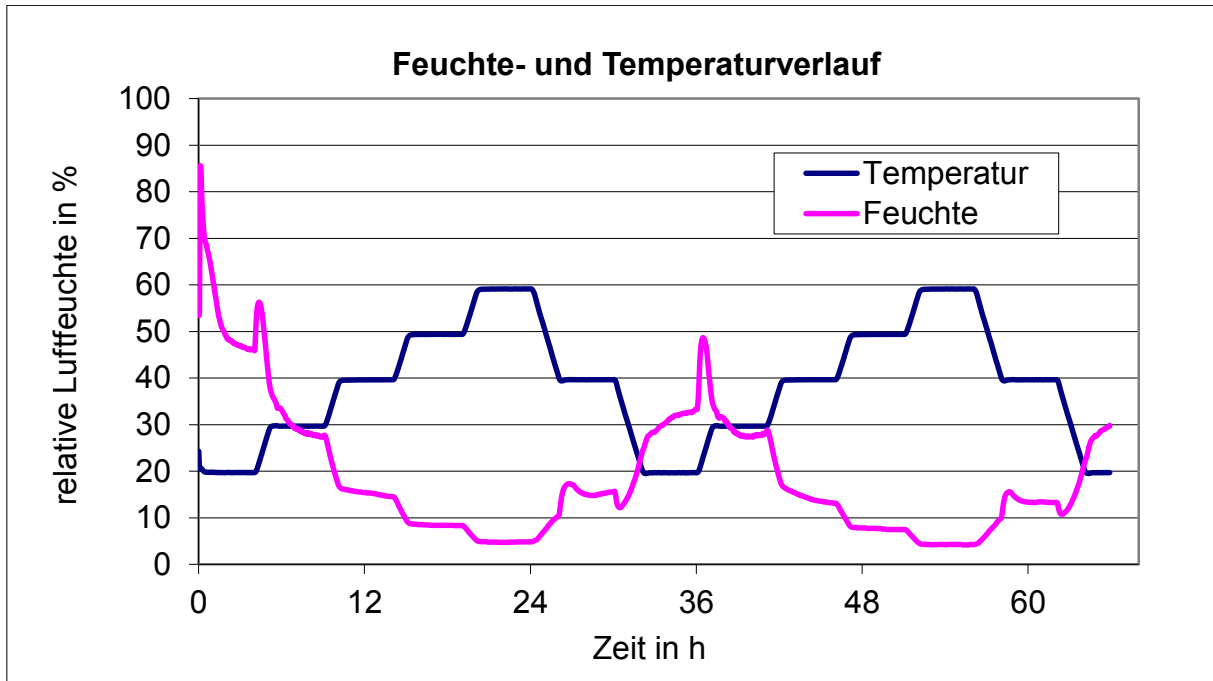


Abb. B13: Temperatur- und Feuchteverlauf für die Messungen in Abb. B14

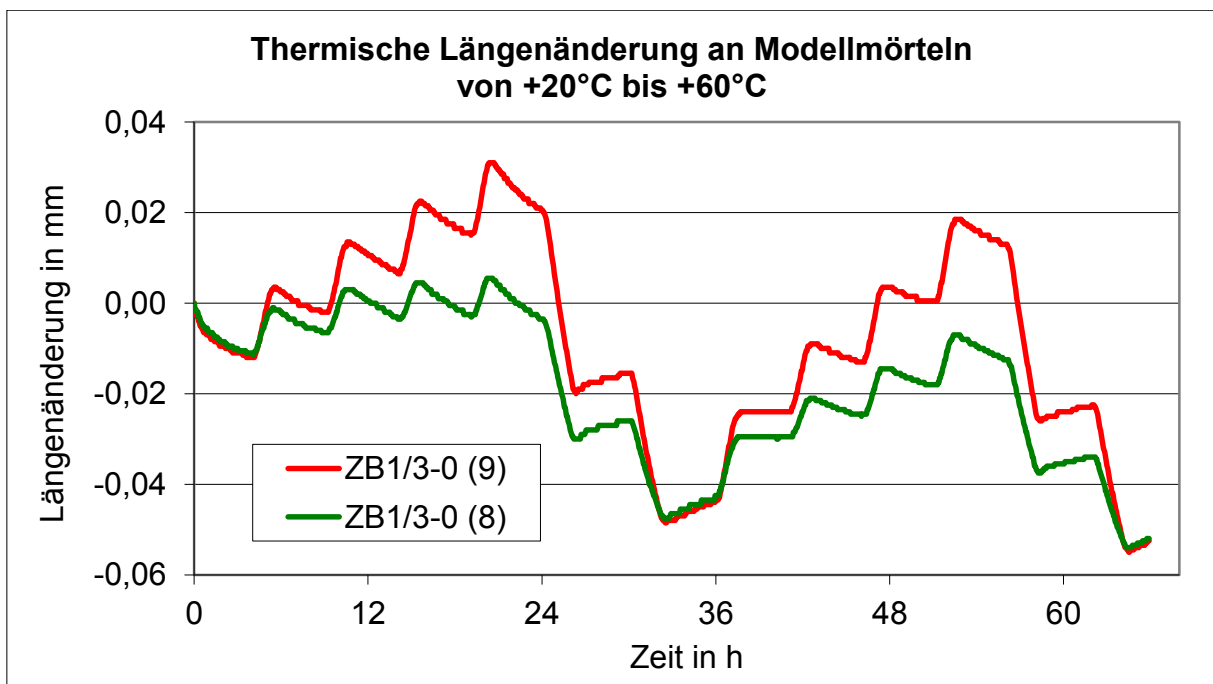


Abb. B14: Thermische Längenänderungen des Mörtels ZB1/3-0 (Proben 8 und 9)

Bei der Erhöhung der Temperatur kommt es zunächst zu einer stetigen Längenänderung. Mit Erreichen des konstanten Temperaturniveaus verringern sich die Werte mit der Haltedauer. Mit Erhöhung der Temperaturen kommt es zu starken Absenkungen der relativen Luftfeuchten. Daraus resultiert eine verstärkte Abgabe von Feuchtigkeit aus den Mörtelproben. Die nach der Temperaturerhöhung eingetretenen thermischen Längenänderungen (Vergrößerung der Probenabmessung) wird in den Bereichen des konstanten Temperaturniveaus durch Trocknungsprozesse überlagert und es kommt zu einer Verringerung der Probenabmessung (Schwinden). Die Unterschiede zwischen den Kurvenverläufen der Rezeptur nach gleicher Mörtel sind bedingt durch geringfügige Unterschiede bei der Verdichtung der Frischmörtel während der Probenkörperherstellung.

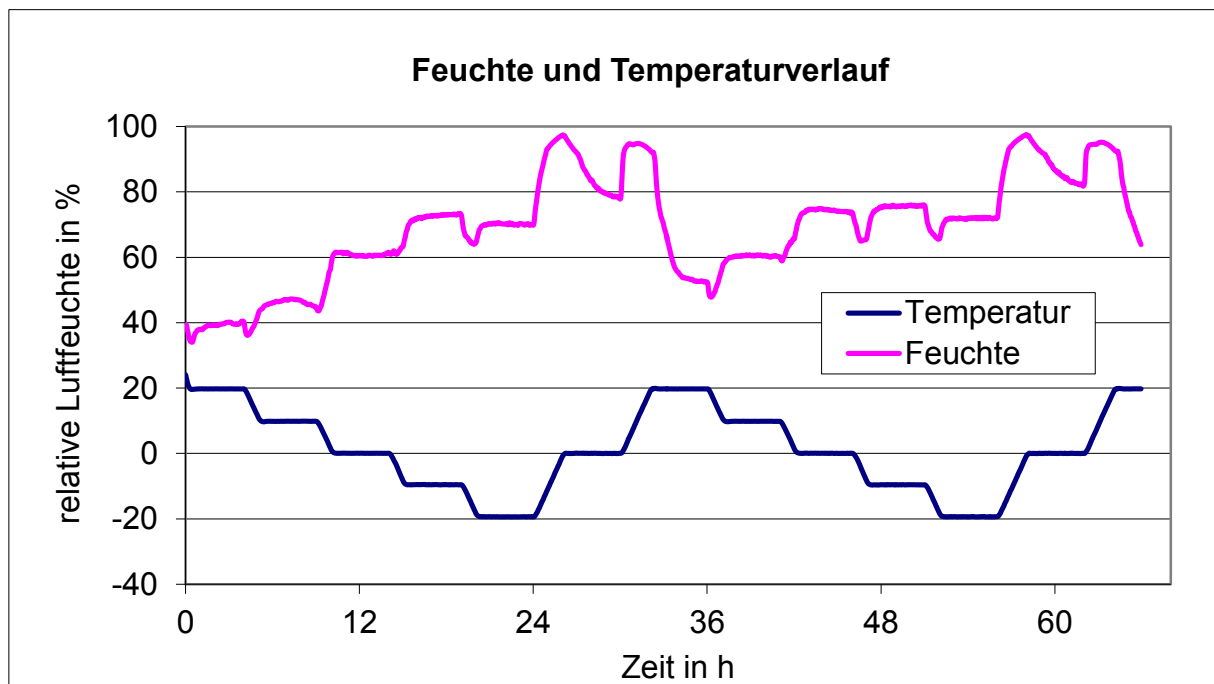


Abb. B15: Temperatur- und Feuchteverlauf für die Messungen in Abb. B16

Mit Absenken der Temperatur von 20°C auf -20°C steigt die relative Luftfeuchtigkeit an. Unter den oben genannten Ausgangsbedingungen (20°C und 65% relative Luftfeuchte) ist mit einer Taupunktunterschreitung bei Temperaturabsenkung ab etwa 13°C zu rechnen. Damit verbunden wären Kondensatwasserbildungen auf den Probenoberflächen und ein Aufsaugen dieses Wassers durch die Mörtelproben.

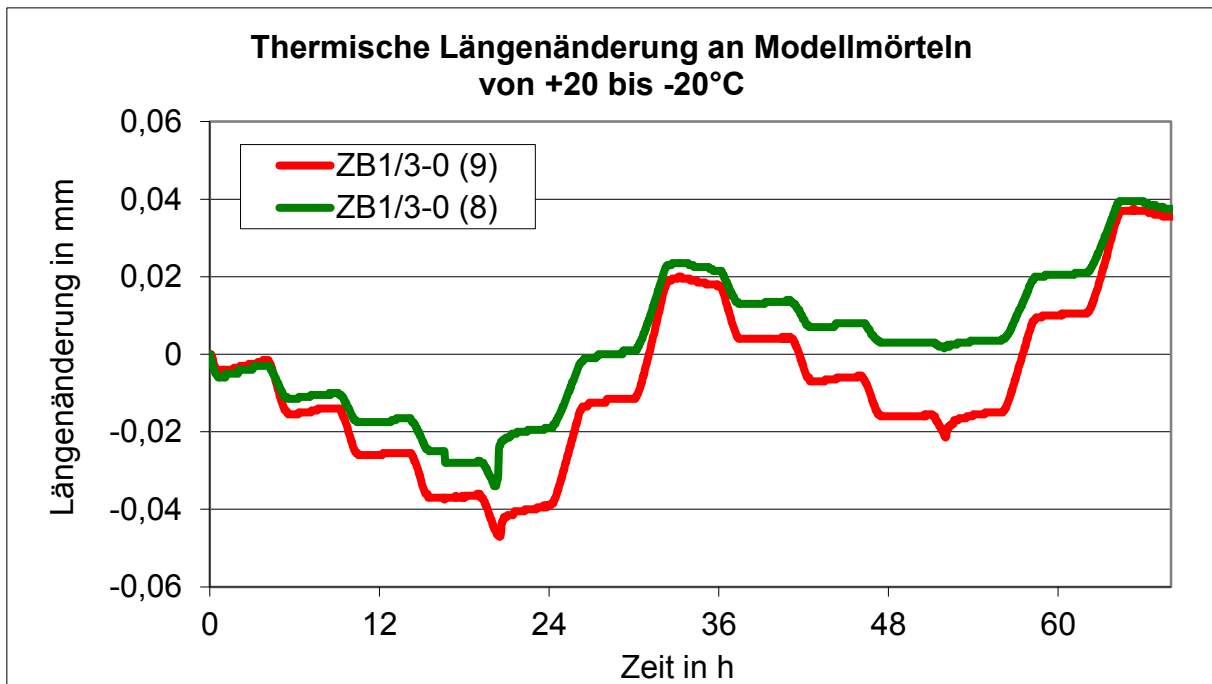


Abb. B16: Thermische Längenänderungen des Mörtels ZB1/3-0 (Proben 8 und 9)

Im Gegensatz zur Darstellung in Abb. B14 kommt es mit Erreichen des konstanten Temperaturniveaus nach Absenkung der Temperatur um jeweils 10 K zu einer Verringerung der Länge. Unmittelbar danach erfolgt eine Zunahme der Werte. Die Ursache dieser Phänomene wurde unter Abb. B15 beschrieben. Durch das Aufsaugen von Kondensatwasser, welches sich auf der Mörteloberfläche bildet, kommt es zum hygrischen Quellen auf der Mörteloberfläche und zur Volumenvergrößerung.

Die vorgestellten Ergebnisse und viele andere im Rahmen des Projekts durchgeführten Messungen zeigen, dass die thermischen Verformungen von Mörteln unter praxisnahen Bedingungen sehr komplexen Einflüssen unterliegen. Die einzelnen Einflussgrößen des Gesamtprozesses sind unter Laborbedingungen nur schwer erfassbar und zuordenbar.

Literaturangaben

- | | | |
|-----|--|---|
| B1 | Zier, H.-W. und Weise, G. | Untersuchungen zur Ermittlung von Zusammenhängen zwischen Mischungsverhältnissen, Zuschlagstoffparametern und Druckfestigkeiten bei Putzmörteln, betontechnik, 1989, Heft 1 (Februar), S. 27-30 |
| B2 | DIN 18555-4: 1982-03 | Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Festmörtel – Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte |
| B3 | DIN EN 196-1: 2005-02 | Prüfverfahren für Zement, Teil 1: Bestimmung der Festigkeit |
| B4 | DIN EN 12504-4: 2004-12 | Prüfung von Beton in Bauwerken - Teil 4, Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit |
| B5 | Zement- und Kalkwerke-Otterbein GmbH + Co.KG | Technisches Merkblatt Natürlich hydraulische Kalke EN 459-1 NHL 2, NHL 5 und NHL 2-Z |
| B6 | Zier, H.-H, Seifert, F. Kraus, K. | Kalkmörtel mit natürlich hydraulischen Anteilen: Festmörteleigenschaften und Reaktionswärme während der frühen Verfestigung, In: Neue Erkenntnisse zu den Eigenschaften von NHL - gebundenen Mörteln, IFS-Bericht Nr. 26-2007, S. 81-98 |
| B7 | Goedeke, H. Goretzki, L. | Zum Verfestigungsverhalten von NHL - Mörteln und zum Gefügebau der Bindemittelmatrix-Forschungsbericht, In: Neue Erkenntnisse zu den Eigenschaften von NHL - gebundenen Mörteln, IFS-Bericht Nr. 26-2007, S. 1-80 |
| B8 | DIN 52450: 1985-08 | Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe – Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern |
| B9 | DIN 52617:1987-05 | Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen |
| B10 | DIN EN 1931:2014-03 | Abdichtungsbahnen – Bitumen-, Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit |

Anlage C: Orientierende Untersuchungen an Modellwänden

C1 Auswahl von Mörteln und Steinen

Ziel der Untersuchungen war die Charakterisierung von Zusammenhängen zwischen Verformungen im oberflächennahen Bereichen des Natursteinmauerwerks und Veränderungen an den Fugengeometrien. Als oberflächennaher Bereich wird eine Fugentiefe bis 3 cm unter der Natursteinoberfläche angesehen.

Es wurden 3 Modellwände (Größe 1,00 x 0,80 x 0,2 m³) jeweils unterschiedlicher Natursteinarten errichtet. Steinmaterialien waren Quader aus Seeberger Sandstein, Nebraer Sandstein und Muschelkalk. Als Mauer- und Verfumörtel dienten verschiedene Kalk-Zement-Mörtel (siehe auch Anlage B).

In der Tabelle C1 sind die für die Untersuchungen ausgewählten Natursteine und deren relevanten Kennwerte aufgeführt.

Tabelle C1: Kennwerte der Natursteine der Modellwände

Kennwert/Naturstein		Seeberger Sandstein	Nebraer Sandstein	Muschelkalk (Kirchheim / Oberdorla)
Druckfestigkeiten in N/mm ² ¹⁾	⊥	57 - 88	32 - 37	26 - 87
Biegezugfestigkeit in N/mm ² ¹⁾	⊥	3,6 - 6,4	1,6 - 2,8	9,5 - 13,5
Dynamischer E.-Modul in N/mm ² ¹⁾	⊥	13 - 20,8	10,9 - 12,9	53,2 - 71,6
Kapillare Wasseraufnahme in kg/m ² √h ²⁾		2,3 - 5,8	13,5 - 16,3	0 - 3,9
Hygrische Längenänderung in mm/m (21d) ³⁾	II	-0,094	-0,055	-0,078
	⊥	-0,164	-0,118	-0,313
Thermische Längenänderung α _T (20 - 60°C) in 10 ⁻⁶ *K ⁻¹	II	16,65	18,37	9,36

¹⁾ Die Prüfung dieser Kennwerte erfolgte an Prismen der Abmessungen 40 x 40 x 200 mm³ in Anlehnung an DIN EN 196: 2005-02, Prüfverfahren für Zement, Teil1: Bestimmung der Festigkeit

²⁾ Die kapillare Wasseraufnahme wurden an Platten mit den Abmessungen ca. 200 x 170 mm², Plattendicke 30-40 mm durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten in Anlehnung an DIN 52617: 198705, Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen

³⁾ Zur Ermittlung der hygrischen Längenänderung wurde eine Messstrecke von 100 mm auf die Natursteinplatten aufgeklebt. Die Längenänderung wurde nach 7 und 21 Tagen unter Wasser Lagerung erfasst.

Die Natursteine sind mit einem konfektionierten Mauermörtel – MAXIT mur 950 HS 2 mm der Fa. Maxit Krölpa GmbH & Co. KG aufgemauert worden. Die Fugenausbildung erfolgte in verschiedenen Breiten (3, 6 und 10 mm) und Tiefen (6, 12 und 20 mm). Eine Zuordnung von Fugenbreiten der Lagerfugen enthält Tabelle C3. Die Verfumung erfolgte mit einer Auswahl von Modellmörteln. Nach der Applikation wurden die Verfumörtel über einen Zeitraum von 2 Tagen nachbehandelt (befeuchtet). Die Verfumung wurde bündig mit der Steinoberfläche ausgeführt. Tabelle C2 enthält Angaben zu den ausgewählten Verfumörteln.

Tabelle C2: Mechanische Eigenschaften der Mörtel

Mörtel	Druckfestigkeit in N/mm ²	Biegezugfestigkeit in N/mm ²	dyn. E.-Modul in kN/mm ²
Mauermörtel MAXIT mur 950 HS	7,9	2,3	5,3
Verfugmörtel			
ZB 0,5-3-0	3	0,7	4,0
ZB 0,5-8-0	10,1	2,3	9,3
ZB 1-3-0	4,7	1,2	6,7
ZB 1-8-0	15	3,8	14,0
ZB 2-3-0	5,2	1,3	7,2
ZB 2-8-0	16,5	3,8	15,2

Tabelle C3: Formate der Lagerfugen und Mörtelzuordnung in den Modellwänden

Verfugmörtel	Fugenbreite in mm	Fugentiefe in mm	Größtkorn der Gesteinskör- nung im Mörtel in mm
ZB 0,5-3-0	ca. 3	ca. 6	0,5
ZB 0,5-8-0	ca. 3	ca. 6	0,5
ZB 1-3-0	ca. 6	ca. 12	1,0
ZB 1-8-0	ca. 6	ca. 12	1,0
ZB 2-3-0	ca. 10	ca. 20	2,0
ZB 2-8-0	ca. 10	ca. 20	2,0

Die Modellwände aus Seeberger Sandstein, Nebraer Sandstein und Kalkstein mit Kennzeichnung der Fugenbreiten der Lagerfugen und deren Abmessungen sind in den Bildern C1 bis C3 dargestellt.

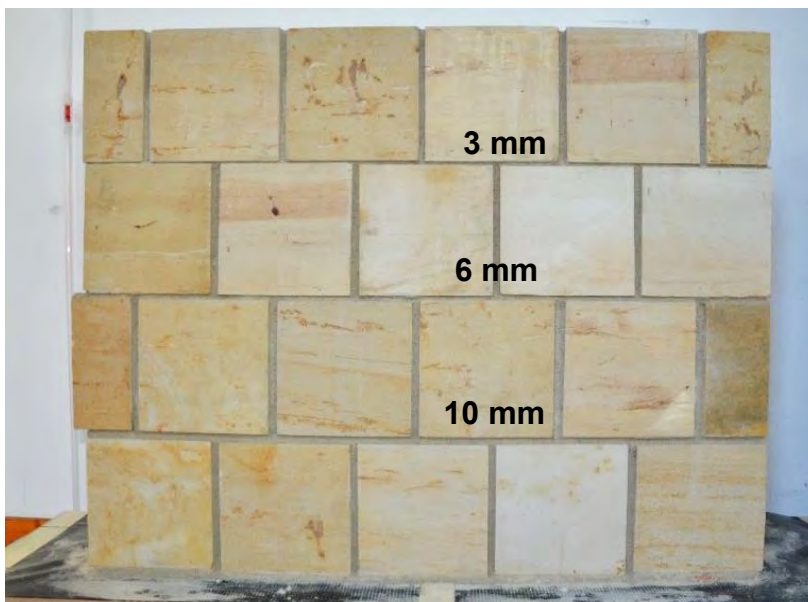


Bild C1: Modellwand aus Seeberger Sandstein mit Kennzeichnung der Fugenbreiten der Lagerfugen.

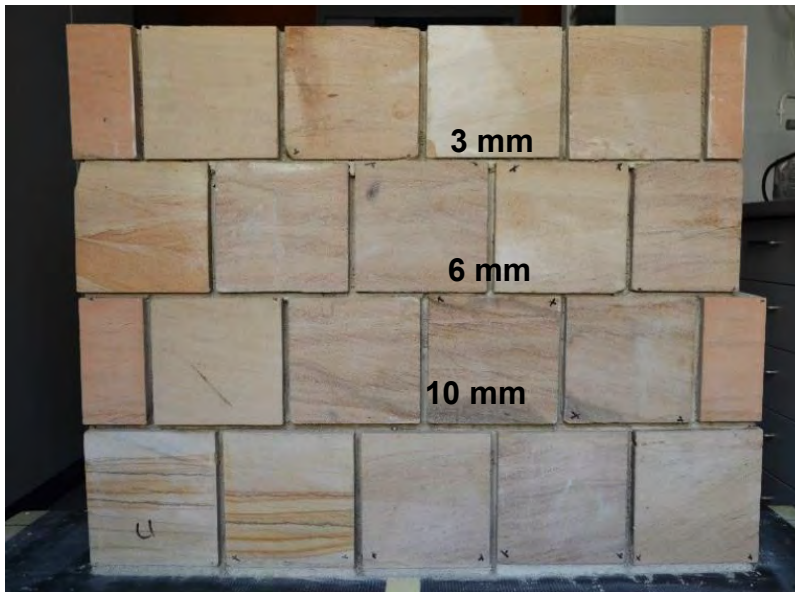


Bild C2: Modellwand aus Nebraer Sandstein mit Kennzeichnung der Fugenbreiten der Lagerfugen

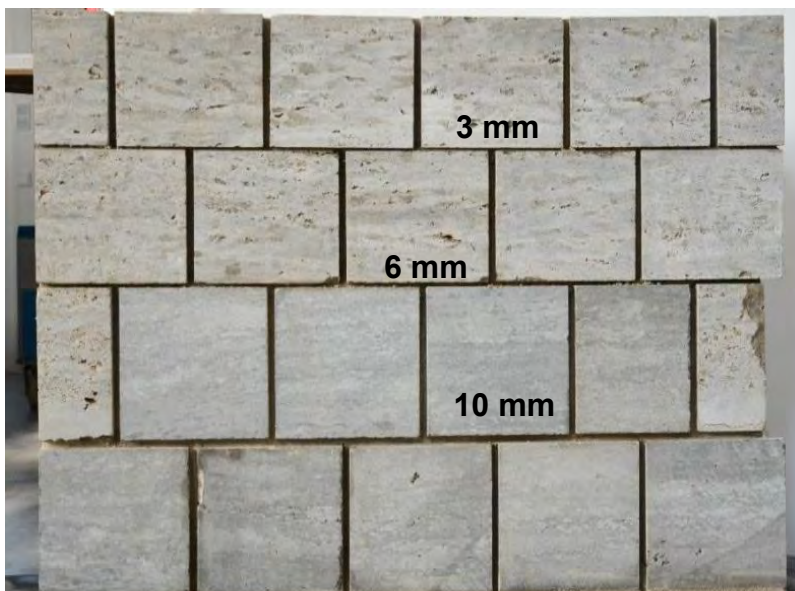


Bild C3: Modellwand aus Kalkstein (Oberdorlaer und Kirchheimer Muschelkalk) mit Kennzeichnung der Fugenbreiten der Lagerfugen

C2 Orientierende Untersuchungen zur Veränderung der Fugengeometrien

An den zuvor dargestellten Modellwänden wurden Veränderungen der Fugengeometrien mit induktiven Wegaufnehmern nach gezielter thermischer Belastung gemessen. Die Modellwände lagerten nach der Verlegung mindestens 28 Tage bei konstanter Raumtemperatur (etwa 22°C und 50 % relativer Luftfeuchte). Die Mörtel in den Fugen sind nach der Applikation mehrfach durch vorsichtiges Anfeuchten nachbehandelt worden. Nach der Applikation der Messtechnik wurden die Wände in einer Klimakammer einem definierten Aufheiz- und Abkühlzyklus ausgesetzt. Die Modellmauern durchliefen jeweils 4 Messzyklen.

Ausgehend von 20°C Wand- und Raumtemperatur erfolgte eine Erhöhung der Raumtemperatur in Stufen von 10 K bis 50°C. Mit Erreichen der jeweiligen Temperaturstufe wurde diese über einen Zeitraum von 1 Stunde gehalten. Die Erwärmung der Mauerwerksoberfläche erfolgte mit zeitlicher Verzögerung.

Die Raumtemperatur wurde anschließend über einen Zeitraum von 3 Stunden kontinuierlich auf 20°C abgesenkt.

Die Simulation sollte praxisrelevant einen Aufheizzyklus, z.B. bei Einwirkung von Sonnenlicht und einem sehr schnellen Abkühlzyklus, z.B. nach einem Temperaturgefälle bei Gewitterereignissen an einer Wandfläche in Süd-West-Ausrichtung nachempfinden.

In der Abbildung C1 ist exemplarisch der Temperaturzyklus im Messraum mit der Modellwand aus Seeberger Sandstein dargestellt. Die Bilder Bildern C4 und C5 zeigen den Aufbau der applizierten Messtechnik an der Modellwand aus Kalkstein.

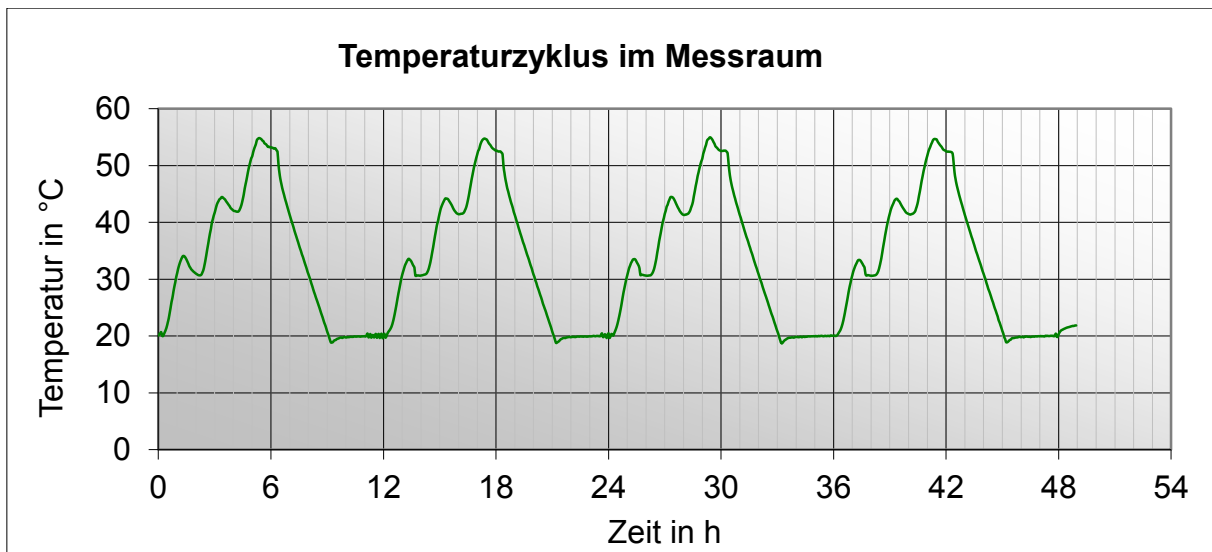


Abb. C1: Aufheiz- und Abkühlzyklen im Messraum mit der Modellwand aus Seeberger Sandstein

Deutlich erkennbar sind die nicht ausgebildeten Plateaus bei Haltezeiten von nur einer Stunde. Das Abfallen der Raumtemperatur während der Haltezeit ist durch die Wärmehaftung der Wand zurückzuführen.



Bild C4: Modellmauer aus Kalkstein (Oberdorlaer und Kirchheimer Muschelkalk) mit Befestigungen für induktive Wegaufnehmer zur Erfassung der thermischen Veränderungen am Natursteinmauerwerk ohne Verfugung. (Die Fugen sind offen.)



Bild C5: Modellmauer aus Kalkstein (Oberdorlaer und Kirchheimer Muschelkalk) mit Halterungen und induktiven Wegaufnehmern zur Erfassung der thermischen Veränderungen am Natursteinmauerwerk mit Verfugung.

C3 Ergebnisse der Untersuchungen

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Kurvenverläufe der Messzyklen für die Modellmauern zusammengestellt.

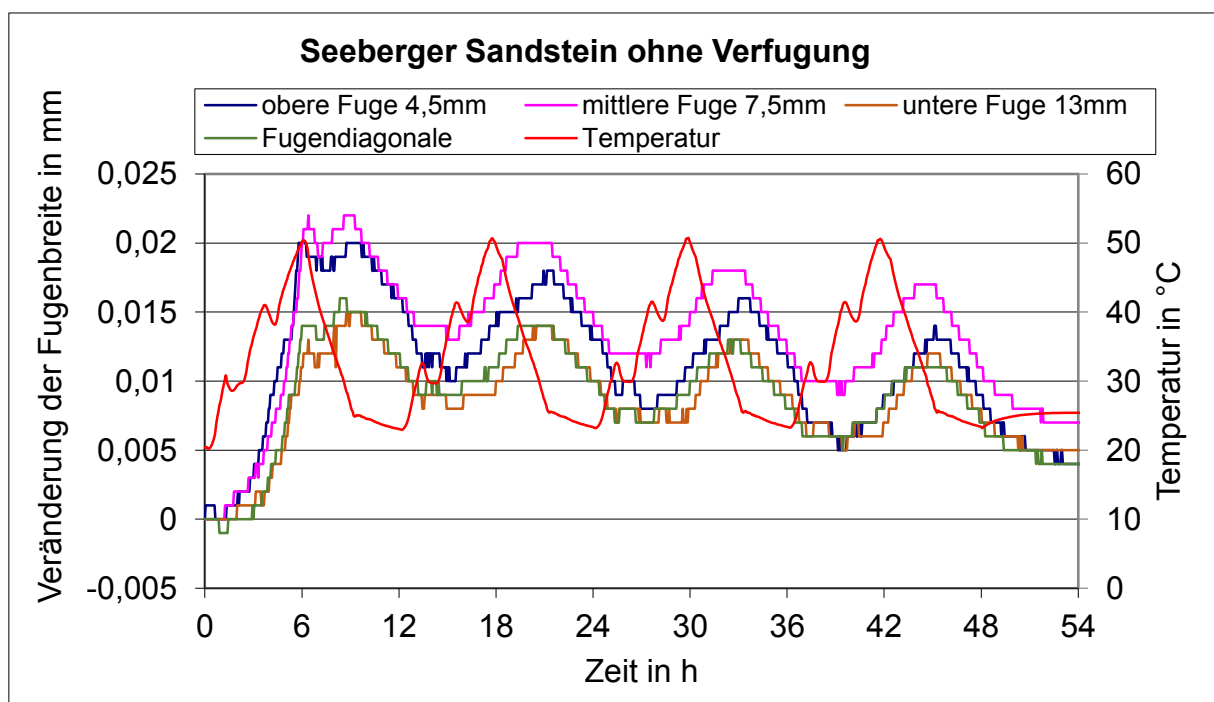


Abb. C2: Veränderung der Fugengeometrie durch thermische Einflüsse

Im Vorfeld der Untersuchungen war davon ausgegangen worden, dass mit Erhöhung der Temperatur die Natursteine sich oberflächennah beginnen auszudehnen. Unter den Bedingungen der offenen Fugen liegt keine Behinderung dieser Ausdehnung durch Festmörtel vor, und eine Verringerung der Fugenbreiten wurde erwartet.

Die Messergebnisse zeigten, dass die Fugen nicht schmaler, sondern breiter wurden. Auch mehrfache Wiederholungen der Messungen führten zum gleichen Ergebnis. Nach Ausführung der Verfugung und Durchführung der Messzyklen stellte sich eine – bezogen auf die offenen Fugen – vergleichbare Situation ein.

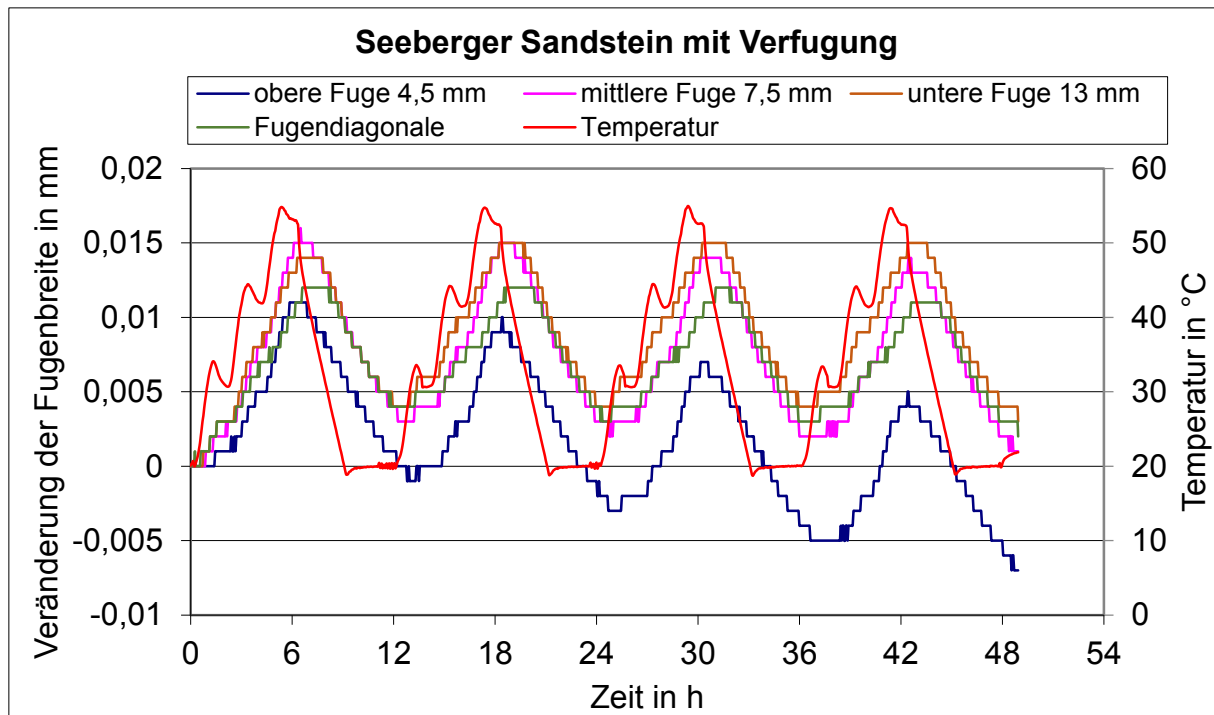


Abb. C3: Veränderung der Fugengeometrie durch thermische Einflüsse

Zur Klärung wurden nach Ende der Messungen die Fugen geöffnet und die Messungen mit offenen Fugen wiederholt. Das in Abbildung C2 dargestellte Ergebnis wurde bestätigt.

Als Ursache konnte eine unzureichende Flankenhaftung der Mauermörtel im Verbund zu den Steinflächen ermittelt werden. Der Mauermörtel, der im Kernbereich des Mauerwerks stark verzögert auf äußere thermische Einflüsse reagiert und bei ausreichender Flankenhaftung zum Stein Volumenänderungen verhindert, dehnte sich oberflächennah durch die thermischen Einflüsse mit aus und es kam insgesamt zu Fugenverbreiterungen.

Vergleichbare Situationen können in der Praxis auftreten, wenn trockene, sehr saugfähige Natursteine neu vermauert werden oder Mörtel sehr geringer Festigkeiten verwendet werden.

Im Gegensatz zum zuvor Beschriebenen stellten sich an der Modellmauer mit Nebraer Sandstein die erwarteten Veränderungen ein. Mit Erhöhung der Raumtemperatur kommt es zur Verringerung der Fugenbreiten am Mauerwerk ohne Verfugmörtel. Nach Verringerung der Temperatur werden die Fugen breiter. (siehe Abbildung C4)

Mit Verfugung (siehe Abbildung C5) sind die Veränderungen am Mauerwerk aus Nebraer Sandstein mit denen des Mauerwerks aus Seeberger Sandstein vergleichbar. Durch die Verfugmörtel wird bei Temperaturerhöhung eine Verringerung der Fugenbreite behindert. Es ist davon auszugehen, dass Verformungen an Stein- und Mörteloberflächen auftreten.

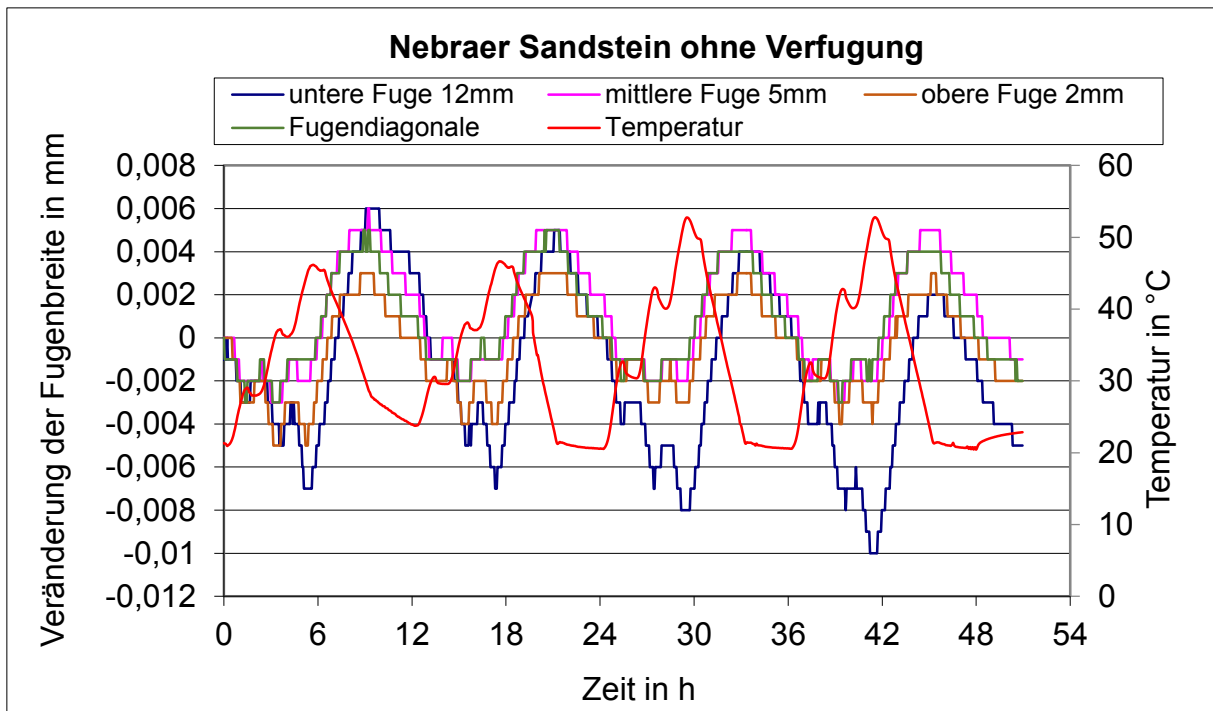


Abb. C4: Veränderung der Fugengeometrie durch thermische Einflüsse

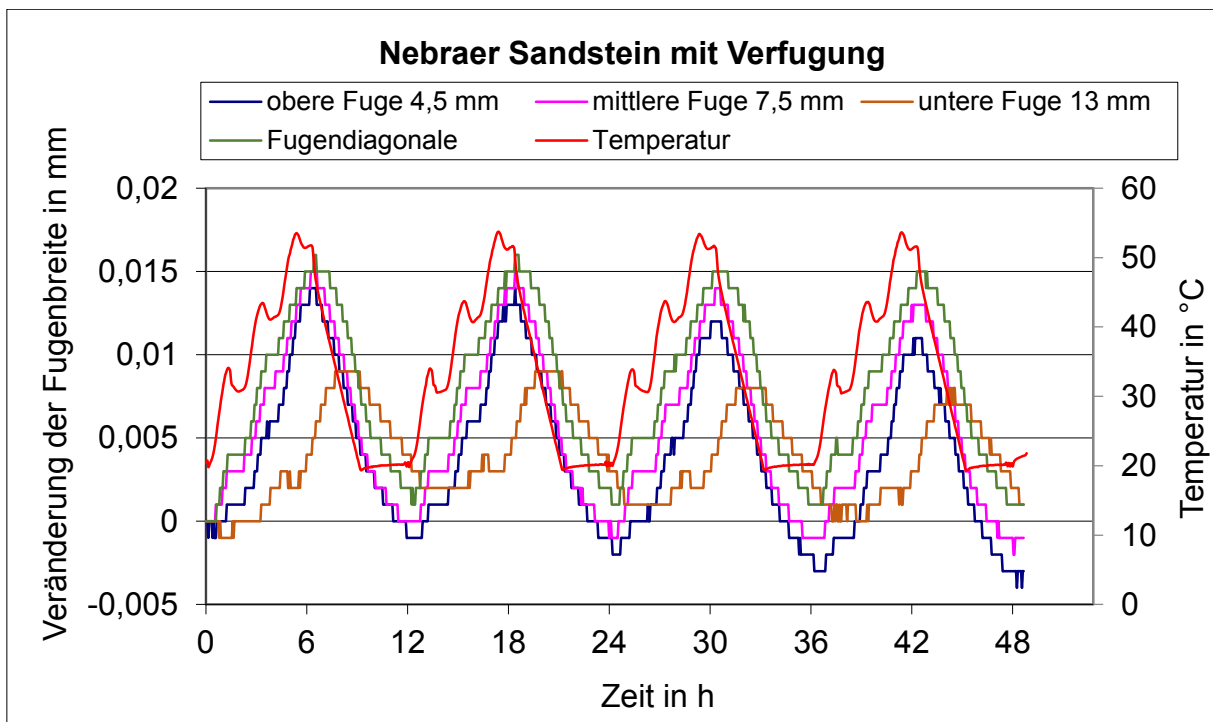


Abb. C5: Veränderung der Fugengeometrie durch thermische Einflüsse

Am Kalksteinmauerwerk ohne Verfugung (siehe Abbildung C6) kommt es mit Erhöhung der Raumtemperatur zur Verringerung der Fugenbreiten. Nach Verringerung der Temperatur werden die Fugen breiter. Besonders deutlich wird der Einfluss an der diagonal angeordneten Messstrecke. (Fugendiagonale)

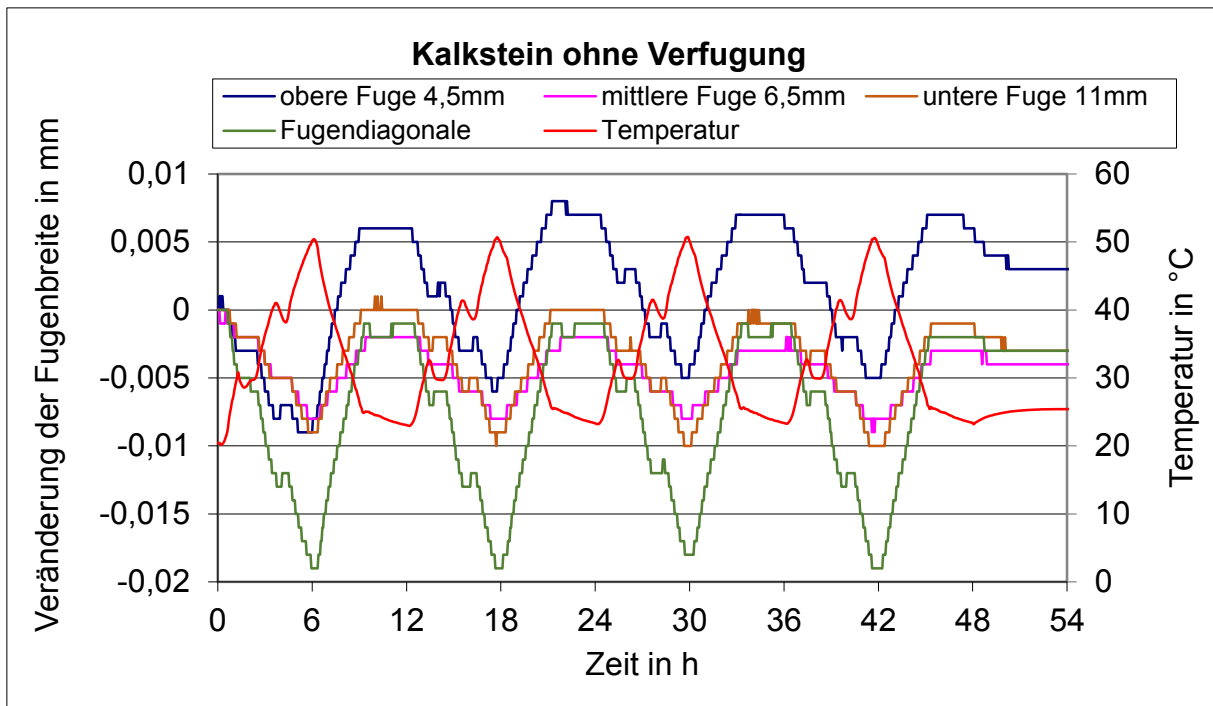


Abb. C6: Veränderung der Fugengeometrie durch thermische Einflüsse

Bei Kalkstein sind geringere Unterschiede bei den Eigenschaften parallel und senkrecht zur Schichtung vorhanden und damit ist ein starker Einfluss der Steingeometrien auf Längenänderungsprozesse zu erwarten. Bei den zuvor diskutierten Modellmauern aus Sandstein sind starke Unterschiede bei den Eigenschaften in Abhängigkeit von der Schichtung der Steine vorhanden. Damit treten in den Diagonalen der Sandsteine nicht zwingend die größten Längenänderungen auf.

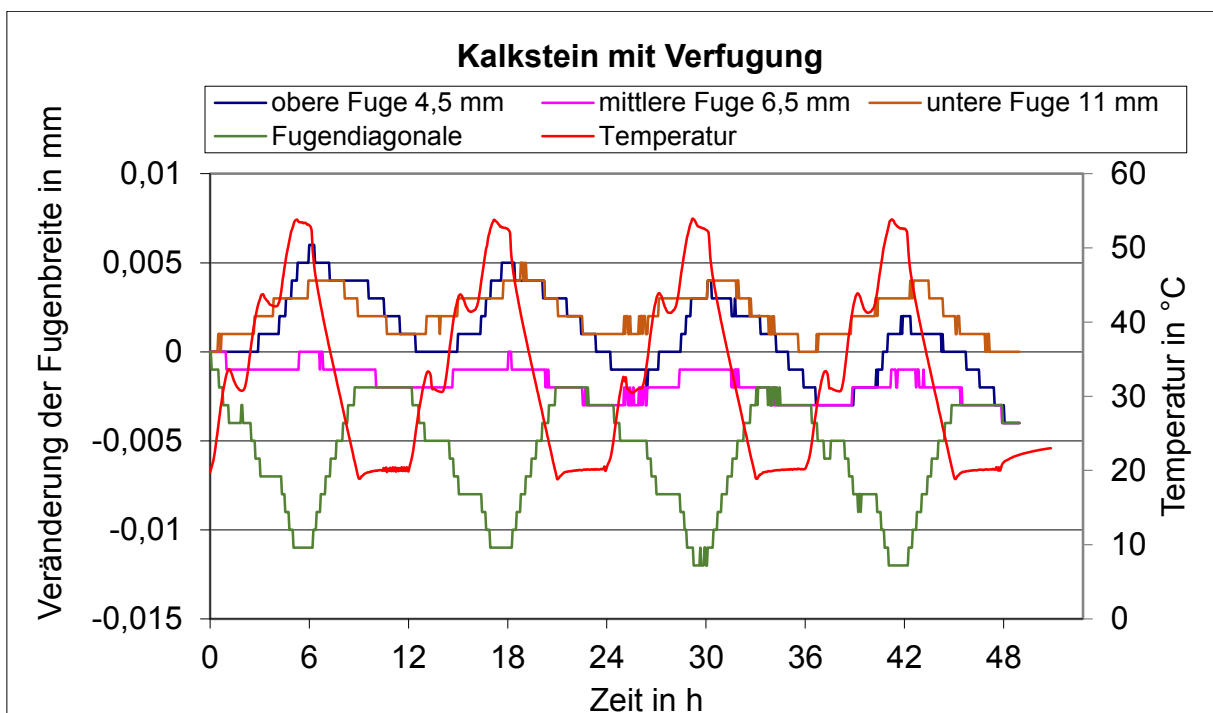


Abb. C7: Veränderung der Fugengeometrie durch thermische Einflüsse

Mit Verfugung sind am Mauerwerk aus Kalkstein kaum Unterschiede zum unverfugten Mauerwerk festzustellen.

Bei der Durchführung der Untersuchungen an den Natursteinmauern wurden folgende Aspekte nicht berücksichtigt:

- Die Natursteinwände wurden im Klimaraum von allen Seiten den Temperaturzyklen ausgesetzt. In der Realität erfolgt die Temperaturerhöhung bzw. -absenkung eher einseitig (außer bei frei stehenden Mauern) und größere Temperaturgradienten im Inneren des Mauerwerkes können auftreten.
- An realen Bauwerken kommt es zu stärkeren Einzwängungen der Steine infolge großer Auflasten durch das Eigengewicht des Mauerwerkes. Diese Auflasten behindern Verformungen des Mauerwerkes und haben auch Auswirkungen auf Veränderungen der Fugengeometrien.

Anlage D1: Schloss Mansfeld

Baugeschichtlicher Abriss:

- 1060: Die erste urkundliche Erwähnung der Grafen von Mansfeld.
 - 1501: In der Folge der Erbteilung der Mansfelder Grafen entstehen die drei Schlösser Vorderort, Mittelort, Hinterort am Standort Mansfeld.
 - 1509: Ein Feuer vernichtet einen großen Teil der romanischen Burganlage.
 - 1517: Bau des neuen Schlosses und Erweiterung und Verstärkung der Befestigungsanlage
 - bis 15492: Wiederaufbau und Erweiterung der Schlossanlage
 - 1618 - 1648: Im Dreißigjährigen Krieg fanden mehrfache Belagerungen statt. Die Festung wurde aber nie eingenommen.
 - 1674: Nach Sprengungen beginnt der Verfall der Schlösser.
 - 1859 – 1861: Unter Freiherr Carl Adolf von der Recke wird das Schloss in seiner heutigen Form fertiggestellt.
 - 1907: Sanierung der Schlosskirche
 - seit 1948 Tagungsort (mit einigen Jahren Unterbrechung)
 - 1999: Ein Förderverein übernimmt die Geschäftsführung und wird Eigentümer von Schloss Mansfeld. Es beginnen umfangreiche Sanierungsmaßnahmen.
- [aus <http://www.schloss-mansfeld.de/geschichte/>]



Bild D1.1: Übersicht mit Kennzeichnung der in Anlage D1 berücksichtigten Gebäude- teile Wohn- haus B, Kir- che und Ru- ine Mittelort.



Bild D1.2: Ansicht Hauptschlusses mit Treppenturm

Bild D1.3: Reste von Mauerwerk alter Bauten im Schlossbereich

Nordwand der Schlosskirche

Naturstein: fast ausschließlich dichtes Carbonatgestein (regionale Vorkommen),
Verfugmörtel: Maxit mur 950 HS GK 2 mm - pigmentiert (Fa. MAXIT Krölpa GmbH & Co. KG) – Verarbeitung im Trockenspritzverfahren

Geometrische Angaben:
Steinlängen: 20 - 55 cm
Steinhöhen: 6 - 10 cm
Fugenbreiten: 1,5 – 2 cm,
vereinzelt bis 5 cm



Bild D1.4: Wandbereich an der Schlosskirche mit Neuverfugung, Feuchteschäden sind im Sockelbereich partiell erkennbar

Bild D1.5: Detail der Neuverfugung im Trockenspritzverfahren aus dem Jahre 2011 nach 3 Jahren Standzeit

Gebäudekomplex Wohnbau B (Westseite)

Naturstein: dichtes Carbonatgestein und vereinzelt Sandstein
Verfugung: Kalkmörtel als Baustellenmischung (temporäre Ausbesserungen)

Geometrische Angaben:
Steinlängen: 8 - 48 cm
Steinhöhen: 5 - 15 cm
Fugenbreiten: 3 – 4 cm,
vereinzelt bis 8 cm



Bilder D1.6 bis D1.8: Teilansicht und Details von Fugenausbesserungen: Die neuen Verfugmörtel sind häufig dünnschichtig über den Altmörtel gezogen worden. Ein Zurückarbeiten der Altmörtel erfolgte scheinbar nicht. Der Ausbesserungsmörtel ist sehr weich und partiell durch Feuchte- und Salzbelastungen aus dem Untergrund geschädigt. Der „neue“ Mörtel ist in Schichtdicken bis 1,5 cm aufgetragen und lässt sich leicht vom Altmörtel ablösen. Die Art der Ausführung ist als „Opferverfugung“ für kürzere Lebensdauern anzusehen.

Ruine Mittelort (Südseite):

Naturstein: überwiegend dichtes Carbonatgestein, vereinzelt braun-rötlicher Sandstein (Siebigeröder Sandstein)

Verfugmörtel: Maxit mur 950 HS GK
2 mm - pigmentiert (Fa. MAXIT Krölpa) - verarbeitet im Trockenspritzverfahren

Geometrische Angaben:

Sandstein:

Steinlängen: 10 - 65 cm

Steinhöhen: 3 - 12 cm

Fugenbreiten: 2 - 10 cm

Carbonatgestein:

Steinlängen: 15 - 35 cm

Steinhöhen: 5 - 20 cm

Fugenbreiten: 2 - 10 cm



Bild D1.9: Wand an der Ruine Mittelort mit Verfugung nach 2 Jahren Standzeit



Bild D1.10: Detail aus Bild D1.9: Die Verfugung ist weitestgehend intakt. Schäden treten an den Fugenflanken des Sandsteins auf. Zu hohe Mörtelfestigkeiten sind die Ursachen.

Bild D1.11: Detail aus Bild D1.9: Schäden an der Neuverfugung durch Abplatzungen und Absandungen an der Oberfläche. Ursachen sind u.a. Belastungen aus dem Mauerwerk oder Frost- und Schlagregen.

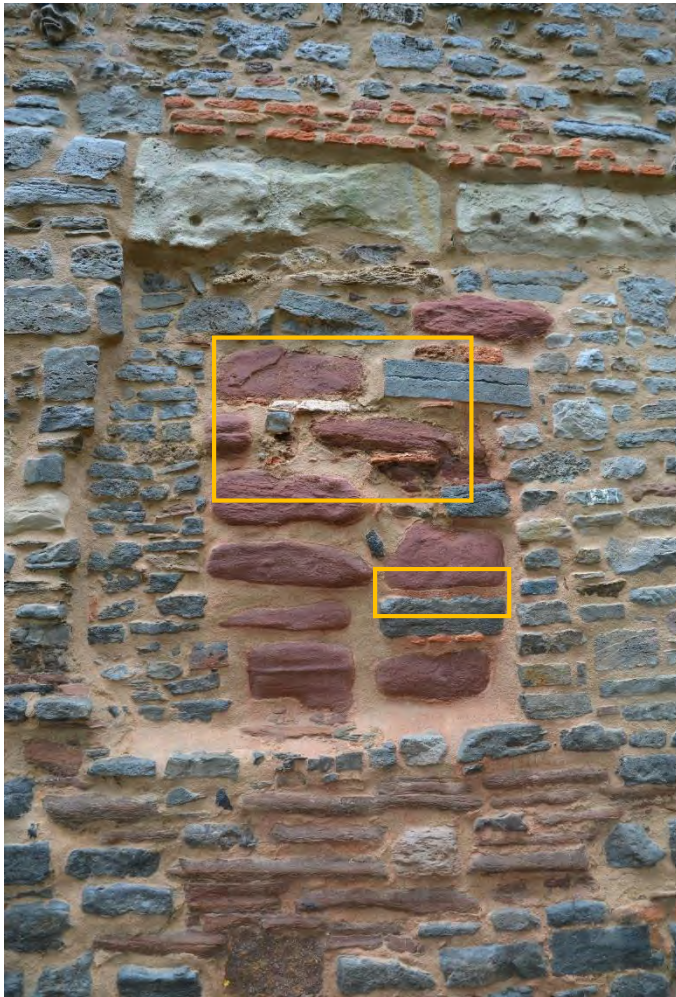


Bild D1.12: Wandfläche der Ruine Mittelort: Im dargestellten Bereich sind sehr unterschiedliche Steinformate, Steinarten und Fugenabmessungen anzutreffen. Das Mauerwerk der Ruine Mittelort besteht hauptsächlich aus dichtem Kalkstein (siehe auch Bild D1.9). Die Kennwerte des im Trockenspritzverfahren applizierten Verfumörtelsystems wurden an die des Kalksteines angepasst (Druckfestigkeit: 12 N/mm²). Die hohen Festigkeiten führten allerdings zu Schäden an den Steinflanken der weicheren Sandsteine (siehe Bilder D1.13 und D1.14).



Bilder D1.13 und D1.14: Details aus Bild D1.12 mit partiellen Abschaltungen des Verfumörtels und sinterartigen Verkrustungen auf den Oberflächen (Bild D1.13). Die Schäden können u.a. durch Belastungen (Feuchte, Salze) aus dem Mauerwerk bedingt sein. Im Bild D1.14 sind die Steinflanken des weichen Sandsteines im direkten Kontakt zum Verfumörtel wegen hoher Festigkeiten des Verfumörtels (Die Festigkeiten wurden auf den Kalkstein abgestimmt.) zurückgewittert.

Anlage D2: Gotha Schloss Friedenstein

Baugeschichtlicher Abriss:



Bild D2.1: Teilansicht des Schlosshofes mit Schlossarkaden
[aus http://de.wikipedia.org/wiki/Schloss_Friedenstein]

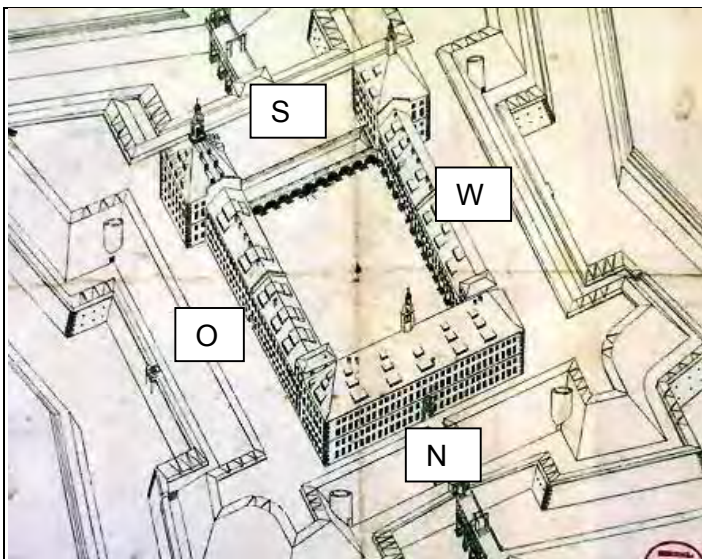


Bild D2.2: Plan der Festung von 1667 mit Kennzeichnung der Himmelsrichtungen
[aus <http://www.dickemauern.de/friedenstein/gr.htm>]

- 1643 bis 1654: Schloss Friedenstein wird unter Ernst I. (1601 – 1675), Herzog von Sachsen-Gotha-Altenburg erbaut. Es ist eines der am besten erhaltenen Baudenkmäler des Frühbarocks.
 - 1618 – 1648: Noch während des (Dreißigjährigen Krieges) wurde das Schloss auf den Ruinen der Burg Grimmenstein als Vierflügelanlage erbaut und erhielt den Namen „Friedenstein“.
 - Im Norden der Anlage befindet sich der 4-geschossige Hauptflügel mit den ehemals herzoglichen Appartements und der Schlosskirche.
 - Westlich und östlich schließen sich zwei 3-geschossige Seitenflügel an.
 - Im Süden befinden sich zwei Pavillonbauten.
- [aus <http://www.stiftungfriedenstein.de/>].

Arkaden - Probepfeiler

Naturstein: Lettenkohlsandstein (Pfeiler und Bögen) und Rätsandstein (Sockel und Gesims)
– in Gotha und Umgebung anstehend

Verfugmörtel: Sonderrezepturen als Auffüllmörtel und Verfugmörtelsystem „GOFR“ mit Druckfestigkeiten von 1,7 und 2,4 N/mm²

[entwickelt im Rahmen des DBU-Projektes AZ 22296-25]

Geometrische Angaben:

Steinlängen: 30 - 100 cm;
vorwiegend 65 cm

Steinhöhen: 26 - 28 cm

Fugenbreiten: 1 - 4 cm

Vorzustand des Probepfeilers



Bild D2.3: Vorzustand des Probepfeilers: Der Pfeiler wies Schäden an den Natursteinen, der Verfugung sowie statisch-konstruktive Schädigungen im Kern des Pfeilermauerwerkes auf. Die Schadensursachen stehen u.a. im Zusammenhang mit der Exposition (freistehende Pfeiler), des nicht mehr vorhandenen Witterungsschutzes auf den Natursteinoberflächen (Anstrich), der desolaten umlaufenden Hofentwässerung sowie dem Feuchteintrag in den Pfeilerfuß und Salzbelastungen (Streusalz, Fäkalin).

Die Fugenbreiten und die Ausführung der Verfugung sind sehr variabel. Die Fugen waren teils vergossen, teils stark gezwickelt mit Ziegel, Schiefer oder Kalkstein. Als Bindemittel im Mörtel dienten hauptsächlich Kalk, partiell auch Gips. Die Natursteine (Rätsandsteine) des Sockels und des Gesimses waren farbig gefasst.

Randbedingungen für das Anlegen von Musterachsen

Nach den Ergebnissen von Voruntersuchungen mussten für die Materialentwicklungen und –anpassungen der Mörtel für die Neuverfugungen folgende Randbedingungen berücksichtigt werden:

- Mörteln mit ausschließlich carbonatisch erhärtenden Bindemitteln (Luftkalk, Sumpfkalk, CL 90) durften wegen hoher Nitratbelastungen nicht eingesetzt werden.
- Dichte Mörtel mit hydraulischen Bindemitteln (Zement, hydraulischer Kalk) sind nicht einsetzbar. Sie behindern Trocknungsprozesse und es kann zu Anreicherungen löslicher bauschädlicher Salze kommen.
- Die mechanischen und hygrischen Eigenschaften der Mörtel müssen an die der verbauten Steinmaterialien angepasst sein.
- Gipsanteile in den Oberflächenbereichen der Steine schließen hydraulische Bindemittel in Steinerfüllmörteln und Beschichtungssystemen aus.
- Neben stofflichen Abstimmungen sind Anpassungen an die Struktur und Farbigkeit unter denkmalpflegerischen Aspekten erforderlich.

[Die Voruntersuchungen erfolgten im Rahmen des DBU-Projektes AZ 22296-25]

Pfeiler - Musterachse



Bild D2.4: Musterachse mit Steiner-gänzungsmörteln, Schlämmen, Neuverfugungen und Steinersatzmaterial. Neben den zuvor genannten Randbedingungen mussten vor allem die thermisch-hygrischen Eigenschaften des Lettenkohlsandsteines (Farbigkeit, Tonmineralien) berücksichtigt werden. Der weiße Mörtel für die Neuverfugung wurde stofflich auf den Bestand angepasst und exemplarisch ocker eingefärbt (ästhetischer Eindruck). Der Steiner-gänzungsmörtel und die Schlämme wurden ebenfalls an die relevanten Steinkennwerte angepasst.

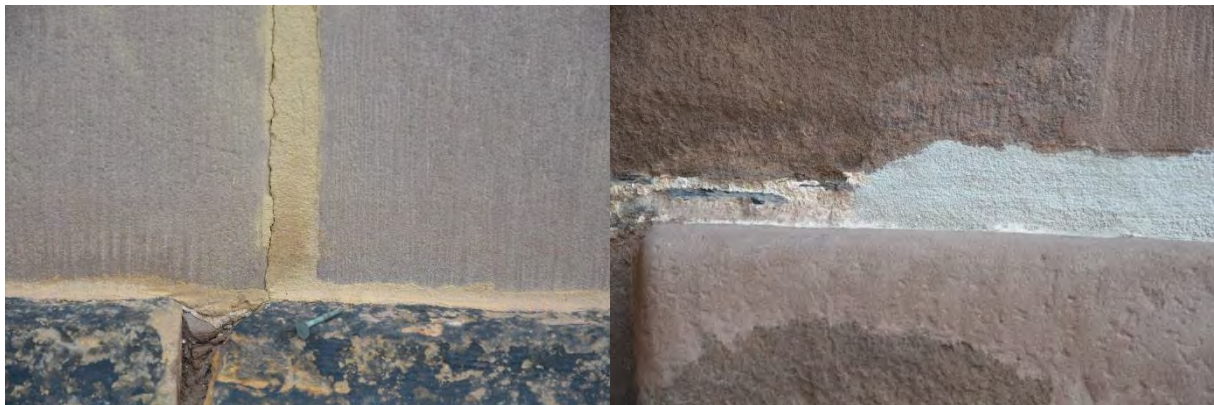


Bild D2.5: Detail 1 aus Bild D2.4: Neuverfugung, die stofflich und optisch an den Bestand angepasst wurde, im Kontakt mit Steinersatzmaterial und Rätsandstein des Pfeilersockels. Der vertikale Riss ist auf statisch-konstruktiven Veränderungen innerhalb des Pfeilermauerwerkes zurückzuführen.

Bild D2.6: Detail 2 Bild D2.4: Südseitewestliche Ausrichtung der Oberfläche: Die Neuverfugung schließt an die intakte Bestandsverfugung (Kalkmörtel) mit den Auszwickungen aus Schiefer an. Die Steinflanken wurden mit acrylatgebundenen Steiner-gänzungsmörteln ergänzt.



Bilder D2.7 und D2.8: Details 3 und 4 aus Bild D2.4: Neuverfugung im Kontakt mit dem vorhandenen Lettenkohlend Sandstein, dem Steinerfüllungsmörtelsystem (SES) und zusätzlich geschlammten Oberflächen. Durch den Auftrag der Schlämme wurden die angewitterten Steinoberflächen egalisiert. Eine Verbesserung des Verhaltens bei Bewitterung – Verringerung der kapillaren Wasseraufnahme und somit der Feuchtequellung – wurde erreicht. Die Reversibilität der Maßnahmen wurde durch Verwendung von Acrylatdispersion als Bindemittel (SES und Schlämme) und von Verfugmörteln niedriger Festigkeit gewährleistet. Der vertikale Riss in der Verfugung steht im Zusammenhang mit statisch-konstruktiven Veränderungen innerhalb des Pfeilermauerwerkes.

Anlage D3: Worms Dom St. Peter

Baugeschichtlicher Abriss:



Bild D3.1: Dom St. Peter, Ansicht von Westen:

„Der Dom St. Peter gehört gemeinsam mit den Domen in Mainz und Speyer zu den großartigsten Schöpfungen romanischer Kirchenbaukunst. Die Ursprünge des Wormser Domes reichen in die frühchristliche Epoche spätrömischer Zeit zurück.“

[aus <http://www.worms.de/de/tourismus/sehenswertes/listen/kaiserdom-St.-Peter.php>]

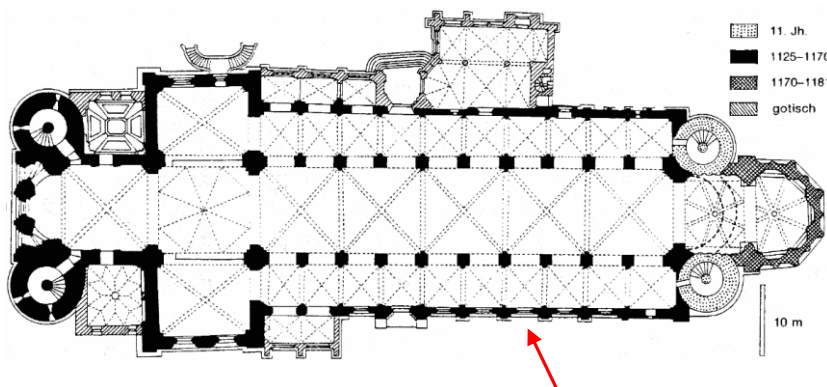


Bild D3.2: Grundriss mit Kennzeichnung der Lage der Probeachse (roter Pfeil) auf der Nordseite [aus <http://www.kirchbau.de/>]

Der Dom St. Peter zu Worms ist romanischen Ursprungs mit dreischiffigem Langhaus im gebundenen System mit einer doppelchörigen Anlage, 2 Kuppeln über Vierung und im westlichen Zentralturm mit 6 Türmen.

- 1125/30 – 1230: Errichtung der Westteile des Doms St. Peter
- um 1160: Entstehung des Langhauses
- bis 1181: Fertigstellung des Westchores
- nach 1689: Entstehung des barocken Hochaltars

[aus <http://www.worms.de/de/tourismus/sehenswertes/listen/kaiserdom-St.-Peter.php>]

Westlicher Teil der Nordfassade (Probeachse)

Naturstein: Pfälzer Sandstein

Verfugmörtel: Mörtelsysteme auf unterschiedlicher Bindemittelbasis und mit unterschiedlichen Ausführungen

Geometrische Angaben:

Steinlängen: 40 - 115 cm

Steinhöhen: 20 - 51 cm

Fugenbreiten: < 2 - 10 mm

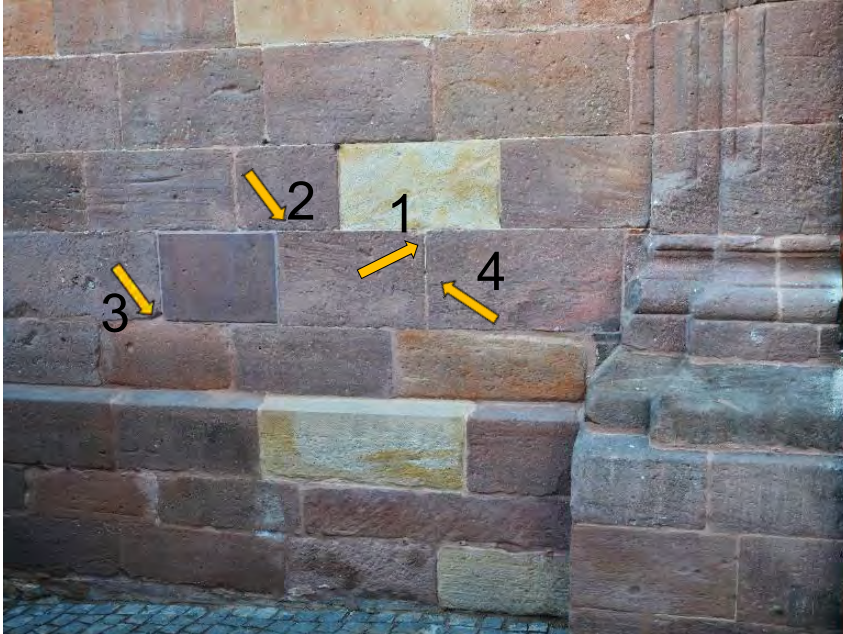


Bild D3.3: Teilansicht der Wandflächen des westlichen Teils der Nordfassade: Es wurden verschieden ausgeführte Verfugmörtelsysteme (Ziffern 1-4) im Bestand vorgefunden. Detaillierte Angaben sind den nachfolgenden Bildern zu entnehmen.

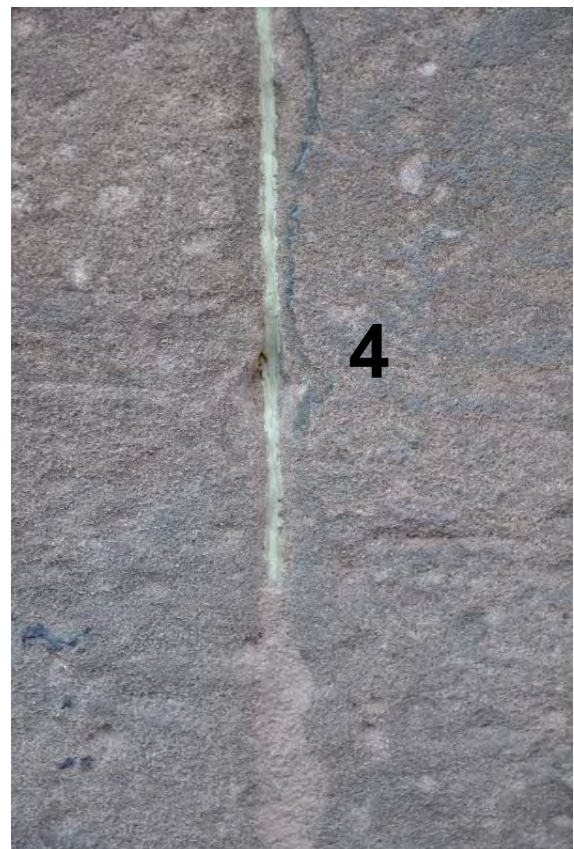
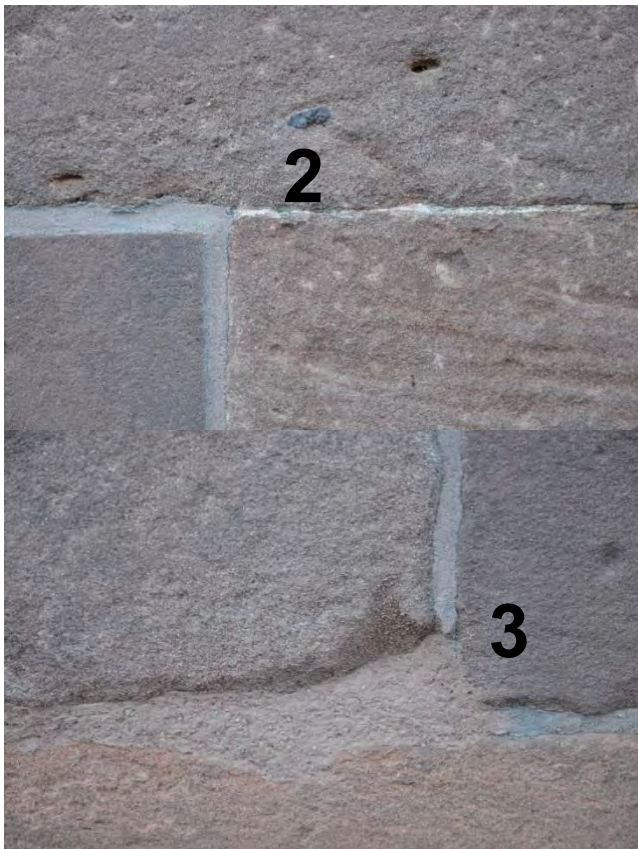
Für die Entwicklung und Anpassung von Verfugmörteln für Fugenbreiten zwischen < 2 mm und bis 4 mm ergaben sich folgende Anforderungen und Randbedingungen:

- Ein sehr feinkörniger Mörtel ist zur tiefen Applikation in sehr schmalen Fugen erforderlich.
- Ein spritzfähiger Mörtel (Zusätze von Verflüssigern), der mit einer engen Kanüle (2 mm) tief in das Mauerwerk appliziert werden kann, ohne aus der Fuge herauszulaufer, wurde benötigt.
- Eine Abstimmung der Bindemittel und Füllstoffe in den Mörteln war zum Erreichen thixotroper Eigenschaften während der Applikation erforderlich.
- Der Mörtel muss eine ausreichend schnelle Festigkeitsentwicklung besitzen und musste auf den Stein abgestimmt sein.
- Eine gute Flankenhaftung des Mörtels am Stein (Zusätze zur Verbesserung der Wasserrückhaltung und der Flankenhaftung) war erforderlich.
- Zusätze zur Erzeugung eines erhöhten Anteils an Kugelporen im Mörtel, in die Salze (bei vorliegenden partiellen Salzbelastungen im Mauerwerk) eingelagert werden können, waren auszuwählen und die Mengen zu optimieren.
- Durch Zusätze zur Erzielung „wasserhemmender“ Eigenschaften musste eine ausreichende Witterungsbeständigkeit eingestellt werden.

Das den genannten Anforderungen entsprechende Mörtelsystem „WORMS D1“ wurde an einer Probeachse (Bilder D3.4 bis D3.9) appliziert. Anpassungen zur Farbigkeit und Einstellungen der endgültigen Eigenschaften sollten nach der Erprobung am Objekt erfolgen. Für die weitere Entwicklung des Systems sind konkrete Angaben zu den Steineigenschaften erforderlich.



Bilder D3.4 und D3.5: Die Fugen zwischen den großformatigen Sandsteinen wurden bauzeitlich sehr schmal ausgeführt. Die Neuverfugung (Sonderrezeptur „WORMS D1“), links neben der Ziffer „1“, wurde an den Altbestand angepasst und für eine 2 mm Kanüle spritzfähig eingestellt. Breitere Ausbrüche an den Steinflanken wurden mit anderen Mörtelsystemen auf mineralischer Basis geschlossen.



Bilder D3.6 bis D3.8: Frühere Ausbesserungs- und Reparaturphasen blieben weitestgehend erhalten. Es wurden lediglich Fehlstellen und stark geschädigte Verfugungen erneuert. Die helle schmale Verfugung („2“) ist Altbestand. Im Bild D3.8 („4“) ist die auf den Altbestand angepasste Neuverfugung „WORMS D1“ als Fugenverschluss zum Einsatz gekommen. Frühere bereits vorhandene und intakte Ausbesserungsmörtel blieben erhalten. Partiiell erfolgte bei früheren Sanierungen ein Steinaustausch („3“). Bei der Neuverfugung zum angrenzenden Altbestand wurde scheinbar bewusst auf eine Anpassung von Fugenbreiten, -farbe und Oberflächenstruktur verzichtet.

Anlage D4: Kyffhäuser-Denkmal

Baugeschichtlicher Abriss:

- eines der größten und bekanntesten Kaiser-Wilhelm-Denkmalen,
 - errichtet von 1890 bis 1896 zu Ehren Kaiser Wilhelms I. nach Plänen des Architekten Bruno Schmitz,
 - eingeweiht am 8. Juni 1896,
 - Gesamthöhe ca. 81 m,
 - in der Wandfläche im Sockelbereich befindet sich die Barbarossafigur (Friedrich I.), ca. 6,5 m hoch, darüber das ca. 11 m hohe Reiterstandbild Wilhelms I.,
 - der Turm mit Kuppel und Kaiserkrone ist ca. 57 m hoch
- [<http://www.wikipedia.org/wiki/Kyffhaeuserdenkmal>,
<http://www.kyffhaeuser-tourismus.de>]



Bild D4.1: Nordseite des Denkmals mit Reiterstandbild, Kuppel und Kaiserkrone
[<http://www.wikipedia.org/wiki/Kyffhaeuserdenkmal>]



Bild D4.2: Wandfläche im Sockelbereich der Nordseite mit Barbarossafigur
[<http://www.wikipedia.org/wiki/Kyffhaeuserdenkmal>]

Naturstein:

rotbraune und graue Sandsteine und Konglomerat - Kyffhäuser Sandstein aus regionalen Vorkommen

Verfugmörtel:

KYF1-MAX GK 1 mm - pigmentiert
(Fa. MAXIT Krölp GmbH & Co. KG)

Geometrische Angaben:

Grob strukturierte Steinquader mit tief zurückliegenden Fugen (im Bezug zu den mittleren Steinoberflächen)

Steinlängen: 50 - 150 cm

Steinhöhen: 30 - 50 cm

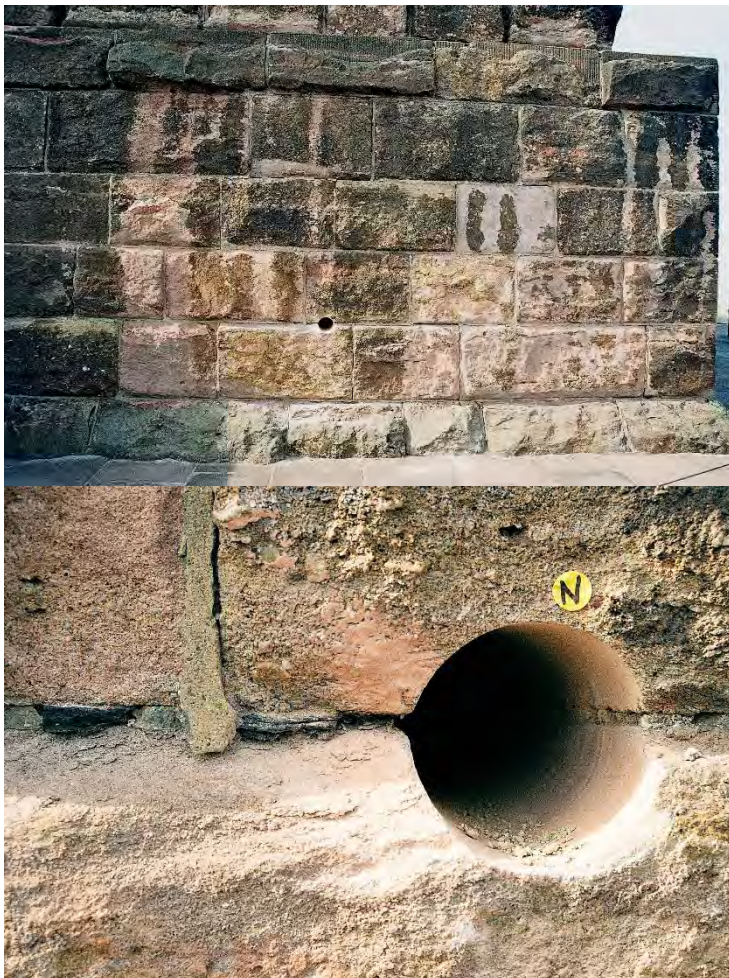
Fugenbreiten: < 2 - 50 mm

Vorzustand des Mauerwerkes

Der sich nach oben verjüngende Querschnitt des Denkmals bietet Angriffsflächen für in das Mauerwerk eindringende Wässer. Durch die Schrägstellung werden die Abaufgeschwindigkeiten von Niederschlägen an den Oberflächen verlangsamt, die Anwitterung wird verstärkt und nach Vorschädigung kann Wasser massiv über offene Fugen in das Innere des Bauwerks eindringen.

An Stellen, an denen die Vertikalfugen auf Horizontalfugen treffen sind in die Horizontalfugen Bitumen- oder Teerpappenstreifen eingelegt. Diese sollten vermutlich das Eindringen der ablaufenden Niederschlagswässer in das Mauerwerk verhindern oder reduzieren. Im Mauerwerk herrschten hohe Feuchtebelastungen, die tendenziell in den Proben aus der Westexposition höher sind als in den Proben aus den Nord- und Südexpositionen.

An den Oberflächen kommt es zu Anreicherungen von bauschädlichen Salzen heterogener Zusammensetzung (sulfat-, chlorid- und nitrathaltige Salze).



Bilder D4.3 und D4.5:

Wandfläche Sockel Nordseite –
Ecke Westseite:

Direkt an der Oberfläche sind die Fugen sehr schmal ausgebildet. An den Stellen, an denen die Vertikalfugen auf die Horizontalfugen stoßen, sind Teer- oder Bitumenpappenstreifen eingelegt.

Randbedingungen für die Neuverfugung

Durch eine große Variation bei den Fugenbreiten wurden die nachfolgenden Randbedingungen für die Auswahl oder die Anpassung von Mörteln festgelegt.

- Bindemittel: hoher Sulfatwiderstand, trassfrei, keine Dolomitzalke, keine natürlich hydraulischen Kalke,
- Gesteinskörnungen: Festlegung von Sieblinien und Größtkorn in Abhängigkeit von den vorhandenen Fugenbreiten (Voraussetzung ist eine Fugenbreitenkartierung),
- Mörtelzusätze: Es müssen Zusätze zur Verbesserung der Witterungsbeständigkeit (mindestens wasserhemmend) berücksichtigt werden und solche zur Verbesserung von Flankenhaftungen und Diffusionsfähigkeit (Porenbildner und / oder Dispersio- nen).



Bilder D4.6 und D4.7: Wandflächen auf der Nordseite mit Neuverfugung: Im Bild D4.6 ist ein Detail der Verfugung breiter Fugen abgebildet.

Bild D4.7: Schmale Fugen im Kontakt mit Natursteinquadern und Vierung vor der endgültigen Anpassung an den Bestand. Die Fugen sind zurückliegend ausgebildet.

[Bildquelle: Ingenieurbüro Romstedt, Gehring u. Werner, Kirchheim]

Anlage D5: Wartburg bei Eisenach



Bild D5.1: Ansicht der Wartburg von Osten mit typischen verputzten Natursteinsichtigen Oberflächen an den Gebäuden im mittleren Teil der Burg, die Mitte des 19. Jahrhunderts entstanden sind

[Bild aus <http://de.wikipedia.org/wiki/Wartburg>]

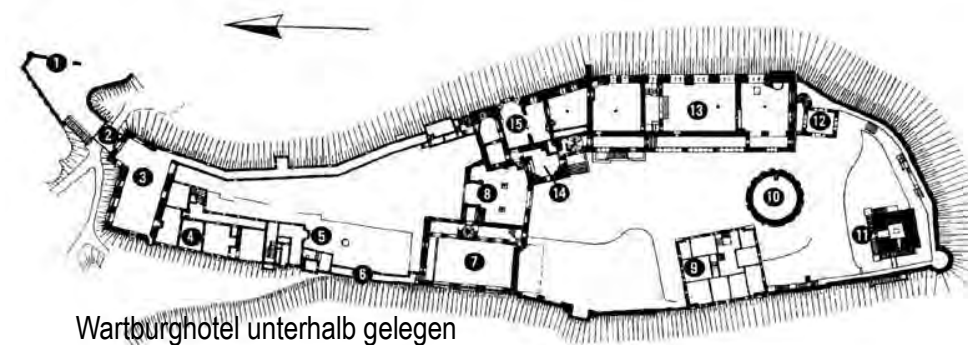


Bild D5.2: Grundriss der Wartburg (ohne Wartburghotel)

[aus <http://www.dickemauern.de/wartburg/plan.htm>]

1 "Schanze"	5 Vogtei	9 Gadem	13 Palas
2 Zugbrücke	6 westl. Wehrgang	10 Zisterne	14 Bergfried
3 Torhaus	7 Dirnitz	11 Südturm	15 Neue Kemenate
4 Ritterhaus	8 Torhalle	12 Ritterbad	16 östl. Wehrgang

Baugeschichte:

„Der heutige Zugang durch eine dreitorige Halle führt in die schmale Vorburg, die rechterhand von Margarethengang, Vogtei und Ritterhaus, links vom Elisabethengang gesäumt wird. Fachwerkbauten und die der alten Ringmauer aufgesetzten Wehrgänge entstammen großenteils dem 14. und 15. Jahrhundert. Der mittlere Gebäudekomplex aus Neuer Kemenate, Torhalle und Dirnitz entstand in den 50er und 60er Jahren des 19. Jahrhunderts im historisierenden Stil und trennt Vor- und Hofburg. Etwa gleichaltrig ist der alles überragende Bergfried mit dem Kreuz, dem Zeichen für die religiöse Bedeutung der Burg. Wie alle jüngeren Bauwerke steht auch er über den Fundamenten einstiger Vorgänger. Die eigentliche Hofburg bietet dem Auge Spätromanik vom Feinsten. Der Palas wurde etwa zwischen 1157 und 1170 als Repräsentativ- und Wohnbau der Landgrafen errichtet. Dimensionen, gestalterische Klarheit sowie seine reiche Bauzier verweisen ihn in die ebenbürtige Nachbarschaft stauferzeitlicher Pfalzen und sicherten ihm unter den diesseits der Alpen noch erhaltenen Profanbauten des 12. Jahrhunderts eine Spitzenstellung. An die einstige Ringbebauung erinnern heute nur noch das historisierende Ritterbad von 1889/90, das sich südlich an den Palas anschließt, und das sogenannte Gadem (Gästehaus), das um 1810 neu aufgeführt wurde. Der Süd- oder Pulverturm, in dem sich das Verlies befindet, dürfte dem 14. Jahrhundert angehören. Er belohnt seinen "Eroberer" mit einer herrlichen Aussicht über Thüringens Berglandschaft.“ [aus <http://www.wartburg-eisenach.de>]

Wartburghotel (Innenhof und Giebel)

Naturstein: Wartburgkonglomerat (regionales Vorkommen),
Verfugmörtel: Sonderrezeptur System „WART MAX 1“ (Fa. MAXIT Krölpa GmbH & Co. KG) mit Pigmentierung auf Basis des Altbestandes

Geometrische Angaben:
Steinlängen: 10 - 40 cm
Steinhöhen: 10 - 35 cm
Fugenbreiten: 2 - 6 cm,
überwiegend 3 cm



Bild D5.3: Teilansicht des Innenhofs: Die Wandflächen wurden komplett neu verputzt.



Bild D5.4: Detail einer neu verputzten Wandfläche ohne sichtbare Schädigung der Verfugung nach drei Jahren Standzeit



Bild D5.5: Wartburghotel - Giebelansicht Süd: Die Wandflächen wurden 2011 komplett neu verputzt.



Bild D5.6: Detail aus Bild D5.5: Neu verputzte Wandflächen ohne Schädigung der Verfugung nach drei Jahren Standzeit.

Stützmauer Wartburgzufahrt Nordseite - oberer Bereich

Naturstein: vorwiegend rotbrauner dichter Sandstein, regelmäßige Steinformate

Verfugmörtel: Trass-Kalk-Mörtel

Geometrische Angaben:

Steinlängen: 20 - 40 cm

Steinhöhen: 10 - 20 cm

Fugenbreiten: 1 - 5 cm,
überwiegend 2 - 3 cm



Bild D5.7: Teil der Wandfläche einer Stützmauer der Zufahrt zur Wartburg: Die Mauer ist auf Grund von anstehendem Erdreiche hinterfeuchtet. Zusätzlich dringen auf der Fahrbahn ablaufende Wässer seitlich ein. Neben Ablaufspuren sind Salzausblühungen und Verschwärzungen der Steinoberflächen sichtbar.



Bilder D5.8 und D5.9: Details aus Bild D5.7: Salzausblühungen, Krusten an den Steinoberflächen, Abwitterungen der Steinoberflächen, Absanden, Abschalungen und Ausbrüche am Verfugmörtel haben ihre Ursachen in der Hinterfeuchtung des Mauerabschnittes. Der Verfugmörtel (Trass-Kalk-Mörtel) versagte bei der Feuchte- und Salzbelastung schon nach wenigen Jahren Standzeit. Es kommt zu den bereits oben genannten typischen Schadbildern (Pfeil).



Palas Westfassade

Naturstein: Rätsandstein, vereinzelt Wartburgkonglomerat und Carbonatgestein

Verfugmörtel: Sonderrezepturen als Kalk-Zement-Mörtel, Größtkorn GK 1 mm als Baustellenmischung

Geometrische Angaben:

Steinlängen: 20 - 80 cm

Steinhöhen: 5 - 45 cm

Fugenbreiten: 1 - 3 cm,

überwiegend 1 cm



Bild D5.10: Teilansicht von Wandflächen der Westfassade des Palas aus der Sanierungsphase 1995-1996: Die Sonderrezeptur enthält natürlich hydraulischen Kalk und Zusätze von HS-Zement als Bindemittel und feine Quarzsande als Gesteinskörnung.



Bild D5.11 und D5.12: Detail aus Bild D5.10: Vorwiegend intakte Reparaturmaßnahme aus dem Jahr 1996 nach 18 Jahren Standzeit (Baustellenmischung). Partiiell sind Auswaschungen an den Vertikalfugen im Anschlussbereich von Rätsandstein und Altmörtel an den Fugenflanken vorzufinden.



Spezielle, auf den Rätsandstein angepasste Steinerfüllungsmörtel mit Acrylat als alleinigem Bindemittel (Pfeil) sind an ausgebrochenen Fugenflanken und Fehlstellen am Stein angetragen worden.

Die Sonderrezeptur wurde sowohl an den Rätsandstein als auch an den Steinerfüllungsmörtel angepasst.

Südliche Wehrmauer

Naturstein: Wartburgkonglomerat, vereinzelt Rätsandstein

Verfugmörtel: Wandflächen: System „WART-MAX3G“ (Fa. MAXIT Krölpa GmbH & Co. KG); begehbare Wehrgangsbereiche: spezielle Modifizierung der Mörtel und Ausbildung einer Abdichtungsebene

Geometrische Angaben:

Steinlängen: 10 - 60 cm

Steinhöhen: 6 - 40 cm

Fugenbreiten: 1 - 8 cm, überwiegend 3 - 5 cm



Bild D5.13: Teilansicht der Wandflächen der Nordseite der südlichen Wehrmauer mittlerer Bereich: Die Verfugung wurde ausgehend von den Fugen leicht auf den auf den Stein gezogen.



Bild D5.14: Detail der Mauerkronenausbildung: Verfugung der Mauerkrone:

- Tiefenverfugung bis 2 cm unter Oberfläche Stein,
- Ausbildung einer Abdichtungsebene mit einer zementgefüllten Bitumen-Acrylat-Emulsion,
- abschließende Verfugung bis Oberkante Stein mit einem Mörtel, der wasserabweisend ausgerüstet ist – Ausführung 2012 – hier nach 2 Jahren Standzeit

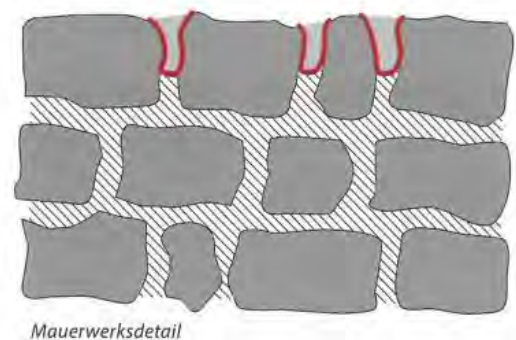


Bild D5.15: Schemenhafte Darstellung der Abdichtung mit Kennzeichnung der Abdichtungsebene [Bildvorlage: WEBAC aktuell 04/2013]

Westseite des Bergfrieds und Strebepfeiler im südlichen Teil der westlichen Wehrmauer

Naturstein: Wandfläche aus Wartburgkonglomerat, Eckquaderungen aus Rätsandstein

Verfugmörtel:

System „WART-MAX1“
(Fa. MAXIT Krölpa GmbH & Co. KG)

Geometrische Angaben:

Steinlängen: 30 - 80 cm
Steinhöhen: 25 - 40 cm
Fugenbreiten: 2 - 5 cm,
überwiegend 2 - 3 cm

Naturstein: Rätsandstein, vereinzelt Wartburgkonglomerat, Kalkstein, roter Sandstein

Verfugmörtel:

System „WART-MAX 3G“
(Fa. MAXIT Krölpa)

Geometrische Angaben:

Steinlängen: 30 - 80 cm
Steinhöhen: 20 - 40 cm
Fugenbreiten: 2 - 6 cm,
überwiegend 2 - 4 cm

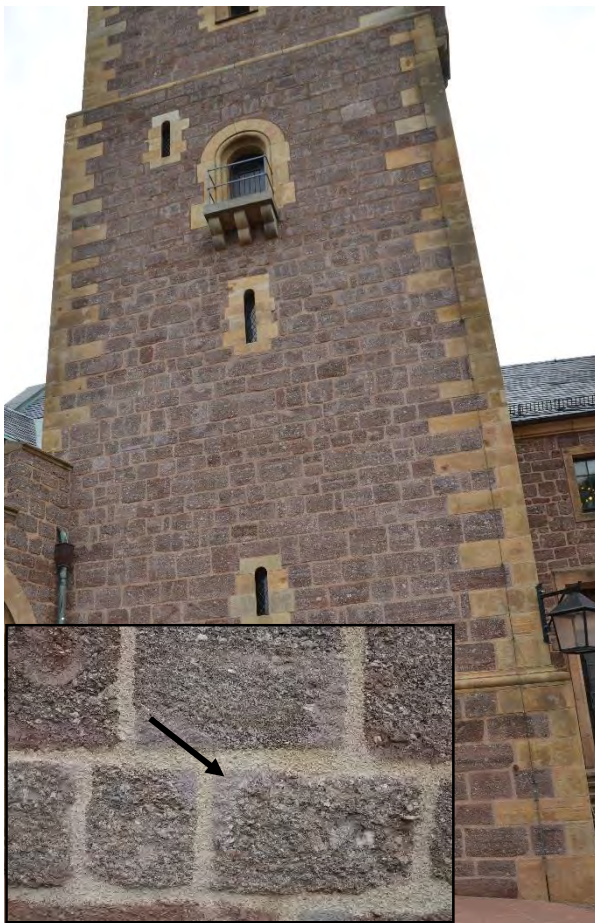


Bild D4.16: Teilansicht der Wandflächen der Westseite des Bergfrieds, mit Neuverfugung aus den Jahren 2008-2009 nach etwa 5 Jahren Standzeit: Fehlstellen am Wartburgkonglomerat wurden vor der Neuverfugung mit auf den Stein angepasstem Steinerfüllmörtel geschlossen (Pfeil).

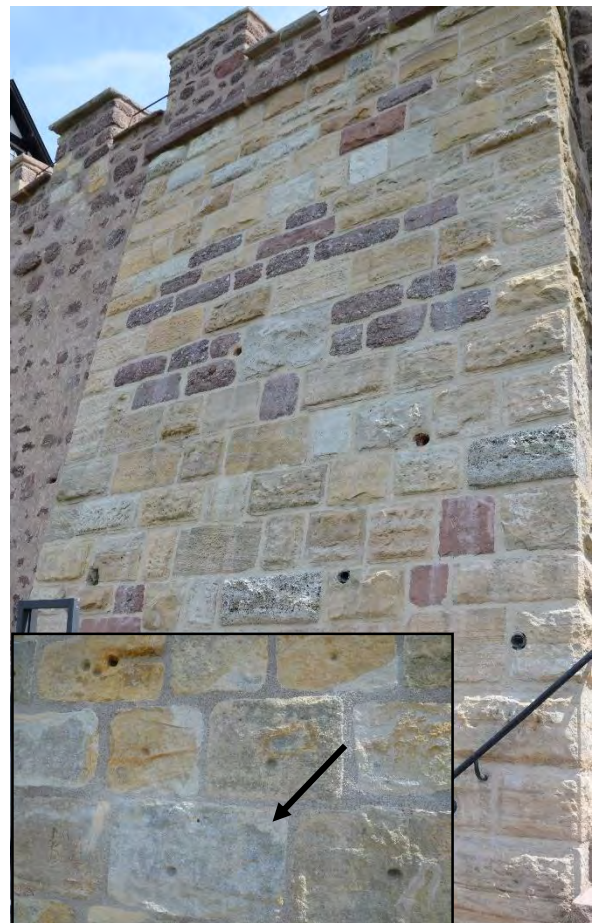


Bild D4.17: Teilansicht eines Strebepfeilers mit Neuverfugung (2010-2012) nach etwa 2 Jahren Standzeit: Fehlstellen am Naturstein wurden mit auf das Steinmaterial angepasstem Steinerfüllmörtel geschlossen (Pfeil).

Anlage D6: Verschiedene Objekte

Natursteinbrücke in Weimar OT Tiefurt

Naturstein: Kalkstein, Travertin, Plattenkalk

Verfugmörtel: Neuverfugung mit Fugenmörtel Rajasil FM HS-NA 03 der Fa. HECK Wall Systems GmbH & Co. KG

Geometrische Angaben:

Steinlängen: 20 - 60 cm

Steinhöhen: 5 - 30 cm

Fugenbreiten: 0,5 - 3 cm



Bild D6.1: Teilansicht der Natursteinbrücke vor der Sanierung. Die Altverfugung wurde bereits entfernt.



Bild D6.2: Teilansicht nach der Neuverfugung (Handverfugung) mit auf den Bestand abgestimmtem Mörtel.



Bild D6.3: Abdeckung der Mauer mit Sandsteinplatten: Die Grünfärbung zeigt bereits Besiedlungen mit Algen und Flechten an. Die historischen Abdeckplattenmaterialien waren Berkaer Sandstein und Muschelkalk. Spätere Ausbesserungen erfolgten mit Cottaer Sandstein. Reste aus diesen Beständen wurden wiederverwendet und Fehlbestände mit Abdeckplatten aus Nebraer Sandstein ergänzt.



Bild D6.4: Seitenansicht zu Bild D6.3

Ziesar (Brandenburg) Burganlage

Naturstein: Mischmauerwerk aus Naturstein und Ziegel

Verfugmörtel: Sonderrezeptur FM Brandenburg 04 SR 9998116 mit hydraulischen Zusätzen der Fa. HECK Wall Systems GmbH & Co. KG

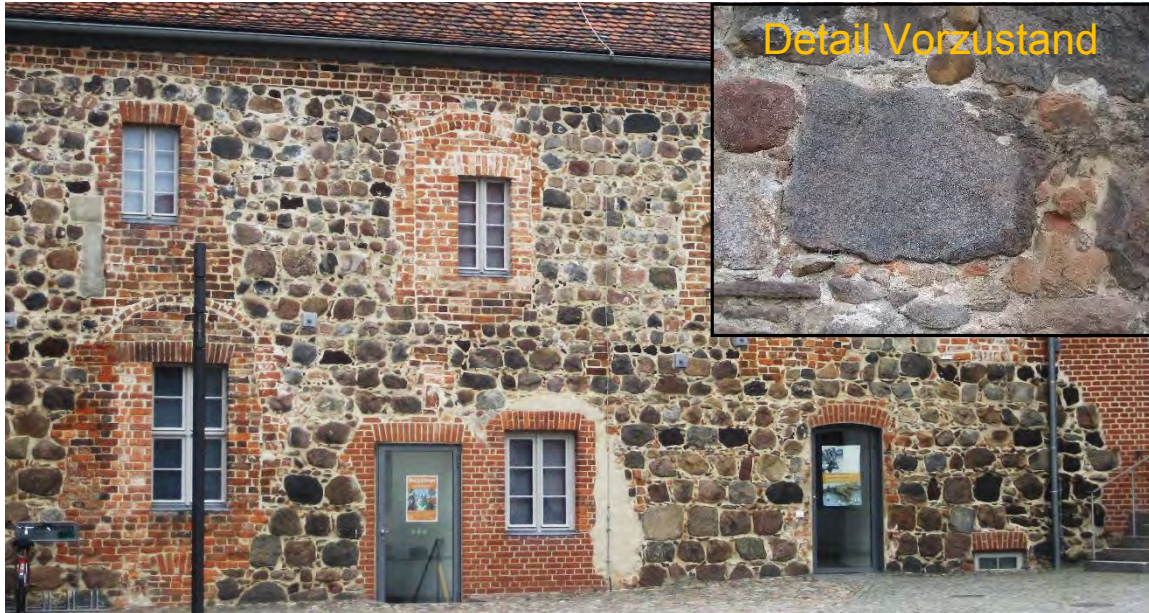


Bild D6.5: Typische Mischbauweise für Bauwerke im nördlichen Deutschland (z.B. Dorfkirchen Landkreis Prignitz) [aus: Mittelalterliche Putz und Mörtel im Land Brandenburg, Brandenburgische Landesamt für Denkmalpflege, Arbeitsheft Nr. 9, Potsdamer Verlagsbuchhandlung, 1998]. Die Technologie der Lagenausbildung der Feldsteine ist häufiger vorzufinden.

Rathaus Wolfach (Baden Württemberg)

Naturstein: roter Sandstein

Verfugmörtel: Rajasil FM SPF /Fugenmörtel spritzfähig für Fugenbreiten 5 - 20 mm



Bilder D6.6 und D6.7: Die sehr schmalen Fugen (5 - 10 mm) wurden mit einem spritzfähigen Trockenmörtel, der farbig auf den Bestand abgestimmt wurde, verfugt. (Information zu den Objekten bereitgestellt von Frau Pfaff - HECK Wall Systems GmbH & Co. KG)

Anlage E: Angaben zu den Verfugmörteln der ausgewählten Objekte

Tabelle E1: Erläuterungen zur Rezepturzusammensetzung an ausgewählten Objektbeispiele. Die mechanischen Kennwerte Druck- und Biegezugfestigkeiten wurden aus technischen Merkblättern, eigenen Untersuchungen oder Angaben der Projektpartner entnommen.

Objekt	Rezepturbezeichnung	Angaben zu den Rezepturen
Dom Worms	Sonderrezeptur „WORMS D1“ – spritzfähig (entwickelt im Rahmen von Untersuchungen am Mauerwerk der Nordseite)	Bindemittel: Weißkalkhydrat und Zemente (hoher Sulfatwiderstand, niedriger wirksamer Alkaligehalt), Gesteinskörnungen: Quarzfeinsande, modifizierende Zusätze - Biegezugfestigkeit: 2,6 N/mm ² - Druckfestigkeit: 5,1 N/mm ² (ermittelt an Kleinstprismen 1 x 1 x 6 cm ³)
Gotha Schloss Friedenstein Arkaden	Sonderrezepturen als Auffüllmörtel und Verfugmörtel „GOFR“ (entwickelt im Rahmen des DBU-Projektes AZ 22296-25)	Bindemittel: Weißkalkhydrat und Zement (hoher Sulfatwiderstand, niedriger wirksamer Alkaligehalt), Gesteinskörnungen: quarzreiche Sande, Größtkorn bis 4 mm, modifizierende Zusätze Auffüllmörtel: Biegezugfestigkeit: 1,1 N/mm ² Druckfestigkeit: 3,1 N/mm ² Verfugmörtel: Biegezugfestigkeit: 0,7-1,0 N/mm ² Druckfestigkeit: 1,7-2,4 N/mm ²
Kyffhäuser Denkmal	Sonderrezeptur KYF1-MAX	Bindemittel: Weißkalkhydrat und Zement (hoher Sulfatwiderstand, niedriger wirksamer Alkaligehalt), Gesteinskörnungen: quarzreiche Sande, Größtkorn 1 mm, modifizierende Zusätze, Biegezugfestigkeit: ca. 2 N/mm ² Druckfestigkeit: ca. 7 N/mm ²
Mansfeld Schloss	Maxit mur 950 HS GK 2 mm - pigmentiert (Fa. MAXIT Krölpa GmbH & Co. KG)	Bindemittel: Weißkalkhydrat und Zement (hoher Sulfatwiderstand, niedriger wirksamer Alkaligehalt), Gesteinskörnungen: quarzreiche Sande, Größtkorn 2 mm, modifizierende Zusätze, Biegezugfestigkeit: ca. 3 N/mm ² Druckfestigkeit: ca. 6-7 N/mm ² (Verarbeitung im Trockenspritzverfahren)

Wartburg - Wartburghotel	Sonderrezeptur System „WART MAX1“ (Fa. MAXIT Krölpa GmbH & Co. KG) mit Pigmentierung auf Basis des Altbestandes	Bindemittel: Weißkalkhydrat und Zemente (hoher Sulfatwiderstand, niedriger wirksamer Alkali-gehalt), Gesteinskörnungen: Sande mit typischen farbigen Gesteinen aus Randlagen des Thüringer Waldes, Größtkorn bis 4 mm, modifizierende Zusätze Biegezugfestigkeit: 1,8 N/mm ² Druckfestigkeit: 4,7 N/mm ²
Wartburg - Palas Westfassade	Sonderrezepturen als Kalk-Zement-Mörtel, Größtkorn 1 mm als Baustellenmischung	Bindemittel: natürlich hydraulischer Kalk und Zement (hoher Sulfatwiderstand) Gesteinskörnungen: quarzreiche Sande, modifizierende Zusätze, (keine Angaben zu mechanischen Kennwerten)
Wartburg - Südliche Wehrmauer	Wandflächen: System „WART-MAX3G“ (Fa. MAXIT Krölpa GmbH & Co. KG); begehbare Wehrgangsbereiche: spezielle Modifizierung der Mörtel und Ausbildung einer Abdichtungsebene	Bindemittel: Weißkalkhydrat und Zemente (hoher Sulfatwiderstand, niedriger wirksamer Alkali-gehalt), Gesteinskörnungen: Sande mit typischen farbigen Gesteinen aus Randlagen des Thüringer Waldes, Größtkorn bis 4 mm, modifizierende Zusätze Biegezugfestigkeit: 1,6 / N/mm ² Druckfestigkeit: 4,2 N/mm ² begehbare Wehrgangsbereiche: System aus WEBAC 5611 und Zemente (hoher Sulfatwiderstand, niedriger wirksamer Alkali-gehalt)
Wartburg - Westseite des Bergfrieds und Strebebfeiler im südlichen Teil der westlichen Wehrmauer	Sonderrezeptur System „WART-MAX1“ (Fa. MAXIT Krölpa GmbH & Co. KG)	Bindemittel: Weißkalkhydrat und Zemente (hoher Sulfatwiderstand, niedriger wirksamer Alkali-gehalt), Gesteinskörnungen: Sande mit typischen farbigen Gesteinen aus Randlagen des Thüringer Waldes, Größtkorn bis 4 mm, modifizierende Zusätze Biegezugfestigkeit: 1,8 N/mm ² Druckfestigkeit: 4,7 N/mm ²

Weimar OT Tiefurt Natursteinbrücke	Neuverfugung mit Fugenmörtel Rajasil FM HS-NA 03 (Fa. HECK Wall Systems GmbH & Co. KG)	Bindemittel: Weißkalkhydrat und Zemente (hoher Sulfatwiderstand, niedriger wirksamer Alkali-gehalt), Gesteinskörnungen: Quarzsande, Größtkorn bis 2 mm, modifizierende Zusätze Biegezugfestigkeit: 3,5 N/mm ² Druckfestigkeit: 7,5 N/mm ²
Wolfach Rathaus (Baden- Württemberg)	Rajasil FM SPF/ Fugenmörtel spritzfähig für Fugenbreiten 5 -20 mm (Fa. HECK Wall Systems GmbH & Co. KG)	Bindemittel: Weißkalkhydrat und Zemente (hoher Sulfatwiderstand, niedriger wirksamer Alkali-gehalt), modifizierende Zusätze Biegezugfestigkeit: 4 N/mm ² Druckfestigkeit: 13 N/mm ²
Ziesar Burganlage (Brandenburg)	Sonderrezeptur FM Brandenburg 04 SR 9998116 mit hydraulischen Zusätzen (Fa. HECK Wall Systems GmbH & Co. KG)	Bindemittel: Weißkalkhydrat und Trass Gesteinskörnungen: Quarzsande, Größtkorn bis 2 mm, modifizierende Zusätze Biegezugfestigkeit: 1,5 N/mm ² Druckfestigkeit: 4 N/mm ² Dyn. E-Modul: 6 kN/mm ²

Auflistung von Verfugungen an Objekten, die im Rahmen des Projektes erfasst worden sind:

- Eisenach, Hauptbahnhof Bahnhofsgebäude
- Erfurt, Dom
- Friedrichroda, Stadtmauer
- Gotha, Schloss Friedenstein
- Gotha, Naturkundemuseum
- Kyffhäuser Denkmal
- Leipzig, Peterskirche
- Mansfeld, Schloss
- Niedergrundstedt, Am Anger 1
- Nordhausen Blasii-Kirche
- Nordhausen, Dom
- Schmalkalden, Schloss Wilhelmsburg
- Schmalkalden, Stadtkirche
- Stuttgart, Hochschule für Technik, Hauptfassade (N-O-Seite)
- Stuttgart, Altes Schloss (N-O-Seite)
- Weimar, OT Tiefurt, Natursteinbrücke
- Weimar, Landesverwaltungsamt
- Weimar, Hauptpost
- Weimar, Hauptfriedhof
- Weingarten, Basilika St. Martin
- Worms, Dom

An weiteren Objekten wurden durch die Projektpartner Musterflächen angelegt. Weiterhin waren Daten von Mörtelrezepturen und Fotodokumentationen bereitgestellt worden.

**Anlage F: Kurzzusammenfassung der Bachelorarbeit von Alexandra Wohlrab (HFT Stuttgart, 2014)
 „Bautechnische Erfassung, Kartierung und Beurteilung des Fugenmörtels am Alten Schloss in Stuttgart und am HFT - Hauptgebäude für spätere Sanierungsarbeiten“**

Ziel der Arbeit war die Erfassung von typischen Schäden an Verfugungen von Natursteinmauerwerk ausgewählter Objekte. Abbildung F1 zeigt schematisch die Möglichkeiten einer Materialkartierung von Verfugmörteln.



Abb. F1: Ausschnitt einer Fugenkartierung am Alten Schloss/Stuttgart

In den Mauerwerksfugen der untersuchten Wandflächen am Alten Schloss und am Egle-Bau der HFT in Stuttgart waren Kalkmörtel, kalkreiche Zementmörtel und Dolomitmalkmörtel vorhanden. Es handelte sich um Mörtel aus dem Altbestand und um Mörtel, die im Rahmen von Ausbesserungen zum Einsatz kamen.

Die Mörtel in den unteren Wandbereichen waren zum Teil erheblich salzbelastet. Es haben sich bauschädliche Salze, die heterogen zusammengesetzt sind, gebildet. Als Anionen waren Sulfate, Chloride und Nitrate enthalten.

In Tabelle F1 sind die Salzbelastungen und Bestimmung einiger Mörtelproben aufgeführt.

Tabelle F1: Anionen aus Schadsalzen in Mörtelproben am Egle-Bau der HFT („HFT-“) und am Alten Schloss („AS“-) in Stuttgart [Angaben in M.-%] und Mörtelarten

Probe	Chlorid	Nitrat	Sulfat	Mörtelart
HFT-P2-Mörtel-oben	0,24	0,53	1,79	Kalkmörtel (geschädigt)
HFT-P7-Mörtel-oben	1,09	0,34	1,84	zementreicher Kalkzementmörtel
AS-P1-Mörtel-unten	0,40	0,02	1,88	Kalkzementmörtel
AS-P5-Mörtel-unten	0,63	1,37	0,67	Dolomitmalkmörtel

Die Anzahl der unterschiedlichen Mörtel variiert an den einzelnen Fassadenflächen von drei bis fünf, wobei der sichtbare Mauermörtel mit berücksichtigt wurde.

Am Alten Schloss lassen sich die sichtbaren Mörtel optisch sehr gut durch Farbe und Gesteinskörnung unterscheiden. Außerdem ist an dieser Fläche gut erkennbar, in welcher Reihenfolge die Reparaturmörtel aufgetragen wurden.

Ein typischer Mörtel, der an den historischen Bestand angepasst wurde, aber wieder Schäden zeigt, ist die Probe HFT P2, ein Kalkmörtel (Tab. F2, Mineralbestand).

Tab. F2: Mineralphasen der Probe HFT-P2-Mörtel-oben, chemische Formel und Bewertung mittels Röntgenbeugung (XRD)

Mineralname	Chemische Formel	Bewertung
Quarz	SiO ₂	Gesteinskörnung, Sand
Calzit	CaCO ₃	Hauptphase, Kalkmörtel
Mikroklin	K(Si _{0.75} Al _{0.25}) ₄ O ₈	Gesteinskörnung, Feldspat
Albit	Na _{0.98} Ca _{0.02} Al _{1.02} Si _{2.98} O ₈	Gesteinskörnung, Feldspat
Gips	CaSO ₄ x 2 H ₂ O	Salz oder Bindemittelbestandteil
Muskowite-2M1	K ₂ Al _{3.74} Fe _{0.26} Si ₆ Al ₂ O ₂₀ (OH) ₄	Gesteinskörnung, Glimmer
Nitrokalit	KNO ₃	bauschädliches Salz
Sylvin	KCl	bauschädliches Salz

Die in den Abbildungen F2 und F3 dargestellten Diagramme zeigen die prozentualen Anteile der vorhandenen Mörtel.

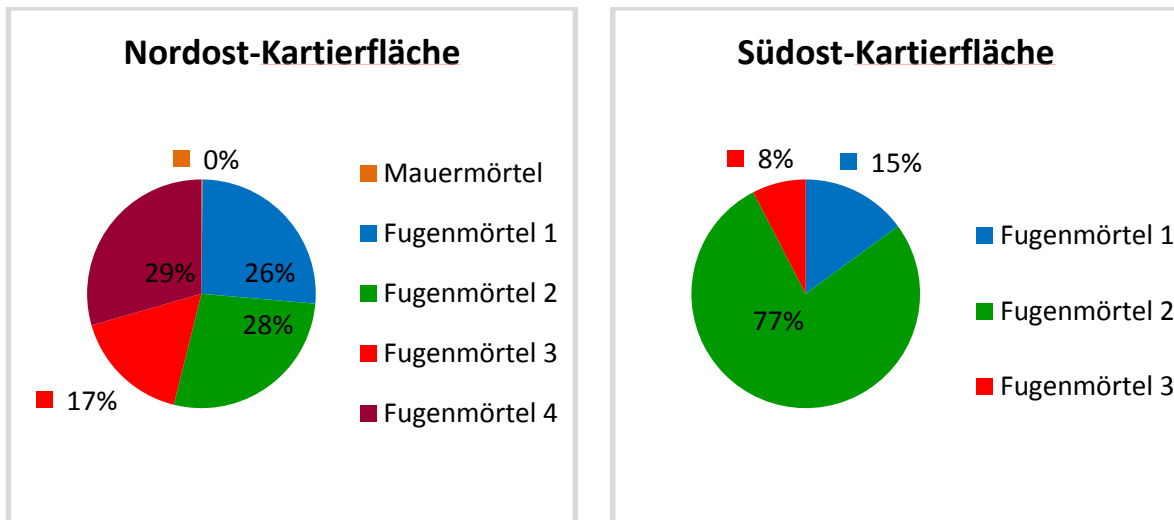


Abb. F2 und F3: Anteile der Mörtel an den kartierten Fassadenbereichen des Alten Schlosses in Stuttgart

Am Egle-Bau der HFT war durch die stellenweise starke Verwitterung der Fugenbereiche die Zuordnung nicht immer eindeutig (Abb. F4 und F5).

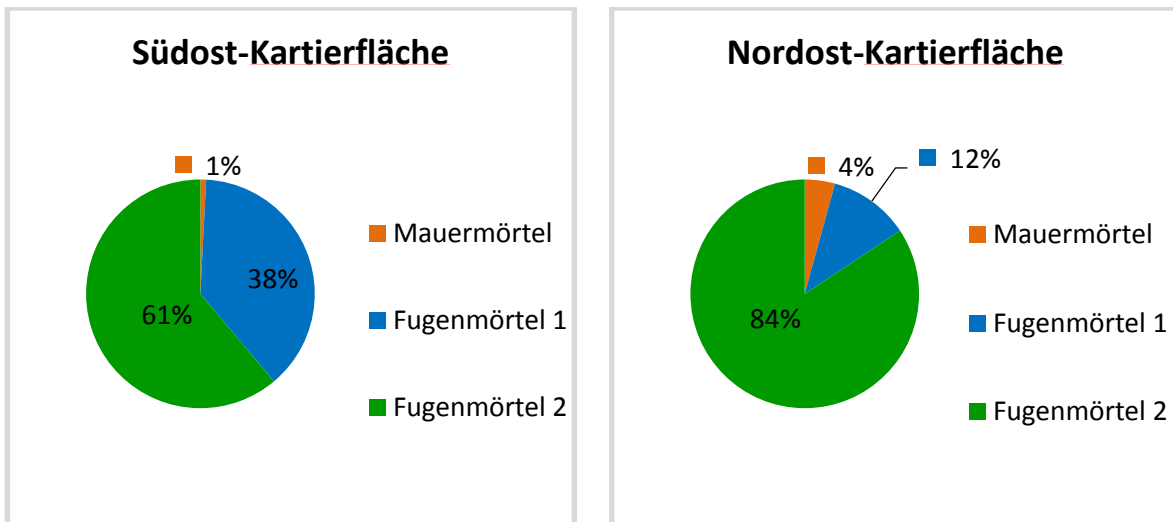


Abb. F4 und F5: Anteile der Mörtel an den kartierten Fassadenbereichen am Egle-Bau der HFT in Stuttgart

Bei den vorgefundenen Fugenmörteln handelt es sich überwiegend um Kalkmörtel, kalkreiche Zementmörtel und Dolomitmalkmörtel. Den Kalkmörteln wurde am Alten Schloss meistens Zement zugesetzt. Am Egle-Bau ist dies nur bei einem Fugenmörtel der Fall.

In Tabelle F3 ist das Verhältnis der Fugenfläche zu den Gesamtflächen der einzelnen kartierten Flächen dargestellt.

Tabelle F3: Fugenflächen, Gesamtflächen und Fugenanteile an zwei Bauwerken

Kartierte Fläche	Fugenfläche [m ²]	Gesamtfläche [m ²]	Fugenanteil [%]
Nordost-Fläche am Alten Schloss	0,73	9,02	8,06
Südost-Fläche am Alten Schloss	0,87	10,39	8,34
Nordost-Fläche am Egle-Bau	0,74	23,19	3,21
Südost-Fläche am Egle-Bau	0,57	12,18	4,65

Die Situationen an den Fugen wurden nach Schadenshäufigkeit und nach Reparaturbedarf erfasst.

Die Sockelbereiche sind sehr anfällig für Schadstoff- und Feuchtebelastung. Es kommt zu starken Verwitterungen am Natursteinmauerwerk. Alle untersuchten Flächen sind hier mittel bis stark geschädigt. Die Natursteine der Sockelzone der Südost-Fläche am Egle-Bau sind sehr stark abgewittert. (Abbildung F6)



Abb. F6: Sockelbereich Südost-Seite Egle-Bau der HFT in Stuttgart

Die Abbildung F7 zeigt den Sockelbereich der Nordost-Fläche des Alten Schlosses.



Abb. F7: Sockelbereich Nordost-Seite des Alten Schlosses in Stuttgart

In den Abbildungen F8 bis F11 sind die Schadensflächen und –längen an den einzelnen kartierten Flächen zusammengestellt. Die Schäden sind nach Anlagerungen, Verlusten, schlechter Verbund und Rissen eingeteilt.

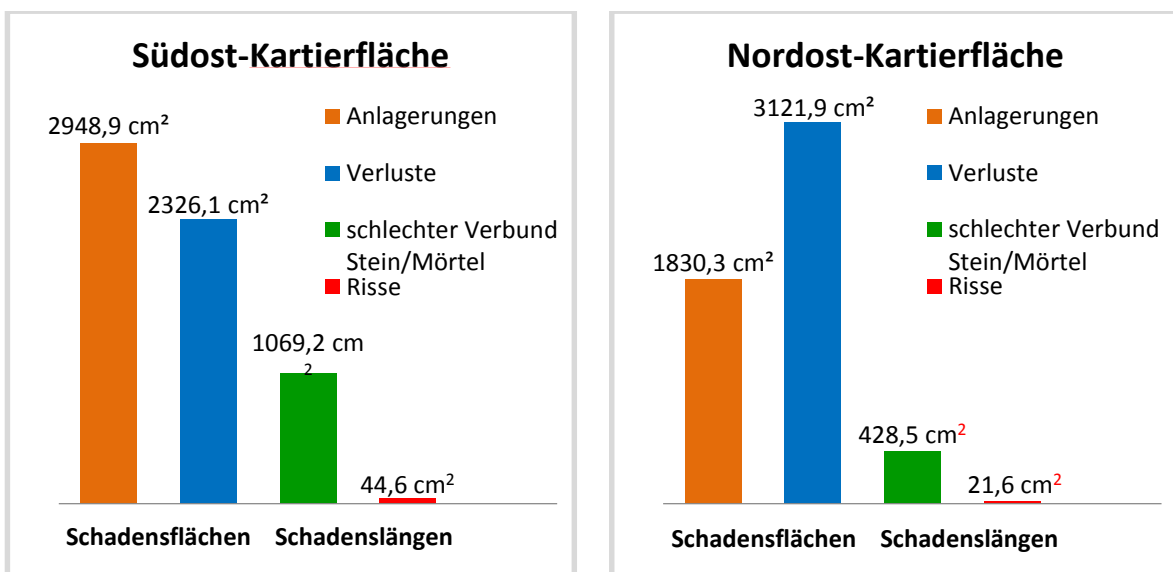


Abb. F8 und F9: Hauptschadensgruppen der Mörtel am Alten Schloss in Stuttgart

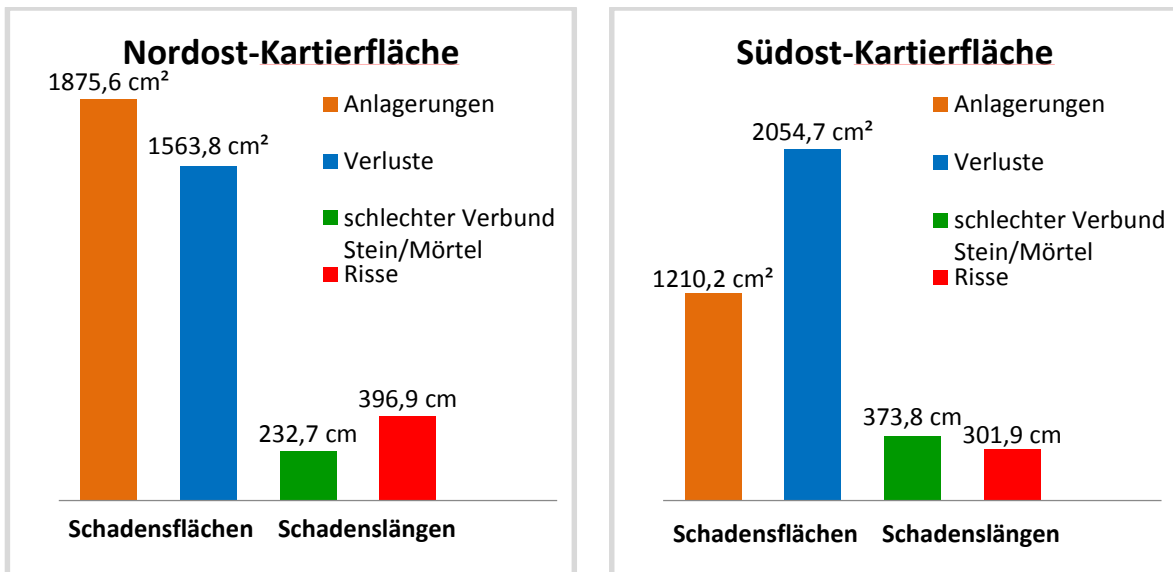


Abb. F10 und F11: Hauptschadensgruppen am Egle-Bau der HFT in Stuttgart

An den untersuchten Flächen wurden keine statisch relevanten Rissbildungen festgestellt. Am Alten Schloss treten nur vereinzelt Querrisse und Flankenabrisse auf. Die Flankenhaftung an vielen Stellen ist schlecht. Hier deuten sich Auswirkungen von nicht fachgerechter Verarbeitung der Verfugmörtel, unzureichender Nachbehandlung oder ungeeignete Materialzusammensetzung an. Vor allem in den oberen Bereichen der Fassadenflächen kommt es zu einer Schadenshäufung. Am Egle-Bau treten mehrere Quer- und Flankenabrisse auf, die zwar nicht sehr breit sind, aber dennoch weiter beobachtet werden müssen. Kleine Querrisse befinden sich meistens in den oberen Lagerfugen der kartierten Flächen.

Die folgende Tabelle F4 zeigt das Verhältnis von geschädigten Flächenanteilen zur Gesamtfläche der Verfugmörtel.

Tabelle F4: Schadensfläche, Gesamtfläche und Schadensanteil der Verfugmörtel.

Kartierte Fläche	Schadensfläche [cm²]	Gesamtfläche [cm²]	Schadensanteil [%] ¹⁾
Nordost-Fläche am Alten Schloss	4952	7273	68,09
Südost-Fläche am Alten Schloss	5275	8670	60,84
Nordost-Fläche am Egle-Bau	3439	7443	46,20
Südost-Fläche am Egle-Bau	3265	5659	57,70

¹⁾ohne Risse

Es ist festzustellen, dass der Schadensanteil bei fast allen Fassadenbereichen bei über 50 Prozent liegt, wobei nicht alle Schadensarten als kritische Zerstörungen anzusehen sind. So sind manche Verfärbungen teilweise nur optische Beeinträchtigungen, die das Fassadenbild stören.