



Entwicklung eines kunststoffbasierten Systems zur Anbindung und gleichzeitiger Entkopplung zwischen zueinander unverträglichen Baustoffsystemen

Abschlussbericht des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsprojektes AZ 35992/01

Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar

Weimar, Mai 2023

Projektträger:

Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystraße 9
99423 Weimar

Projektbearbeiter:

Dipl.-Ing. Thomas Grützner
Dr.-Ing. Hans-Werner Zier

Projektlaufzeit:

September 2020 – März 2023

Projektpartner:

Stadt Waltershausen
Markt 1
99880 Waltershausen

Fachbeirat:

Dr. Michael Auras	ehem. Geschäftsführer des Institutes für Steinkonservierung Mainz e.V. Mitglied der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA) e.V.
Silvia Britz	Thüringisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie, Erfurt
Andreas Hecker	Bauhaus-Universität Weimar, F.-A. Finger-Institut für Baustoffkunde
Stephan Scheidemann	Ingenieurbüro für Planung in der Steinkonservierung, Friedrichroda
Dr. Erwin Stadlbauer	Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege Leiter der Abteilung Fachdienste Hon.-Prof. der HAWK Hildesheim-Holzminde-Göttingen

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	6
1.1	Ausgangssituation	6
1.2	Zielsetzung des Vorhabens	7
1.3	Umweltaspekt	7
2	Arbeitspaket 1: Vorbereitungen	9
3	Arbeitspaket 2: Erfassen der aktuellen Situation am Modellobjekt	9
3.1	Burgruine Winterstein	9
3.1.1	Objektbeschreibung, zeitliche und stilistische Einordnung	9
3.1.2	Umbau- und Instandhaltungsmaßnahmen am überkommenen Baubestand	12
3.1.3	Konstruktion und Material	13
3.1.4	Zustand, Belastungssituation und Schäden	15
3.2	Kirchhofmauer in Kleinbrembach	17
3.2.1	Objektbeschreibung	17
3.2.2	Zustand, Belastungssituation und Schäden	18
4	Arbeitspaket 3: Entwicklung der Materialien im Labormaßstab	19
4.1	Modifizierung des Abdichtungssystems hinsichtlich der Materialkomponenten	19
4.1.1	Substitution der Füllstoffe	19
4.1.2	Substitution der Dispersionskomponente	28
4.2	Untersuchungen zu den Eigenschaften der Abdichtungs- und Entkopplungsmaterialien	31
4.2.1	Untersuchungen zu den thermoplastischen Eigenschaften	31
4.2.2	Untersuchungen zu Hafteigenschaften	32
4.2.3	Bildgebende Untersuchungen zum Aufbau der Dichtungsschichten und Anschlussbereiche	35
4.2.4	Untersuchungen zum Diffusionsverhalten der Abdichtungsschicht	39
4.2.5	Untersuchungen zum Migrationsverhalten von Salzlösungen durch die Abdichtungsschicht	40
4.2.6	Untersuchungen zur Salzmigrations-Wechselbeständigkeit	44
4.2.7	Untersuchungen zur thermisch-mechanischen Stabilität	45
4.3	Auswertung der Laboruntersuchungen	47
5	Arbeitspaket 4: Verifizieren der im Labor entwickelten Produkte und Technologien im Demonstratormaßstab	48
6	Arbeitspaket 5: Anlegen von Testflächen unter Praxisbedingungen bzw. von Musterachsen am Bauwerk	54
6.1	Musterfläche an der Burgruine Winterstein	55
6.2	Musterfläche an der Kirchhofmauer Kleinbrembach	57
7	Zusammenfassung der Arbeitsergebnisse und Evaluierung an den Modellobjekten	61
8	Öffentlichkeitsarbeit	62
9	Fazit	62

- ANLAGE I: Mauerrest der Kapelle der Burg Winterstein: Beschreibung der entnommenen Materialproben, Darstellung der Ergebnisse der Untersuchungen zum Bestand und zur Belastungssituation
- ANLAGE II: Turmstumpf der Burgruine Winterstein: Beschreibung der entnommenen Materialproben, Darstellung der Ergebnisse der Untersuchungen zum Bestand und zur Belastungssituation
- ANLAGE III: Kirchhofmauer in Kleinbrembach: Beschreibung der entnommenen Materialproben, Darstellung der Ergebnisse der Untersuchungen zum Bestand und zur Belastungssituation

Zusammenfassung

Gipsgebundene Mauerwerkssysteme weisen innerhalb der historischen Bausubstanz eine deutlich stärkere Verbreitung auf, als bis vor wenigen Jahren angenommen. Der Einsatz ungeeigneter Materialien für gipshaltiges Mauerwerk kann zu unerwünschten Reaktionen mit der vorhandenen Bausubstanz und in deren Folge zu massiven Bauwerksschäden führen. Als Instandsetzungsmaterial für gipsgebundenes Mauerwerk sind nur gips- oder kunststoffgebundene Mörtel dauerhaft verträglich.

Im Rahmen von baulichen Instandsetzungen, die meist mit Umnutzungen verbunden sind, werden an historische Bauwerke und Baustrukturen aber oft neue, erhöhte Anforderungen gestellt (bspw. höhere statische Belastungen). Gipsgebundene Mörtel sind darüber hinaus für exponierte, stark feuchtebeaufschlagte Außenbereiche (z.B. Mauerkronen) nicht geeignet.

In diesen Fällen ist oft der Einsatz hydraulisch gebundener Mörtelsysteme unumgänglich.

Das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Forschungsprojekt ging daher von dem Ansatz aus, keine neuen Materialien zu entwickeln, bei denen Unverträglichkeiten zu gipshaltigem Bestand vermieden werden, sondern die Möglichkeiten zu erforschen, Kontakt- und Reaktionszonen zueinander unverträglicher Materialien durch Entkopplung zu verhindern – bei gleichzeitiger Anbindung und Ausbildung eines Mauerwerkssystems aus Bestands- und Instandsetzungsbereichen.

Mehrkomponentensysteme auf Basis von Bitumenacrylat und verschiedenen inerten bzw. reaktiven Füllstoffen erschienen hierfür geeignet. Dabei sollten die einzelnen Komponenten unterschiedliche Aufgaben erfüllen, die in Summe ein System ergeben, das für die unterschiedlichen Anforderungen modifizierbar ist. Für die folgenden Anwendungsfälle wurden deshalb modifizierte Mehrkomponentensysteme entwickelt:

- Verbund- und Entkopplungsschichten zwischen sulfatgebundenem Bestandsmauerwerk und Neuaufmauerungen / Mauerwerksinstandsetzungen
- Verbund- und Entkopplungsschichten zwischen Bestandsmauerwerk und Verputz
- Verbund- und Abdichtungsschichten in Fugen auf Mauerkronen und auf besonders feuchteexponierten Wandflächen

Die Entkopplungssysteme wurden im Hinblick auf Wasseraufnahmeverhalten, Diffusionseigenschaften, Resistenz gegenüber der Einwirkung starker Salzlösungen, Haftzug- und thermomechanische Eigenschaften untersucht. Die unter Laborbedingungen gewonnenen Erfahrungen wurden an Mauerwerksdemonstratoren getestet.

Die Validierung der im Labor- und Demonstratormaßstab entwickelten Systeme und Technologien erfolgte im Rahmen des Projektes an zwei Bauwerken mit geeigneten Anwendungsfällen und Instandsetzungsbedarf, der Burgruine Winterstein bei Waltershausen und der Kirchhofmauer in Kleinbrembach. Beide Modellobjekte befinden sich in Thüringen.

1 Einführung

1.1 Ausgangssituation

Gipsgebundene Mauerwerkssysteme sind innerhalb der historischen Bausubstanz deutlich stärker verbreitet als bis vor wenigen Jahren angenommen. Dies ist vor allem auf die vergleichsweise günstigen Herstellungsaufwendungen für gipshaltige Mörtel im Vergleich zu etwa kalkgebundenen Mörteln zurückzuführen. Daher sind auch in Gegenden, in denen örtliche Kalkvorkommen einen Großteil der Ressourcen für die Baumaterialherstellung bildeten, durchaus gipshaltige Mörtel in Bauwerken vorliegend.

Die Probleme beim Einsatz ungeeigneter Materialien für die Instandsetzung geschädigten gipshaltigen Mauerwerks sind hinlänglich bekannt. Die dafür oft eingesetzten hydraulischen Mörtel bilden im Kontakt mit gipshaltigem Material (Mörtel bzw. Stein) und Feuchtezutritt Treibmineralien, die zu extremen Bauteilschäden bis hin zur vollständigen Zerstörung eines Bauwerkes führen können. /2/12/15/

Als Instandsetzungsmaterial für gipsgebundenes Mauerwerk sind demzufolge nur zwei mögliche Mörtelsysteme dauerhaft verträglich:

- gipsgebundene Mörtel
- kunststoffgebundene Mörtel

Seit den 1980er Jahren wurden darüber hinaus spezielle Bindemittel entwickelt, die einen Einsatz von daraus hergestellten Mörteln im gipshaltigen / gipsgebundenen Mauerwerk ermöglichen sollten. In der Baupraxis wird jedoch nur ein solches Bindemittelsystem in größerem Umfang vermarktet und eingesetzt.

Die Palette gipsgebundener Mörtelsysteme wiederum ist in der jüngsten Zeit deutlich gewachsen. Hier wurde, nachdem die Kenntnis zur Herstellung und Verarbeitung von Gipsmörteln seit dem Ende des 19. Jahrhunderts nahezu völlig verloren ging, in jüngerer Zeit wieder viel Entwicklungsleistung investiert. Gegenwärtig sind Gipsmörtel und -halbfabrikate für unterschiedlichste Einsatzbedingungen am Markt vorhanden.

Kunstharzgebundene Mörtelsysteme sind demgegenüber eher in Sonderfällen eingesetzt worden, da sie erheblich teurer als vergleichbare mineralische Mörtelsysteme sind und auch die Verarbeitung anspruchsvoller ist.

Im Rahmen von baulichen Instandsetzungen, die meist mit Umnutzungen verbunden sind, werden an historische Bauwerke und Baustrukturen oft neue, erhöhte Anforderungen gestellt, die diese bisher nicht erfüllen mussten.

Beispielsweise sind durch prognostiziert erhöhte statische Belastungen bestimmte Mörtelsysteme von vornherein in der Instandsetzung ausgeschlossen (bspw. Gipsmörtel in temporär durchfeuchteten Bereichen). Weiterhin erfahren gipsgebundene Mörtel Grenzen ihrer Eignung bei Einsatz in stark feuchtebeaufschlagten Außenbereichen (z.B. Mauerkronen).

In diesen Fällen ist oft der Einsatz hydraulisch gebundener Mörtelsysteme unumgänglich. Wird ein Erhalt der historischen Bausubstanz gipsgebundener Mörtelsysteme angestrebt – bei notwendigem Einsatz hydraulischer Mörtel im Rahmen von Instandsetzungen / Umnutzungen - so bleibt als Möglichkeit nur, den zu erhaltenden baulichen Bestand und die Neukonstruktion voneinander zu trennen. Die zu entwickelnde Entkopplungsschicht muss multifunktional ausgebildet werden und folgende Anforderungen erfüllen:

- Entkopplung der gipsbasierten und hydraulischen Mörtelsysteme. Es muss sichergestellt werden, dass direkter Kontakt zwischen sulfatisch und hydraulisch gebundenen Mörtelsystemen verhindert wird.

- Sperrung der Grenzschicht zwischen gipsbasierten und hydraulischen Mörtelsystemen. Dabei darf ein wechselseitiges Einwandern von Sulfat bzw. Alkalien auch unter feuchten Bauteilbedingungen bzw. Feuchtegradienten nicht erfolgen.
- Anbindung von gipsbasierten und hydraulischen Mörtelsystemen. Die unter Verwendung unterschiedlicher Mörtel errichteten Baustrukturen müssen ein einheitliches statisches System bilden.

Ähnliche Problemstellungen stehen im Zusammenhang mit drei weiteren Anwendungsfällen:

- Zwischen gipsbasierten Putzsystemen und Mauerwerk, welches ein hohes Potential löslicher Alkalien besitzt, ist aufgrund der materialspezifischen Unverträglichkeiten ebenfalls die Schaffung einer Entkopplungsschicht erforderlich. In diesem Fall besteht darüber hinaus die besondere Herausforderung, die Anbindung zwischen Putz und Untergrund zu realisieren.
- Ein vergleichbares Problem liegt im Falle gipsgebundenen Mauerwerks und notwendiger Verputzung mit einem hydraulisch gebundenen Putzmörtel vor, wenn ein solches Putzsystem aus Gründen hoher Belastung in der konkreten Einbausituation gefordert wird.
- Bei steinsichtiger Verfügung von Mauerkronen und vergleichbaren Bauwerksbereichen aus gipsgebundenem Mauerwerk mit erhöhter Feuchtebeaufschlagung sind Deckfugen bzw. Mörtelverstriche aus Gipsmörtel nur von geringer Standzeit. Bei alternativ einsetzbaren mineralischen (hydraulischen) Mörteln tritt wieder das Problem der Materialunverträglichkeit auf. Bei steinsichtiger Verfügung haben sich bereits in der Vergangenheit Abdichtungs- und Verbundschichten zwischen Mauerwerk und Deckverfugungen bewährt. Im Falle des Einsatzes bei gipsgebundenem Mauerwerk kommt zur beabsichtigten Verbundwirkung noch eine notwendige Abdichtungs- und Entkopplungsfunktion dieser Schichten hinzu.

1.2 Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Forschungsprojektes war die Entwicklung und Anpassung eines Mehrkomponentensystemes, welches gleichzeitig Entkopplungs- und Anbindungseigenschaften aufweist und es daher ermöglichen sollte, in Bauwerken / Bauteilen zueinander unverträgliche Mörtelsysteme einzusetzen, wenn dies aus Instandsetzungstechnischen Erfordernissen notwendig ist.

Im Unterschied zu bisherigen Ansätzen sollten die neuen Mehrkomponentensysteme multifunktional sein und neben einer räumlichen Entkopplung gleichzeitig weitere Anforderungen erfüllen. Diese sind beispielsweise die Verhinderung der Migration von gelösten Substanzen zueinander unverträglicher Baustoffsysteme bei gleichzeitiger konstruktiver Anbindung sowie eine Verringerung der Rissneigung durch thermoplastisches Verhalten.

Die Validierung der im Labor- und Demonstratormaßstab entwickelten Systeme und Technologien sollte im Rahmen des Projektes an zumindest einem Bauwerk mit geeigneten Anwendungsfällen und Instandsetzungsbedarf erfolgen.

1.3 Umweltaspekt

Bauwerke wurden und werden durch Bewitterung und anthropogen bedingte Schadstoffeinträge in ihrer Substanz geschädigt. Beispielhaft seien hier die Schädigungen durch Sulfateinträge über in Niederschlägen gelöste Schwefelverbindungen („Saurer Regen“) genannt, die insbesondere auf dem Gebiet der ehemaligen DDR zu starken Schädigungen geführt haben. Die Schädigungen waren vor allem durch Bindemittelumwandlungen von Mörteln charakterisiert, es lassen sich aber auch Schädigungen am Naturstein und Beton nachweisen. Die schädigende Wirkung konnte beispielsweise bereits 1994 in einer vom Umweltbundesamt in Auftrag gegebenen Untersuchung der MFPA Weimar belegt werden.

/14/

Der Schädigungsmechanismus des „Sauren Regens“ verlor mit der Umstellung der Heizungstechnologie von Braunkohle-Hausbrand auf Öl- und Gasheizung seit den 1990er Jahren stark an Relevanz. Es sind

jedoch andere anthropogen induzierte schädigende Einflüsse geblieben bzw. haben sich verstärkt: Nach wie vor werden in hohem Maße bauschädigende Salze in Mauerwerksstrukturen eingetragen.

Eine erhebliche Belastung von Bausubstanz erfolgt durch Chloride aus Streusalzeintrag. In Deutschland werden beispielsweise in den Wintermonaten jährlich etwa 1,5 - 4 Millionen Tonnen Streusalz ausgebracht. /7/

Der Eintrag von Nitraten in Bauwerksstrukturen resultiert hauptsächlich aus der intensiven Landwirtschaft mit der damit einhergehenden Überdüngung der Böden bzw. als Düngung verharmlosten Entsorgung von Fäkalien aus der Massentierhaltung.

Aufgrund der immer noch steigenden Verkehrsbelastung werden Stickoxide aus Verbrennungsmotoren über mehrstufige chemische Umwandlungen ebenfalls zu einer wachsenden Eintragsquelle für bauschädliches Nitrat.

Bezüglich des Schädigungspotentials gelöster Salze im Mauerwerk sei auf das WTA-Merkblatt 3-13-19/D verwiesen.

/13/

Auch thermische Effekte führen zu schädigenden Auswirkungen auf Baustrukturen. Diese werden durch den Klimawandel verstärkt. Insbesondere die letzten Sommerperioden mit ungewöhnlich langen Sonnenscheindauern und hohen Temperaturen führten zu starken Aufheizungen von Baustoffoberflächen. Hier wurden teilweise Temperaturen bis zu 80 °C gemessen. Tag-Nacht-Unterschiede betragen dann unter Umständen bis zu 50 K. /3/

Mineralische Baustoffe sind den daraus resultierenden Gefügespannungen mitunter nicht mehr gewachsen und reagieren mit Rissbildung. Die ebenfalls dem Klimawandel zuzurechnenden Starkregenereignisse in der jüngsten Vergangenheit erhöhen in Verbindung mit Rissbildungen die Durchfeuchtung des Mauerwerkes, insbesondere in den Mauerkronenbereichen.

Die hohen Oberflächentemperaturen in Baustoffen können in gipsgebundenen Strukturen über unmittelbare mechanisch-thermische Einwirkungen auch eine Dehydratation des Gipses bewirken (Dehydratation ist rein reaktionskinetisch bereits ab ca. 40 °C möglich). Bei nachfolgender Rehydratation sind Gefügeschwächungen durch Umkristallisationen nicht auszuschließen.

Als weitere anthropogen verursachte Schädigungen lassen sich aber durchaus auch die Folgeschäden bei Instandsetzungsmaßnahmen unter Verwendung ungeeigneter Materialien (im Falle von gipsgebundenen oder gipshaltigen Mörteln sind das hydraulisch gebundene Mörtel) ansehen.

Infolge der Verwendung ungeeigneten Materials, daraus resultierender Folgeschäden und den schlussendlich notwendigen Maßnahmen zu deren Behebung werden bedeutende Ressourcen gebunden: Oftmals sind die Aufwendungen zur Behebung von Schädigungen durch ungeeignetes Material deutlich höher als die, welche für die vorherigen Instandsetzungen aufgebracht wurden.

2 Arbeitspaket 1: Vorbereitungen

Die Notwendigkeit, bauliche Strukturen aus gipshaltigem Mauerwerk instand zu setzen, ist hinlänglich bekannt, auch die damit verbundenen Probleme hinsichtlich der Mörtelverträglichkeiten. Bislang wurden dafür „gipsverträgliche“ bzw. inerte Baustoffsysteme eingesetzt. Ein Beispiel dafür ist die Sanierung des Schlosses Wiehe in Thüringen. Hier wurden teilweise acrylatgebundene Mörtel als „Puffer“ zwischen gipshaltigem Bestandsmauerwerk und Instandsetzungsbereichen eingesetzt. Ein dem Forschungsprojekt vergleichbarer Ansatz einer „Entkopplung“, die gleichzeitig die Migration gelöster Bestandteile aus den Mörteln unterbindet, existiert bisher nicht. Daher wird der technologischen und materialtechnischen Entwicklung ein anwendungstechnischer Bedarf und Marktchancen, wenn auch nur für spezialisierte Fälle, zugeschrieben.

Mit dem Hersteller von Spezialprodukten für das Bauwesen, der Fa. WEBAC Chemie GmbH aus Barsbüttel bei Hamburg, erfolgten bereits im Vorfeld der Projektanbahnung erste Gespräche bezüglich der möglichen Entkopplungssysteme und deren Modifizierung. Hierbei wurden auch wesentliche Anforderungen hinsichtlich der Einsatzcharakteristika sowie der anwendungstechnischen und einsatzspezifischen Eigenschaften formuliert und abgestimmt. Die WEBAC Chemie GmbH war assoziierter Projektpartner.

Die Stadt Waltershausen als Projektpartner und gleichzeitig Eigentümer der Burgruine Winterstein stimmte der Anlage von Musterflächen zu und realisierte maßnahmevorbereitende Arbeiten, wie beispielsweise die Gerüststellung am Bauwerk.

3 Arbeitspaket 2: Erfassen der aktuellen Situation am Modellobjekt

3.1 Burgruine Winterstein

3.1.1 Objektbeschreibung, zeitliche und stilistische Einordnung

Die Burgruine Winterstein befindet sich im südlichen Teil der Ortslage Winterstein, einem Ort am Nordhang des Thüringer Waldes, etwas südlich der Linie Eisenach - Gotha.

Die Burg wurde erstmals 1246 als Sitz eines Ritters Waltmann von Winterstein erwähnt /11/ und war später Stammsitz der Freiherren von Wangenheim-Winterstein.

Die Burg war zentraler Teil einer späteren, ausgedehnteren Schlossanlage, welche ab 1513 von einem der Stammväter der Wintersteiner Linie der Wangenheims begonnen wurde. Seit 1638 geriet die Burg in Verfall, wurde 1729 verlassen und diente später als Steinbruch zur Instandhaltung anderer Gebäude. /10/ Heute sind nur noch verschiedene Gebäudereste erhalten. Im westlichen Teil der Anlage befindet sich ein ca. 7 m breites und 8,5 m hohes Mauerstück, welches als „Kapelle“ bezeichnet wird. In Höhe des ursprünglichen 2. Obergeschosses, das aufgrund massiver Erdanschüttungen am Mauerfuß nun deutlich niedriger liegt, befindet sich ein ursprünglich gekuppeltes Spitzbogenfenster, dessen Mittelsäule jedoch nicht mehr erhalten ist. Etwas seitlich versetzt darunter durchbricht ein flachbogiger Durchgang die Mauer, daneben ein Schlitzfenster, welches sich nach Norden hin verbreitert.

Südlich der „Kapelle“ ist der Turmstumpf des Burgturmes erhalten, eine quadratische Konstruktion in den Abmessungen 9,2x10 m² und etwa 11 m Höhe, welche an der Ostseite eine segmentbogige, an der Südseite eine hochrechteckige, gewändegerahmte Öffnung aufweist.

Der jetzige Eingang, aufgrund des nach Norden abfallenden Geländeprofiles deutlich niedriger gelegen, ist, ebenso wie die Mauerwerksöffnung unmittelbar darüber, nicht ursprünglich, sondern dem späten 19. Jahrhundert zuzuordnen.

Im Turm ist eine massive Decke vorhanden, welche keine Öffnung nach oben aufweist und sicherlich ebenfalls als spätere Zutat einzuordnen ist.

Nördlich der beiden Mauerstücke ist noch ein langer Mauerzug erhalten, der jedoch nur etwa bis zu 2 m Höhe aufweist und vermutlich ursprünglich eine Gebäudewand darstellte.

LEHFELDT /10/ datiert das Mauerstück der „Kapelle“ in das 15., den Turmstumpf hingegen in das 16. Jahrhundert.

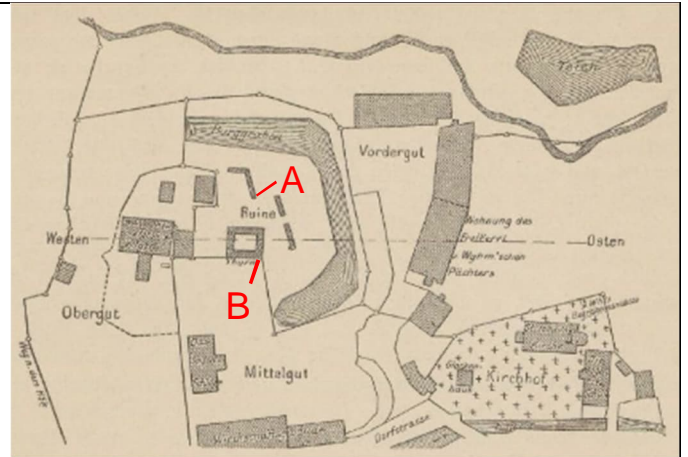
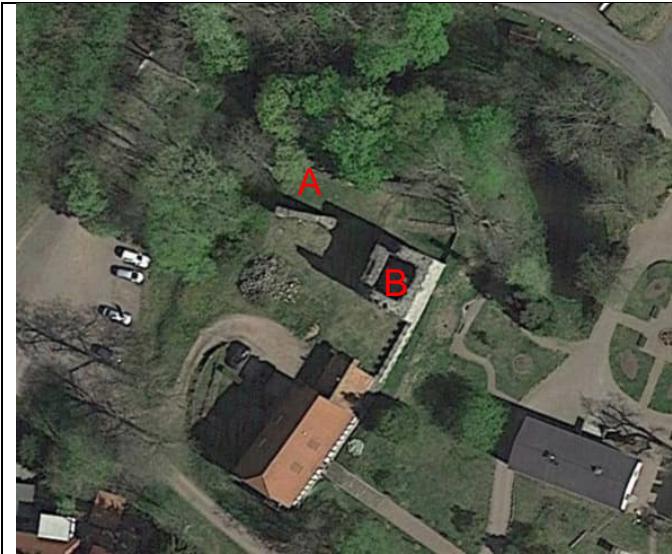


Abbildung 1: Lageeinordnung der Burgruine Winterstein, A...Mauerrest der „Kapelle“, B...Turmstumpf (Bildquelle: GoogleMaps)

Abbildung 2: Lageplan der Burganlage Winterstein (aus /10/, S. 35): A...Mauerrest der „Kapelle“, B...Turmstumpf



Abbildung 3: Ansicht des Turmstumpfes von Osten, Aufnahme vor 1874 (Abbildung aus /11/)

Abbildung 4: Burgruine, von Südwesten gesehen, links im Bild die „Kapelle“, rechts der Turmstumpf.



Abbildung 5: Mauerrest der Kapelle, Ansicht von Süden

Abbildung 6: Mauerrest der Kapelle, Ansicht von Norden



Abbildung 7: Turmstumpf, Ansicht von Südwesten



Abbildung 8: Turmstumpf, Ansicht von Westen



Abbildung 9: Turmstumpf, Ansicht von Nordwesten



Abbildung 10: Turmstumpf, Ansicht von Osten

3.1.2 Umbau- und Instandhaltungsmaßnahmen am überkommenen Baubestand



Mauerrest der Kapelle

Der Mauerrest der Kapelle weist an den beiden Schmalseiten nachträgliche Aufmauerungen mit plattigem Steinmaterial auf. Diese verjüngen sich nach oben stark und stellen Sicherungskonstruktionen zur Stabilisierung der Mauerwerksscheibe dar.

Die Mauerkrone wurde offensichtlich abgeglichen und mit einigen Lagen von Bruchsteinen neu aufgemauert.

Die Mauerwerksergänzungen sind vermutlich dem 20. Jahrhundert zuzurechnen.

Die Südseite des Mauerrestes ist mit einem harten, recht grobkörnigen Mörtel neu ausgefugt, die Nordseite mit einem feinkörnigen dunkelgrauen Material. Die letztgenannte Maßnahme ist dem Ende des 20. Jahrhunderts zuzuordnen.

	
<p>Abbildung 11: Nachträgliche Aufmauerung zur Stabilisierung der Mauerwerksscheibe (Ostseite der Kapelle)</p>	<p>Abbildung 12: Detail der Südseite der Kapelle mit zwei zu unterschiedlichen Zeiten ausgeführten nachträglichen Verfugungen.</p>

Turmstumpf

Am Turmstumpf erfolgten zu unterschiedlichen Zeiten verschiedenste Instandhaltungsmaßnahmen, teilweise verbunden mit Eingriffen in das bestehende Mauerwerk.

Soweit von außen erkennbar, wurden mehrere Reparaturen an der bestehenden Verfugung des Mauerwerks vorgenommen, sämtlich mit hydraulischen Mörteln ausgeführt. An der Westseite beispielsweise sind drei verschiedene nachträgliche Verfugmörtel unterscheidbar. Zuletzt wurde der gesamte Baukörper mit einem dunkelgrauen, feinkörnigen Verfugmörtel neu verfugt (analog zum Mauerrest der Kapelle).

Die Mauerkronen wurden durch Aufmauerungen mit Bruchstein gesichert. Große Bereiche sind allerdings nur mit Spritzbeton abgedeckt worden, insbesondere die unregelmäßigen, das Füllmauerwerk zeigenden Abbruchlinien im oberen Bereich.

Starke lokale Mauerwerksausbrüche an der Nord- und Ostseite wurden neu ausgemauert und die Gewölbedecke des Turmes oberseitig mit einer Betonschicht, evtl. mit darunterliegender Abdichtungsebene versehen.

Teilbereiche des Mauerwerks wurden verpresst bzw. vernadelt. Verwendung fand dafür ein Verpressmörtel, wahrscheinlich auf Basis von Zementen mit hohem Sulfatwiderstand.

Die benannten Maßnahmen erfolgten hauptsächlich zu Beginn des 21. Jahrhunderts (2002 - 2003).



Abbildung 13: Sicherung des Mauerwerks des Turmstumpfes mit Spritzbeton



Abbildung 14: Nachträgliche Verfugung des Sandsteinmauerwerks mit einem dunklen hydraulischen Mörtel

3.1.3 Konstruktion und Material

Mauerrest der Kapelle

(Untersuchungen am Mauerwerk der Kapelle s. ANLAGE I zum Bericht)

Der Mauerrest der Kapelle besteht überwiegend aus hammerrechten Schichten- bzw. Bruchsteinmauerwerk. Verwendung fanden meist rötliche und graue Sandsteine aus dem Buntsandstein (vmtl. Sollingfolge), jedoch auch dunkelgraues schiefriges Material. Gewonnen wurden die Steine in der unmittelbaren Umgebung.

Als Mauermörtel kam ursprünglich ein rötlichweißer Gipsmörtel zur Anwendung. Dieser besitzt in seiner Matrix Gipsbruchstücke bis etwa 5...10 mm Durchmesser und ist sehr dicht. Ungeschädigte Bereiche des Mörtels sind von hoher Festigkeit.

Aufgrund der relativ geringen Mauerstärke dürfte ein mehrzoniger Aufbau der Wandstruktur vermutlich nicht vorliegen. Die Bruchsteine des Mauerwerkes wurden sorgfältig vermauert, so dass übermäßig große Fugenbreiten kaum vorhanden sind. Breite Fugen wurden auch ausgezwickelt.

Die seitlichen Aufmauerungen aus jüngerer Zeit erfolgten unter Verwendung eines rötlichen, sehr harten und plattigen Sandsteines, wie er auch für die neu ausgebildete Mauerkrone Verwendung fand. Dieses Material, ein Sandstein aus dem Rotliegend (Goldlauter-Formation), steht ebenfalls in unmittelbarer Ortsnähe an. Das Aufmauern erfolgte mit Kalkmörtel. Kalkmörtel wurde auch für lokale Ausbesserungen im Mauerwerk eingesetzt.

Nachträgliche Verfugungen wurden, wie bereits erwähnt, mit grobkörnigen und meist sehr harten hydraulisch gebundenen Mörteln durchgeführt. Die letzte Verfugung vom Beginn des 21. Jahrhunderts wurde wahrscheinlich mit einem hydraulischen Mörtel mit erhöhtem Sulfatwiderstand vorgenommen.



Abbildung 15: Detail des Mauerrestes der Kapelle (Nordseite): Gut erkennbar ist das meist kleinformatige Mauerwerk aus grauem bzw. rötlichem schiefrigem und Sandsteinmaterial. Die Segmentbogenöffnung ist vermutlich nicht ursprünglich.

Abbildung 16: Nachträgliche Verfügung des Sandsteinmauerwerks mit einem dunklen hydraulischen Mörtel – hier in direktem Kontakt zu Gipsmörtel

Turmstumpf

(Untersuchungen zum Mauerwerk des Turmstumpfes s. ANLAGE II zum Bericht)

Das Mauerwerk des Turmstumpfes besteht ebenfalls aus hammerrechtem Schichten- bzw. Bruchsteinmauerwerk. Innerhalb des Mauerwerkes lässt sich jedoch eine heterogene Struktur feststellen: Im unteren Teil des Mauerwerks herrscht größerformatiges Mauerwerk aus rötlichem Buntsandstein mit deutlich ausgebildeter Eckquaderung vor, während in den oberen Mauerwerksbereichen vermehrt kleinere Steine als schichtiges Mauerwerk aus grauem Sandstein und schiefrigem Material verbaut wurden.

Über die Mauertiefe lässt sich ein mehrzoniger Aufbau vermuten, der im Bereich der südseitigen Fensteröffnung auch nachgewiesen wurde: Dabei sind die beiden äußeren Mauerschalen sorgfältig gemauert und ausgezwickelt, während der innere Bereich einen hohen Mörtelanteil aufweist und gewissermaßen „verfüllt“ wirkt.

Soweit untersucht, wurde als Mauermörtel im unteren Teil ein relativ magerer Kalkmörtel verwendet, der nur von geringer Festigkeit war. In den oberen Mauerwerksbereichen fand sich jedoch in größeren Anteilen auch gipsgebundener Mauermörtel.

Auch das Mauerwerk des Turmstumpfes wurde mehrmals neu verfügt. Hier finden sich, ebenfalls wie an der Kapelle, verschiedene helle, sehr harte Kalk- oder Kalk-Zement-Mörtel mit groben Gesteinskörnungen. Zuletzt wurde nahezu flächendeckend ein dunkelgrauer feinkörniger Mörtel, offensichtlich unter Zusatz von Bindemitteln mit hohem Sulfatwiderstand, für die Verfügung eingesetzt.

3.1.4 Zustand, Belastungssituation und Schäden

Mauerrest der Kapelle

Offensichtlich waren die Sicherungsmaßnahmen der Vergangenheit, insbesondere die seitlichen Stützaufmauerungen und die Ausbildung einer regelmäßigen Mauerkrone insofern erfolgreich, als dass gravierende statische Probleme zumindest äußerlich nicht erkennbar sind.

Rein visuell konnte eine starke Durchfeuchtung der gesamten Mauerwerksstruktur bereits vermutet werden.

Zur Charakterisierung der Mörtel bzw. deren Feuchte- und Belastungssituation wurden händisch Mörtelproben vom Bauwerk entnommen. Die Entnahmebereiche und Probenbeschreibungen wie auch die detaillierten Untersuchungsergebnisse zur Belastungssituation sind in ANLAGE I zum vorliegenden Bericht dargestellt.

Die Untersuchungen an den sehr dichten gipsgebundenen Mauermörteln haben eine starke Durchfeuchtung von bis zu 12 M.-% und einen Durchfeuchtungsgrad von fast 70 % ergeben. Dabei sind die relativen Feuchtegehalte der gipsgebundenen Mauermörtel deutlich geringer als die der Kalkmörtel, was auf die wesentlich dichtere Gefügestruktur der Gipsmörtel zurückzuführen ist.

Darüber hinaus konnten an einigen untersuchten Mörtelproben hohe bis extrem hohe Gehalte an Chlorid und Nitrat nachgewiesen werden (Mörtelproben WST/B/16 – s. Anlage I). Die Probenahmestelle befand sich 30 cm über dem Bodenniveau, als Eintragsquelle ist hier das angrenzende Erdreich anzunehmen.

Turmstumpf

Der Turmstumpf weist gravierende statische Schäden auf, die trotz der umfangreichen Instandsetzungsmaßnahmen der Vergangenheit in ihrem Fortschreiten lediglich gebremst werden konnten. So wurden an der Nordwestecke Rissbildungen festgestellt, die hier ein Abtreiben der Bauwerksecke anzeigen. In ähnlicher Weise zeigen Risse in der gemauerten Laibung des Rechteckfensters in der Südfassade an, dass hier ein Auseinandertreiben der beiden „Außenschalen“ des Mauerwerkes erfolgt. Der Mauermörtel ist stark ausgelaugt und entwickelt nur wenig Strukturfestigkeit. Auch an der Mauerkrone ist das Auseinandertreiben etwa in Mauermitte gut erkennbar.

Im Mauerwerk finden sich Hinweise auf mineralische, hydraulisch gebundene Verpressmörtel.



Abbildung 17: Detail der Außenseite des Turmstumpfes mit Rissen in den Fugenflankenbereichen und starker Rückwitterung



Abbildung 18: Detail der Mauerkrone: Etwa in Mauermitte durchzieht ein fassadenparalleler Riss das Mauerwerk (Pfeil)



Abbildung 19: Südwestecke des Turmstumpfes mit Abriss und drohendem Absturz eines Mauerwerksbereiches

Zur Charakterisierung der Mörtel bzw. deren Feuchte- und Belastungssituation wurden, analog zum Mauerrest der Kapelle, mittels Kernbohrung bzw. händisch Mörtelproben vom Bauwerk entnommen. Die Probenbeschreibungen und Details zu den Untersuchungsergebnissen sind diesem Bericht in ANLAGE II beigefügt.

Die Feuchtegehalte der Steinproben zeigen in den gewählten Probenahmebereichen eine stetige Zunahme der Werte in Richtung Mauerwerksinneres. Dabei sind die absoluten Werte mit bis zu 3,5 M.-% moderat, allerdings bedeuten diese einen Durchfeuchtungsgrad von etwa 60 %.

Die Materialfeuchten der Mörtel liegen teilweise deutlich höher, sind jedoch materialabhängig. Im Mauerwerksinneren wurden Feuchten von ca. 3 M.-% (Verpressmörtel), aber auch über 20 M.-% (Mauermörtel) nachgewiesen. Daher ist zur Beurteilung der Feuchtesituation der Durchfeuchtungsgrad aussagekräftiger. Hier konnte im Mauerwerksinneren teilweise Wassersättigung (Durchfeuchtungsgrad 100 %) nachgewiesen werden. Das Mauerwerksinnere trocknet unter den vorhandenen Bedingungen nie aus. Frostschäden sind demnach zu erwarten. Der Wassereintrag erfolgt zum großen Teil über die Mauerkronen, aber auch über offene Fugen im oberen Teil der Umfassungswände.

Im Rahmen der Probenahmen und der anschließenden Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass das Bauwerk im unteren Bereich überwiegend unter Verwendung von Kalkmörtel errichtet wurde. Allerdings wurde im Mauerwerk auch Gipsmörtel bzw. gipshaltiger Mörtel als Mauermörtel nachgewiesen (Mörtelproben WST/B/5M; WST/B/24 und WST/B25 – s. ANLAGE II zum Bericht). Es ist davon auszugehen, dass die unterschiedlichen Mörtel teilweise zeitgleich beim Bau eingesetzt wurden.

Sämtliche untersuchten Mörtelproben weisen einen hohen Anteil von löslichen Sulfaten auf. Die absolut höchsten Gehalte besitzen dabei die Proben WST/B/1.1M (Verfugmörtel aus Reparatur) und /5M (ursprünglicher Mauermörtel – s. ANLAGE II). Es ist davon auszugehen, dass lösliche Sulfate aufgrund der hohen Feuchtebelastung, des vorhandenen Feuchtegradienten und der damit verbundenen Ionentransporte im gesamten Mauerwerk verteilt wurden, unabhängig von der Eintragsquelle. Als diese kommen zumindest die oberen Mauerwerksbereiche in Betracht, auch wenn das Vorhandensein von gipshaltigen Mörteln auch im unteren Teil des Turmstumpfes nicht auszuschließen ist.

Teilweise wurden hohe Gehalte an löslichen Nitraten und Chloriden nachgewiesen. Auffällig ist die hohe Belastung der Oberflächenprobe des Verugmörtels WST/B/2.1M (s. ANLAGE II). Hier sind extreme Gehalte von Chlorid und Nitrat vorliegend – als Eintragsquelle könnten Streusalze (Chlorid) bzw. Fäkalien (Nitrate) eine Rolle spielen.

3.2 Kirchhofmauer in Kleinbrennbach

3.2.1 Objektbeschreibung

Die Kirchhofmauer in Kleinbrennbach umschließt die barocke, 1715-19 erbaute Bonifatiuskirche und den sie umgebenden Friedhof.

Die Mauer besteht aus einem hammerrechten Schichtenmauerwerk aus gebändertem Keupergips. Das Material stammt aus der unmittelbaren Umgebung von Kleinbrennbach. Die Mauer wurde mit Lehmörtel gemauert. Ob die Fugen mit einem anderen Material (Kalk- oder Gipsmörtel) oberflächlich verschlossen wurden, ist nicht mehr feststellbar. Ein Großteil der Mauerwerksoberflächen wurde in jüngerer Zeit mit einem hydraulischen Verugmörtel versehen.

Die Mauerkrone besteht aus sehr plattigen Gipssteinen. Auch hier wurde in der Vergangenheit ein erheblicher Teil erneuert: Verwendung fanden dichte Sandsteine, versetzt und verugt in hydraulischem Kalkmörtel.

Aufgrund einer starken Durchfeuchtung und Ausspülen des Mauermörtels sind die Mauerwerksfugen über große Bereiche ausgewaschen und offen. Auch ist eine Schwächung der Strukturfestigkeit festzustellen. Ein Teilabschnitt der Mauer war zum Zeitpunkt der Bearbeitung eingestürzt. Hier waren umfangreiche Auswickelungen und ein hoher Lehmörtelanteil im Inneren der Mauer vorhanden (Mauerdicke ca. 60 cm).



Abbildung 20: Teilansicht der Kirchhofmauer



Abbildung 21: Detail der Mauer mit den stark ausgewaschenen Fugen

	
<p>Abbildung 22: Oberseite der Mauer mit teilweise neu versetzten Sandsteinplatten und gerissenen Fugenflanken</p>	<p>Abbildung 23: Teilweise eingebrochenes Mauerstück. Hier ist sehr gut der innere Aufbau (Lehmmörtel, Auswickelungen mit kleinerformatigen Steinen) erkennbar.</p>

3.2.2 Zustand, Belastungssituation und Schäden

(Untersuchungen am Mauerwerk s. ANLAGE III zum Bericht)

Aufgrund der oberflächigen Auswitterung des Lehmmörtels ist die Mauer in großen Abschnitten substantiell gefährdet. Es besteht Einsturzgefahr – ein Teilbereich an der Westseite war bereits eingefallen und wurde zwischenzeitlich wieder aufgebaut. Stabilisierend wirkt die Mauerkrone, da hier ein fester, hydraulisch gebundener Verugmörtel eingesetzt wurde.

Der Feuchteintrag in die Mauer erfolgt im Wesentlichen über die Niederschläge und die Mauerkrone. Es wurden extrem hohe Feuchtebelastungen (Probenachse KBR/KM/2 mit Materialfeuchten zwischen 20 und 24 M.-%) festgestellt, wobei die Feuchtebelastung im oberen Teil der Mauer höher war als im Sockelbereich.

Aufgrund des verwendeten Gipssteines im Mauerwerk waren für den Mörtel bereits hohe Sulfatbelastungen zu vermuten. Dies bestätigte sich bei den Untersuchungen auf lösliche Anionen und Kationen. Ein Teil des aus dem Steinmaterial gelösten Sulfates bildete mit Nitraten und Magnesium lösliche Verbindungen. Die Nitratquelle ist in der Örtlichkeit (Friedhof) zu sehen, Magnesium kann sowohl aus tonigen Bestandteilen des Lehmmörtels als auch aus früheren Reparaturen (dolomithaltiger Mörtel) her stammen. Starke Gipskrusten auf Mörteln und Mauerwerksmaterial lassen auf erhebliche Umlagerungen gelösten Materials schließen.

4 Arbeitspaket 3: Entwicklung der Materialien im Labormaßstab

Aufstreichbare Flächenabdichtungssysteme auf der Grundlage von Bitumenacrylat haben sich in der Praxis bewährt. Mit Hilfe eines Bitumenacrylatsystems konnte beispielsweise durch die MFA Weimar eine Lösung für die Abdichtung der Mauerkronen der Wartburg bei Eisenach gefunden werden. Die ausgesprochen guten material- und verarbeitungstechnischen Eigenschaften des Produktes gaben Anlass, es als Grundlage für die Entwicklung eines Systems zur Anbindung und Entkopplung zwischen hydraulisch und gipsgebundenen Mauerwerksbereichen aufzunehmen. Allerdings musste das vorhandene Produkt hinsichtlich der Eigenschaften und der Komponenten modifiziert werden, um den Anforderungen zu entsprechen.

4.1 Modifizierung des Abdichtungssystems hinsichtlich der Materialkomponenten

4.1.1 Substitution der Füllstoffe

Das Flächenabdichtungssystem WEBAC 5611 des Herstellers WEBAC Chemie GmbH aus Barsbüttel bei Hamburg ist ein System auf Basis einer Bitumenacrylatdispersion. Die Dispersion ist im Verarbeitungszustand streichfähig und kann mittels Pinsel oder Quast auf den Untergrund aufgetragen werden. Die abdichtende Wirkung bildet sich im Zusammenhang mit dem Entzug der Wasserphase aus der Dispersionskomponente. Damit verbunden ist eine Verfestigung der aufgetragenen Dichtschicht. Der Entzug der Wasserphase erfolgt durch das Vermischen mit einem reaktiven Füllstoff. Herstellerseitig wird dafür ein Portlandhüttenzement CEM II B-S 32,5 R¹ vorgegeben, der in einem Masseverhältnis von 1:0,8 (Dispersion:Zement) gemischt wird. Das Wasser wird der Dispersion durch die Reaktion mit dem Zement entzogen. Hieraus ergeben sich gleich zwei Vorteile: Die aufgetragene Dichtschicht wird nach kurzer Zeit stabil und weist durch die hydraulische Erhärtung des Zementes eine erhöhte mechanische Festigkeit auf. Aufgrund der Unverträglichkeit des werksseitig vorgegebenen reaktiven Füllstoffes mit sulfathaltigen Materialien musste dieser substituiert werden. In Betracht gezogen wurden hierfür sowohl inerte als auch reaktive Füllstoffe. Hierbei war vor allem die Fähigkeit des Wasserentzuges aus der Dispersion von Interesse. Aus diesem Grund wurden folgende Füllstoffe ausgewählt:

Inerte Füllstoffe: Kaolin, Natrium-Bentonit
Reaktive Füllstoffe: Portlandhüttenzement CEM II B 42,5²
Spezialbindemittel

Das Spezialbindemittel ist ein patentiertes Produkt des Mörtelherstellers tubag. Es dient als Grundlage für Mörtel und für Verpressmaterialien und wird vom Hersteller als „gipsverträglich“ deklariert. In einem Forschungsprojekt der MFA Weimar konnte im Rahmen eines Langzeitversuches der Beständigkeit verschiedener Mörtel gegenüber einem „inneren Sulfatangriff“ für dieses Material eine ausreichende Langzeitbeständigkeit nachgewiesen werden. /5/ In den vorgenommenen Untersuchungen erfolgte daher der Einsatz des Verpressmaterials HSV-p 00, welches einen hohen Anteil des Spezialbindemittels enthält und den Vorteil der gesicherten Verfügbarkeit besitzt.

In der Verarbeitungsvorschrift des Herstellers WEBAC ist zuerst ein Auftrag der reinen Bitumenacrylatdispersion zur Verbesserung der Anbindung an den Untergrund vorgesehen, danach zumindest ein zweiter Auftrag unter Zugabe von Füllstoff.

Im Rahmen der Substitution des ursprünglich einzusetzenden Füllstoffes sollte auch der Einfluss der Auftragstechnologien („frisch-in-frisch“ bzw. nach Standzeit), der Anzahl der Aufträge sowie des Einsatzes einer weiteren Haftbrücke zum anzugießenden bzw. anschließend aufzubringenden Mörtel untersucht werden.

¹ CEM II B-S 32,5 R nach DIN EN 197-1 Portlandhüttenzement mit erhöhtem Zusatz von Hüttsand (21-35 M.-%), einer Normfestigkeit von 32,5 MPa und hoher Anfangsfestigkeit

² Die Verwendung des Portlandhüttenzementes erfolgte nach Rücksprache mit der WEBAC Chemie GmbH

Mit den verschiedenen Füllstoffen wurden in unterschiedlichen Masseverhältnissen Probemischungen hergestellt, um deren Verarbeitungsfähigkeit zu untersuchen. Als Kriterium der Masseverhältnisse wurde eine vergleichbare Konsistenz des Frischmaterials festgelegt.

Gleichzeitig erfolgten erste Versuche, um die Abdichtungseigenschaften der unterschiedlichen Füllstoffrezepturen zu testen. Dafür wurden Mörtelprismen (hydraulischer Kalkmörtel M2,5, Prismendimension 4x4x16 cm³) mittig gebrochen und die Bruchfläche mit der Dichtschicht versehen. Auf die Dichtschicht wurde Mörtel angegossen. Die Prismen wurden dann in Wasser gestellt (Eintauchtiefe 40 mm) und die Massenzunahme über einen Zeitraum von 23 Tagen ermittelt.

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die nach den vorbeschriebenen Kriterien festgelegten Rezepturen und Auftragstechnologien für die Verbundkörper wiedergegeben.

Tabelle 1: Rezepturen der Füllstoffsubstituenten und Auftragstechnologien für die Dicht- und Entkoppungsschicht

Probenbez.	1.1a-1.1c	1.2a-1.2c	2.1a - 2.1c	2.2a - 2.2c
Dispersion	WEBAC 5611	WEBAC 5611	WEBAC 5611	WEBAC 5611
Füllstoff	Zement CEM II B 42,5	Zement CEM II B 42,5	tubag HSV-p 00	tubag HSV-p 00
Masseverh. Disp. / Füllstoff	1 : 0,8	1 : 0,8	1 : 0,8	1 : 0,8
Aufbau Dichtschicht	1x WEBAC 5611 ungefüllt, 1x WEBAC 5611 + Füllstoff, 1x WEBAC 5611 ungefüllt	1x WEBAC 5611 ungefüllt, 2x WEBAC 5611 + Füllstoff, 1x WEBAC 5611 ungefüllt	1x WEBAC 5611 ungefüllt, 1x WEBAC 5611 + Füllstoff, 1x WEBAC 5611 ungefüllt	1x WEBAC 5611 ungefüllt, 2x WEBAC 5611 + Füllstoff, 1x WEBAC 5611 ungefüllt
Bemerkungen	Dispersion + Füllstoff steifen nach ca. 1-2 min an, Auftrag Dispersion + Füllstoff 1 Tag nach Erstauftrag ungefüllt, letzter Aufstrich ungefüllt dann 4 Tage nach Aufstrich Dispersion und Füllstoff, Aufbringen obere Schicht Mörtel 1 Tag nach letztem Aufstrich WEBAC 5611 ungefüllt	Dispersion + Füllstoff steifen nach ca. 1-2 min an, Auftrag Dispersion + Füllstoff 1 Tag nach Erstauftrag pur, 2. Auftrag Dispersion + Füllstoff 3 Tage nach Erstauftrag, Aufstrich ungefüllt dann 1 Tag nach 2. Aufstrich Dispersion und Füllstoff, Aufbringen obere Schicht Mörtel 1 Tag nach letztem Aufstrich WEBAC 5611 ungefüllt	Dispersion + Füllstoff steifen nach ca. 1-2 min an, Auftrag Dispersion + Füllstoff 1 Tag nach Erstauftrag ungefüllt, Aufstrich ungefüllt dann 4 Tage nach Aufstrich Dispersion und Füllstoff, Aufbringen der oberen Schicht Mörtel 1 Tag nach letztem Aufstrich WEBAC 5611 ungefüllt	Dispersion + Füllstoff steifen nach ca. 1-2 min an, Auftrag Dispersion + Füllstoff 1 Tag nach Erstauftrag ungefüllt, 2. Auftrag Dispersion + Füllstoff 3 Tage nach Erstauftrag, Aufstrich ungefüllt dann 1 Tag nach 2. Aufstrich Dispersion und Füllstoff, Aufbringen der oberen Schicht Mörtel 1 Tag nach letztem Aufstrich WEBAC 5611 ungefüllt
Probenbez.	3.1a - 3.1c	3.2a - 3.2c	4.1a - 4.1c	4.2a - 4.2c
Dispersion	WEBAC 5611	WEBAC 5611	WEBAC 5611	WEBAC 5611
Füllstoff	Kaolin (Dorfner FP80)	Kaolin (Dorfner FP80)	Na-Bentonit	Na-Bentonit
Masseverh. Disp. / Füllstoff	1 : 0,75*	1 : 0,75*	1 : 0,275*	1 : 0,275*
Aufbau Dichtschicht	1x WEBAC 5611 ungefüllt, 1x WEBAC 5611 + Füllstoff, 1x WEBAC 5611 ungefüllt	1x WEBAC 5611 ungefüllt, 2x WEBAC 5611 + Füllstoff, 1x WEBAC 5611 ungefüllt	1x WEBAC 5611 ungefüllt, 1x WEBAC 5611 + Füllstoff, 1x WEBAC 5611 ungefüllt	1x WEBAC 5611 ungefüllt, 2x WEBAC 5611 + Füllstoff, 1x WEBAC 5611 ungefüllt
Bemerkungen	Dispersion + Füllstoff steifen nach ca. 1-2 min an, Auftrag Dispersion + Füllstoff 1 Tag nach Erstauftrag ungefüllt, letzter Aufstrich ungefüllt dann 4 Tage nach Aufstrich Dispersion und Füllstoff, Aufbringen obere Schicht Mörtel 1 Tag nach letztem Aufstrich WEBAC 5611 ungefüllt	Dispersion + Füllstoff steifen nach ca. 1-2 min an, Auftrag Dispersion + Füllstoff 1 Tag nach Erstauftrag pur, 2. Auftrag Dispersion + Füllstoff 3 Tage nach Erstauftrag, Aufstrich ungefüllt dann 1 Tag nach 2. Aufstrich Dispersion und Füllstoff, Aufbringen obere Schicht Mörtel 1 Tag nach letztem Aufstrich WEBAC 5611 ungefüllt	Dispersion + Füllstoff steifen nach ca. 1-2 min an, Auftrag Dispersion + Füllstoff 1 Tag nach Erstauftrag ungefüllt, Aufstrich ungefüllt dann 4 Tage nach Aufstrich Dispersion und Füllstoff, Aufbringen der oberen Schicht Mörtel 1 Tag nach letztem Aufstrich WEBAC 5611 ungefüllt	Dispersion + Füllstoff steifen nach ca. 1-2 min an, Auftrag Dispersion + Füllstoff 1 Tag nach Erstauftrag ungefüllt, 2. Auftrag Dispersion + Füllstoff 3 Tage nach Erstauftrag, Aufstrich ungefüllt dann 1 Tag nach 2. Aufstrich Dispersion und Füllstoff, Aufbringen der oberen Schicht Mörtel 1 Tag nach letztem Aufstrich WEBAC 5611 ungefüllt

* Zugabeverhältnis bis zum Erreichen einer vergleichbaren verarbeitbaren Konsistenz wie bei den reaktiven Füllstoffen



Abbildung 24: Gebrochene Mörtelprismen mit aufgetragener Dichtschicht auf den Bruchflächen



Abbildung 25: Einbringen des Mörtels über der Dichtschicht



Abbildung 26: Lagerung der Mörtelprismen in Wasser

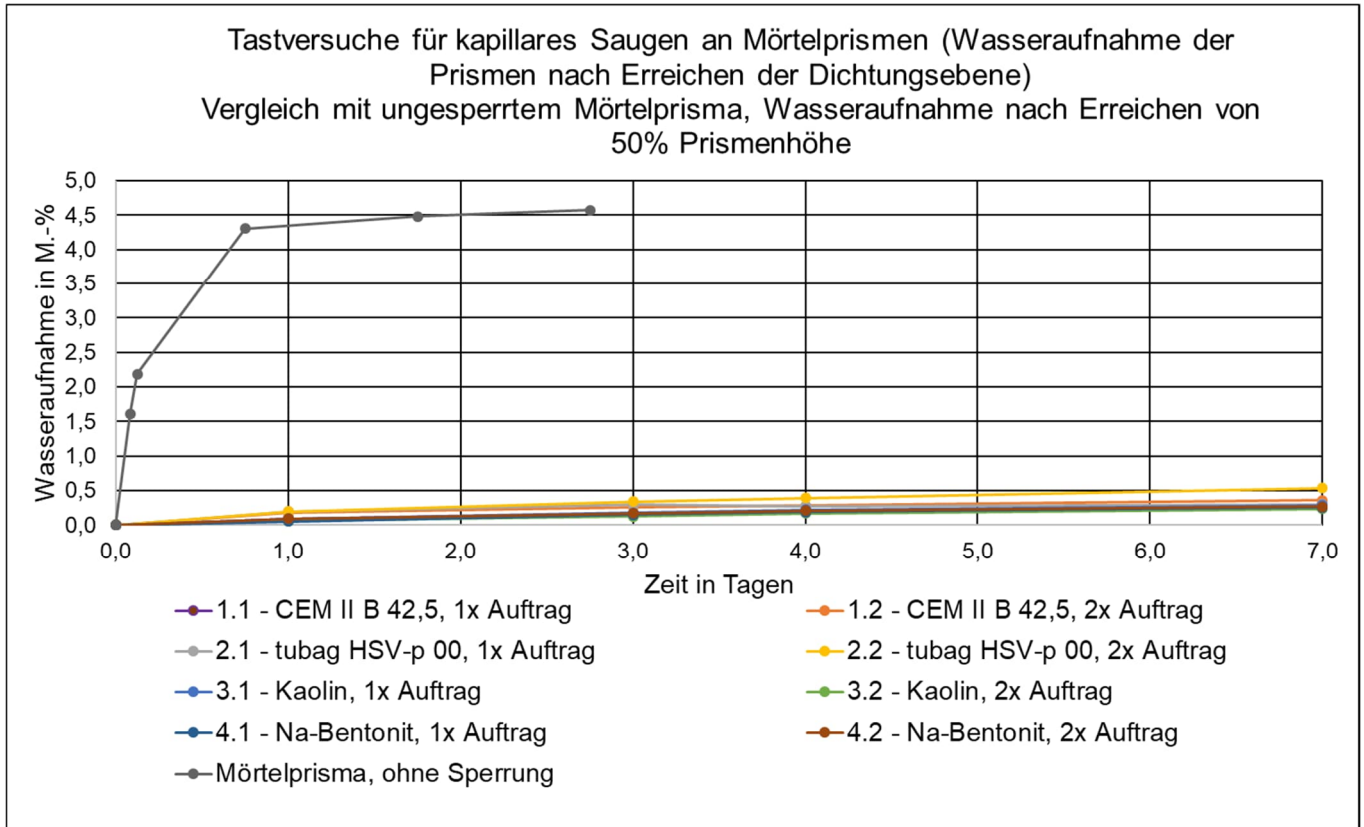


Abbildung 27: Tastversuche für kapillares Saugen an Mörtelprismen – Vergleich der verschiedenen Auftragsvarianten und Füllstoffe in der Dicht- und Entkopplungsschicht (vgl. auch Tabelle 1) und mit ungesperstem Mörtelprisma, dargestellte Zeitachse 7 Tage, Mittelwerte aus jeweils 3 Proben

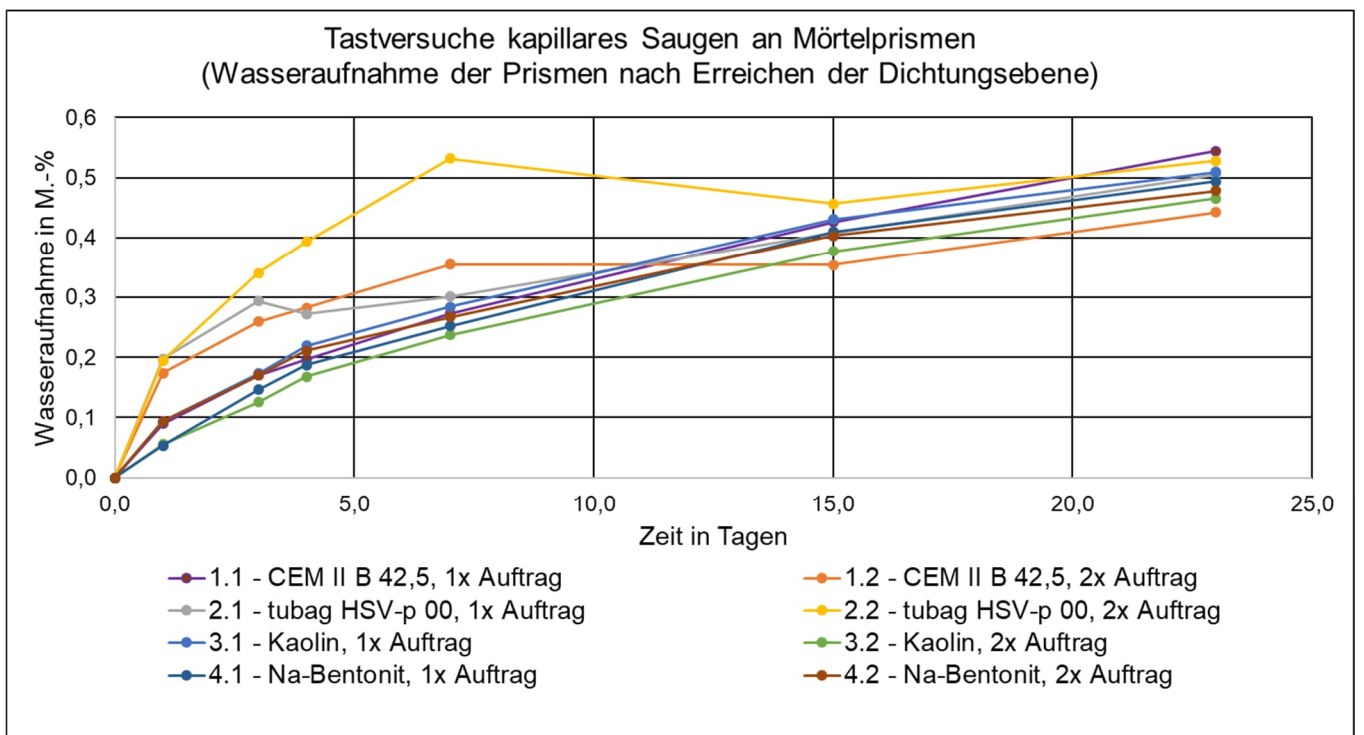


Abbildung 28: Diagramm wie in Abbildung 27, jedoch ohne Vergleich mit den Werten des ungesperstem Mörtelprismas, dargestellte Zeitachse 23 Tage

Die Auswertung des Wasseraufnahmeverhaltens zeigt, dass für sämtliche inerten und reaktiven Füllstoffe ähnliche Werte erreicht worden sind. Auch die Auftragstechnologien (ein- oder zweimaliger Auftrag) spielen offensichtlich keine signifikante Rolle. Bei allen Prismen liegen die Wasseraufnahmekoeffizienten über den Messzeitraum von 23 Tagen zwischen 0,05 (4.2 - Natrium-Bentonit, zweimaliger Auftrag) und 0,06 kg/m²h^{0,5} (1.1 - CEM II B 42,5). Interessant ist der Verlauf der Wertekurve in Abbildung 28 für die Prismen 1.2, 2.1 und 2.2. Hier ist für den Zeitraum bis zu etwa 10 Tagen eine vergleichsweise erhöhte Wasseraufnahme durch die Dichtungsschicht erkennbar, die sich danach aber wieder auf einen „Normalwert“ angleicht. Möglicherweise sind dafür Reaktionsprozesse der reaktiven Füllstoffe eine Ursache.

Die Vortests erbrachten das Ergebnis, dass sämtliche verwendeten Füllstoffe für den Einsatz in dem Abdichtungs- und Entkopplungssystem geeignet sind.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Wasseraufnahmeverhalten an Mörtelprismen wurden im Anschluss an Mörtelscheiben-Verbundkörpern verifiziert. Außerdem sollte der Einfluss von hydrophobierenden Zusätzen in den Füllstoffen untersucht werden. Dafür wurden die Füllstoffe mit verschiedenen Anteilen an Zinkstearat ausgerüstet.

Die Versuchseinrichtung wurde dahingehend verändert, dass nur noch kapillares Saugen vorlag.

Die Mörtelscheiben (Durchmesser 100 mm) aus einem hydraulischen Kalkmörtel M2,5 wurden einseitig mit den verschiedenen Dicht- und Füllstoffkombinationen beschichtet. Darauf wurde wiederum eine weitere Mörtelschicht aufgebracht. In Tabelle 2 sind die Rezepturen für die verschiedenen Prüfkörpervarianten (jeweils 3 Prüfkörper pro Variante) wiedergegeben. Als Kaolinkomponente wurde Kaolin Dorfner FP80 verwendet.

Tabelle 2: Rezepturmatrix für die Verbundprüfkörper (Mörtelscheiben)

Mörtelscheiben, mittig mit Abdichtungsschicht versehen (SAKRET M2,5)

D = 100 mm, Dicke ca. 40 mm

Füllstoffrezepturen	
Zugabe CEM II B 45,5 : webac 5611:	0,8 : 1 MT
Zugabe tubag HSV-p 00: webac 5611:	0,8 : 1 MT
Zugabe Kaolin : webac 5611:	0,75 : 1 MT
Zugabe Zn-Stearat bez. auf Füllstoff:	0,1 bzw. 0,2 M.-%
Wartezeit Schichtaufträge mit Füllstoff:	jeweils 2 Tage

Nr.	webac 5611	CEM II B 42,5	tubag HSV-p 00	Kaolin	Zink-Stearat 0,1 M.-%	Zink-Stearat 0,2 M.-%	Anzahl Aufträge mit Füllstoff (2. bzw. 3. Auftrag)
10	x	x					1
11	x	x			x		1
12	x	x				x	1
13	x		x				1
14	x		x				2
15	x		x		x		1
16	x		x			x	1
17	x		x		x		2
18	x		x			x	2
19	x			x			1
20	x			x	x		1
21	x			x		x	1

- 1. Auftrag: ohne Füllstoff
- 2. bzw. 3. Auftrag: mit Füllstoff
- 3. bzw. 4. Auftrag: ohne Füllstoff



Abbildung 29: Mörtelscheiben mit frisch aufgetragener Dicht- und Entkopplungsschicht

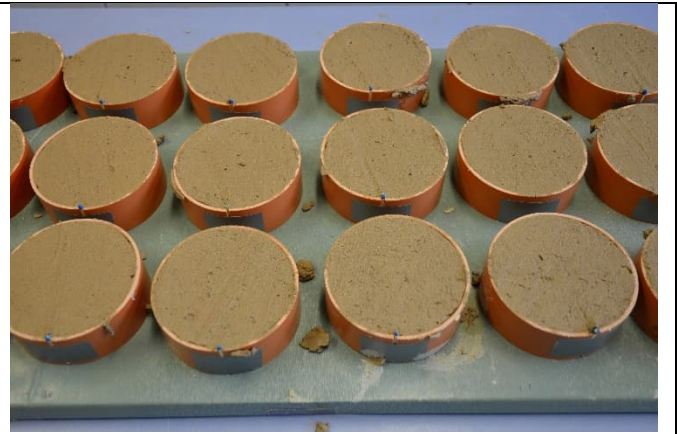


Abbildung 30: Aufbringen des Mörtels über der Dichtschicht



Abbildung 31: Versuchsanordnung für die Bestimmung der Wasseraufnahme durch kapillares Saugen. Oben rechts in der Schale liegen zwei Vergleichsprüfkörper ohne mittige Dicht- und Entkopplungsschicht.

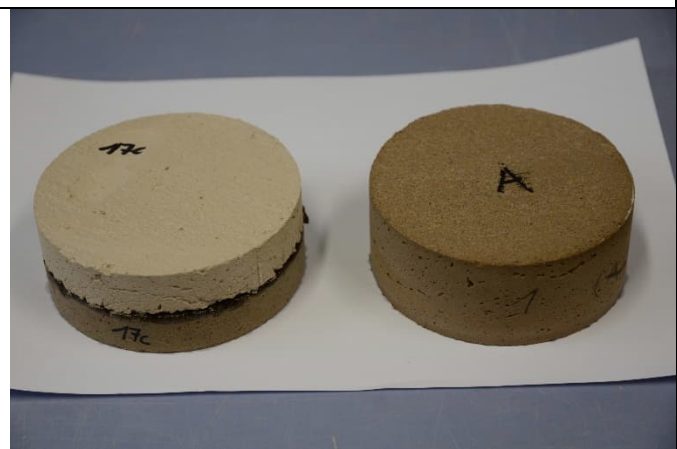


Abbildung 32: Beispielhafte Darstellung der Prüfkörper während der Untersuchungen, links mit mittlerer Dicht- und Entkopplungsschicht, rechts zum Vergleich ohne.

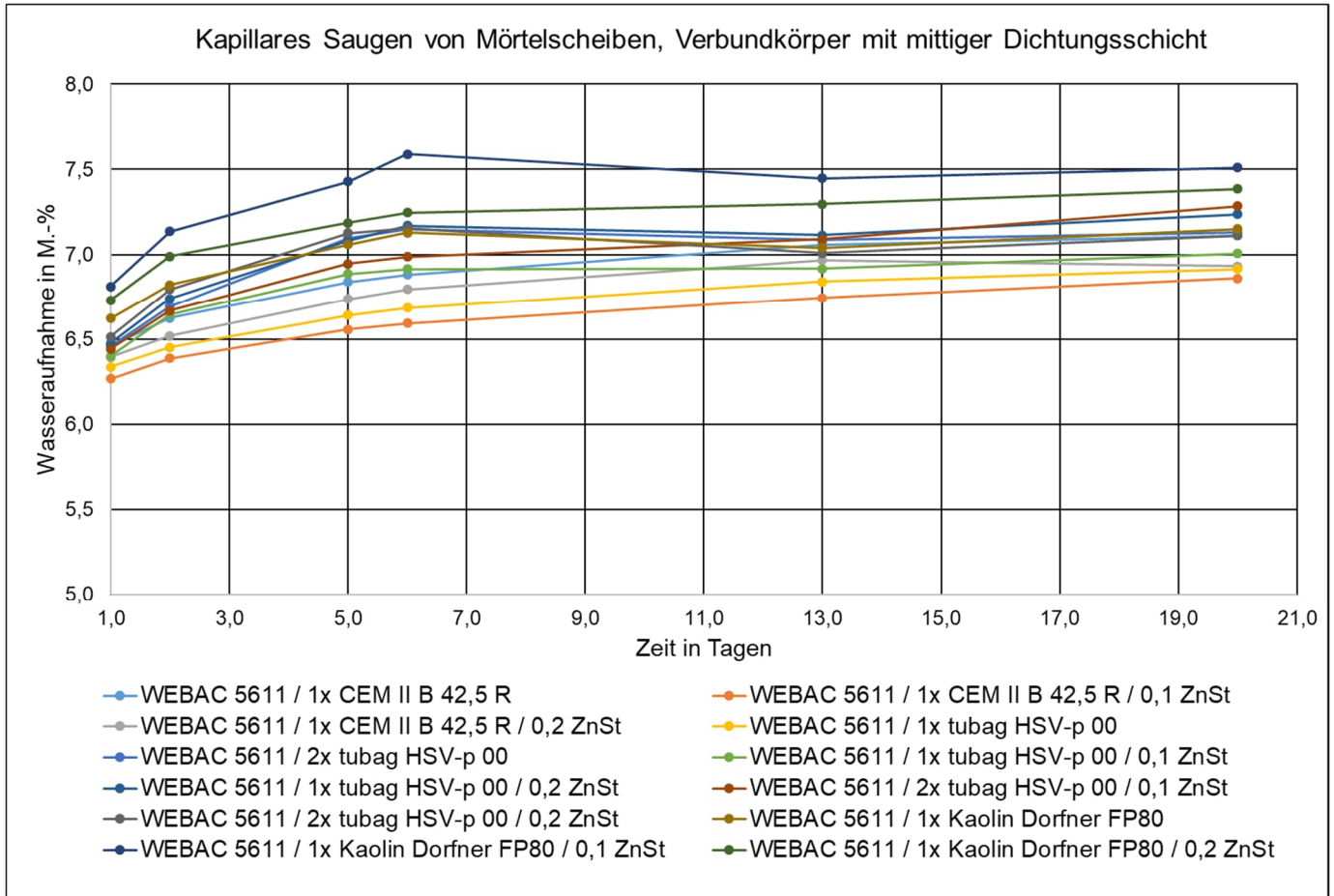


Abbildung 33: Untersuchungen zur Wasseraufnahme durch kapillares Saugen an Verbundprüfkörpern (Mörtelscheiben) – Vergleich der verschiedenen Auftragsvarianten und Füllstoffe in der Dicht- und Entkopplungsschicht (vgl. auch Tabelle 2) und mit ungesperrter Mörtelscheibe. Bei letzterer war nach 6 Stunden Wassersättigung festzustellen (im Diagramm nicht wiedergegeben). In der Darstellung wird die relevante Zeitachse zwischen 1 und 20 Tagen dargestellt. Es wurden jeweils die Mittelwerte aus 3 Einzelproben berücksichtigt. (ZnSt....Zinkstearat, Mengenangabe in Masseprozent)

In der Tabelle 3 sind die prozentualen Wasseraufnahmen und Wasseraufnahmekoeffizienten für die Verbundprüfkörper für verschiedene Zeiträume wiedergegeben.

Tabelle 3: Wasseraufnahmen und Wasseraufnahmekoeffizienten für die Verbundprüfkörper aus Tabelle 2 für verschiedene Zeiträume (T1 ... 1 Tag nach Beginn der Wasseraufnahme etc.)

Probe	Beschreibung	Wasseraufnahme			Wasseraufnahmekoeffizient		
		WA in T1-T2 %	WA in T6-T20 %	WA in T1-T20 %	w T1-T2 kg/(m ² *h ^{0,5})	w T6-T20 kg/(m ² *h ^{0,5})	w T1-T20 kg/(m ² *h ^{0,5})
10	WEBAC 5611 / 1x CEM II B 42,5 R	0,17	0,23	0,65	0,021	0,008	0,019
11	WEBAC 5611 / 1x CEM II B 42,5 R / 0,1 ZnSt	0,12	0,27	0,59	0,016	0,009	0,017
12	WEBAC 5611 / 1x CEM II B 42,5 R / 0,2 ZnSt	0,12	0,14	0,54	0,016	0,005	0,016
13	WEBAC 5611 / 1x tubag HSV-p 00	0,11	0,23	0,58	0,015	0,008	0,017
14	WEBAC 5611 / 2x tubag HSV-p 00	0,23	-0,02	0,67	0,030	-0,001	0,019
15	WEBAC 5611 / 1x tubag HSV-p 00 / 0,1 ZnSt	0,25	0,09	0,61	0,032	0,003	0,018
16	WEBAC 5611 / 1x tubag HSV-p 00 / 0,2 ZnSt	0,27	0,07	0,76	0,033	0,002	0,021
17	WEBAC 5611 / 2x tubag HSV-p 00 / 0,1 ZnSt	0,23	0,30	0,84	0,028	0,010	0,024
18	WEBAC 5611 / 2x tubag HSV-p 00 / 0,2 ZnSt	0,28	-0,04	0,60	0,036	-0,001	0,017
19	WEBAC 5611 / 1x Kaolin Dorfner FP80	0,20	0,02	0,53	0,025	0,001	0,015
20	WEBAC 5611 / 1x Kaolin Dorfner FP80 / 0,1 ZnSt	0,32	-0,08	0,70	0,040	-0,003	0,019
21	WEBAC 5611 / 1x Kaolin Dorfner FP80 / 0,2 ZnSt	0,26	0,14	0,65	0,032	0,005	0,018

Die Untersuchungen erbrachten keine Hinweise auf einen signifikanten Einfluss der Stearatzugaben auf das Wasseraufnahmeverhalten der Verbundprüfkörper. Auch die Wahl des Füllstoffes (reaktiv oder inert) verändert bei den untersuchten Proben die Wasseraufnahme nicht wesentlich. Offensichtlich werden dadurch die sperrenden Eigenschaften der Dicht- und Entkopplungsschicht nicht beeinflusst. Auch hinsichtlich der Dicke dieser Sperrschicht (dargestellt durch die Anzahl der Aufträge) lassen sich keine Zusammenhänge mit deren sperrender bzw. entkoppelnder Wirkung ableiten.

In einem weiteren Saugversuch wurde der Einfluss verschiedener Metallstearate (Aluminium- und Zinkstearat) auf die Wasseraufnahme- bzw. -durchdringungseigenschaften der Abdichtungs- und Entkopplungsschicht untersucht. In diesem Falle kamen einseitig beschichtete Porenbetonscheiben zur Anwendung. Diese wurden aus 5 cm starken Platten herausgeschnitten. Die Porenbetonscheiben (D = 10 cm) wurden einseitig mit dem jeweiligen Abdichtungssystem beaufschlagt, die Mantelflächen mit Paraffin abgedichtet. Die Tabelle 4 gibt die Rezepturen der einzelnen Prüfkörper wieder, die Probenserien umfassten jeweils 3 Prüfkörper je Rezeptur. Die Abdichtungsfläche war jeweils Saugfläche.

Tabelle 4: Rezepturmatrix für die Prüfkörper (Porenbetonscheiben)
 Porenbetonscheiben, einseitig mit Abdichtungsschicht versehen
 D = 100 mm, Dicke ca. 50 mm

Füllstoffrezepturen				
Zugabe tubag HSV-p 00: webac 5611:				0,8 : 1 MT
Wartezeit Schichtaufträge mit Füllstoff:				jeweils 2 Tage
Stearatzugabe bezogen auf Füllstoff in M.-%				
Nr.	WEBAC 5611	tubag HSV-p 00	Zn-Stearat 0,5 M.-%	Al-Stearat 0,5 M.-%
50	x	x		
51	x	x	x	
52	x	x		x

- 1. Auftrag: ohne Füllstoff
- 2. Auftrag: mit Füllstoff

Wie aus der Rezepturmatrix erkennbar ist, wurde der Stearatanteil jeweils auf 0,5 M.-% erhöht, um hier signifikante Wirkungen feststellen zu können. In Abbildung 34 sind die Wasseraufnahmen der Prüfkörper graphisch dargestellt.

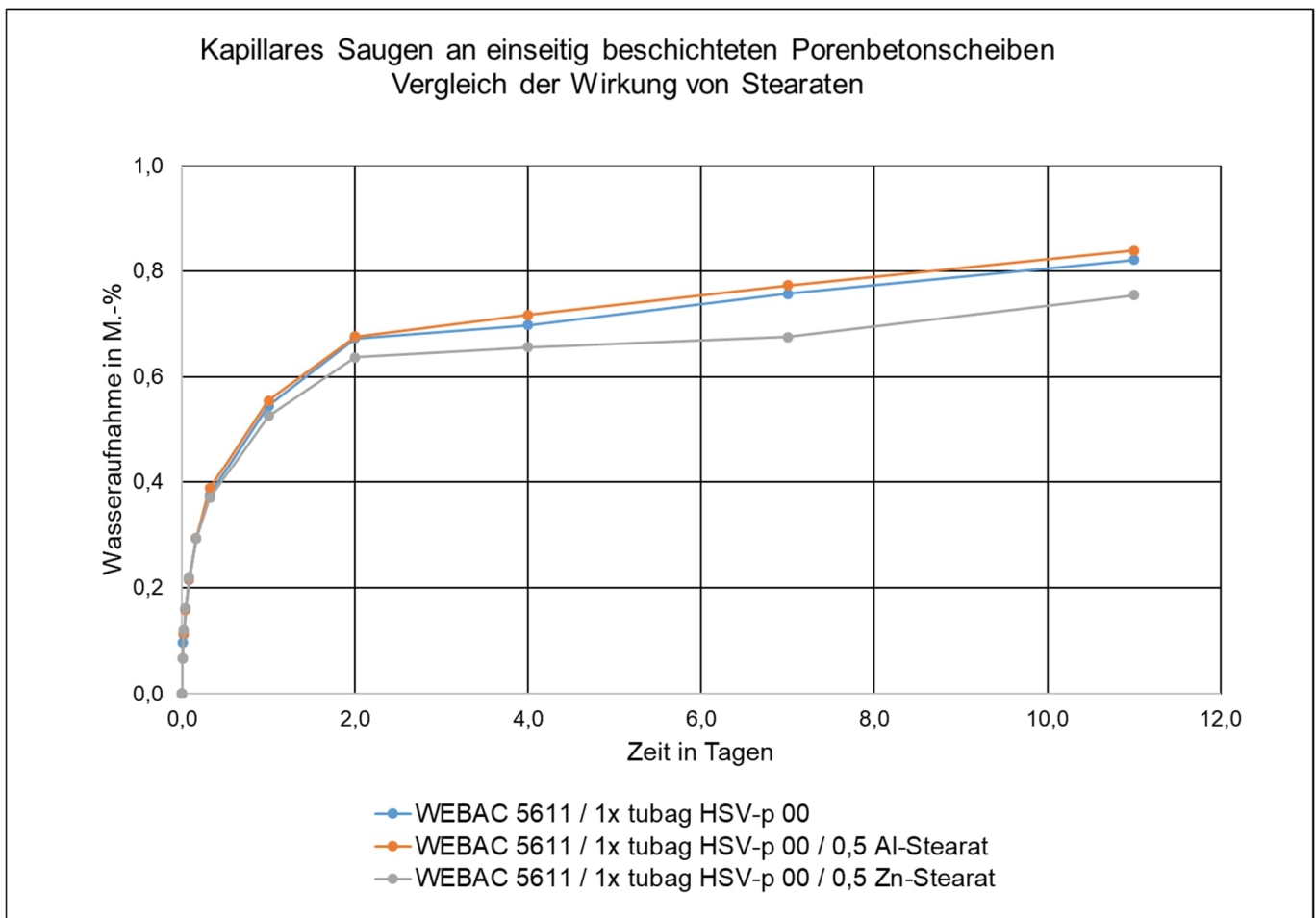


Abbildung 34: Ermittlung der Wasseraufnahme durch kapillares Saugen an einseitig beschichteten Porenbetonprüfkörpern – Vergleich des Einflusses von verschiedenen Stearaten in der Dicht- und Entkopp- lungsschicht. In der Darstellung wird die relevante Zeitachse zwischen 0 und 11 Tagen dargestellt. Es wurden jeweils die Mittelwerte aus 3 Einzelproben berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen können einen signifikanten Einfluss von Stearaten auf das Wasseraufnahmeverhalten wiederum nicht bestätigen.

4.1.2 Substitution der Dispersionskomponente

In Absprache mit dem Hersteller des Bitumenacrylatsystems, der Fa. WEBAC GmbH, wurde im Werkslabor ein bitumenfreies Produkt als Sonderrezeptur hergestellt und für weitere Tests zur Verfügung gestellt (im Folgenden als „WEBAC 5611 weiß“ bezeichnet). Wirksame Komponente ist hierbei ein Gemisch aus Acrylat- und Methacrylat-Dispersionen.

Mit der Verwendung des bitumenfreien Abdichtungssystems werden folgende Ziele verbunden:

- größere Akzeptanz des Systems in sensiblen Anwendungsbereichen (Vermeidung des „Schwarzer Blocker“-Eindruckes der beschichteten Fläche)
- Möglichkeit der besseren Steuerung der Diffusionseigenschaften der Abdichtungs- und Entkopplungsschicht

Zum direkten Vergleich der Wasseraufnahmeeigenschaften mit dem bitumenhaltigen Material wurden erneut Testkörper hergestellt. In diesem Falle kamen wieder die einseitig beschichteten Porenbetonscheiben zur Anwendung (Saugfläche = Beschichtungsfläche). Auch hierbei erfolgte die Untersuchung des Einflusses von Stearaten und der Anzahl der Aufträge der Beschichtung auf die Wasseraufnahmeeigenschaften.



Abbildung 35: Porenbetonscheiben mit unterseitiger Abdichtungsschicht (= Saugfläche)



Abbildung 36: Prüfkörper während der Untersuchung zum Wasseraufnahmeverhalten. Die Porenbetonscheibe in Bildmitte weist einen Durchbruch der Abdichtungsschicht auf.

Tabelle 5: Rezepturmatrix für die Prüfkörper (Porenbetonscheiben)

Porenbetonscheiben, einseitig mit Abdichtungsschicht versehen
 D = 100 mm, Dicke ca. 50 mm

Füllstoffrezepturen	
Zugabe CEM II B 45,5 : WEBAC 5611:	0,8 : 1 MT
Zugabe tubag HSV-p 00 : WEBAC 5611:	0,8 : 1 MT
Zugabe Kaolin : WEBAC 5611:	0,75 : 1 MT
Zugabe CEM II B 45,5 : WEBAC 5611 weiß:	0,8 : 1 MT
Zugabe tubag HSV-p 00 : WEBAC 5611 weiß:	0,8 : 1 MT
Zugabe Zn- bzw. Al-Stearat bez. auf Füllstoff:	0,5 M.-%
Wartezeit Schichtaufträge mit Füllstoff:	jeweils 2 Tage

Nr.	WEBAC 5611	WEBAC 5611 weiß	CEM II B 42,5	tubag HSV-p 00	Kaolin	Zn-Stearat 0,5 M.-%	Al-Stearat 0,5 M.-%	Anzahl Aufträge mit Füllstoff (2. bzw. 3. Auftrag)
30	x		x					1
31	x		x			x		1
32	x			x				1
33	x			x				2
34	x			x		x		2
35	x				x			1
36	x				x	x		1
60		x	x					1
61		x	x				x	1
62		x		x				1
63		x		x				2
64		x		x			x	2

- 1. bzw. 2. Auftrag: ohne Füllstoff
- 2. bzw. 3. Auftrag: mit Füllstoff

In der nachfolgenden Abbildung sind die Wasseraufnahmen grafisch dargestellt.

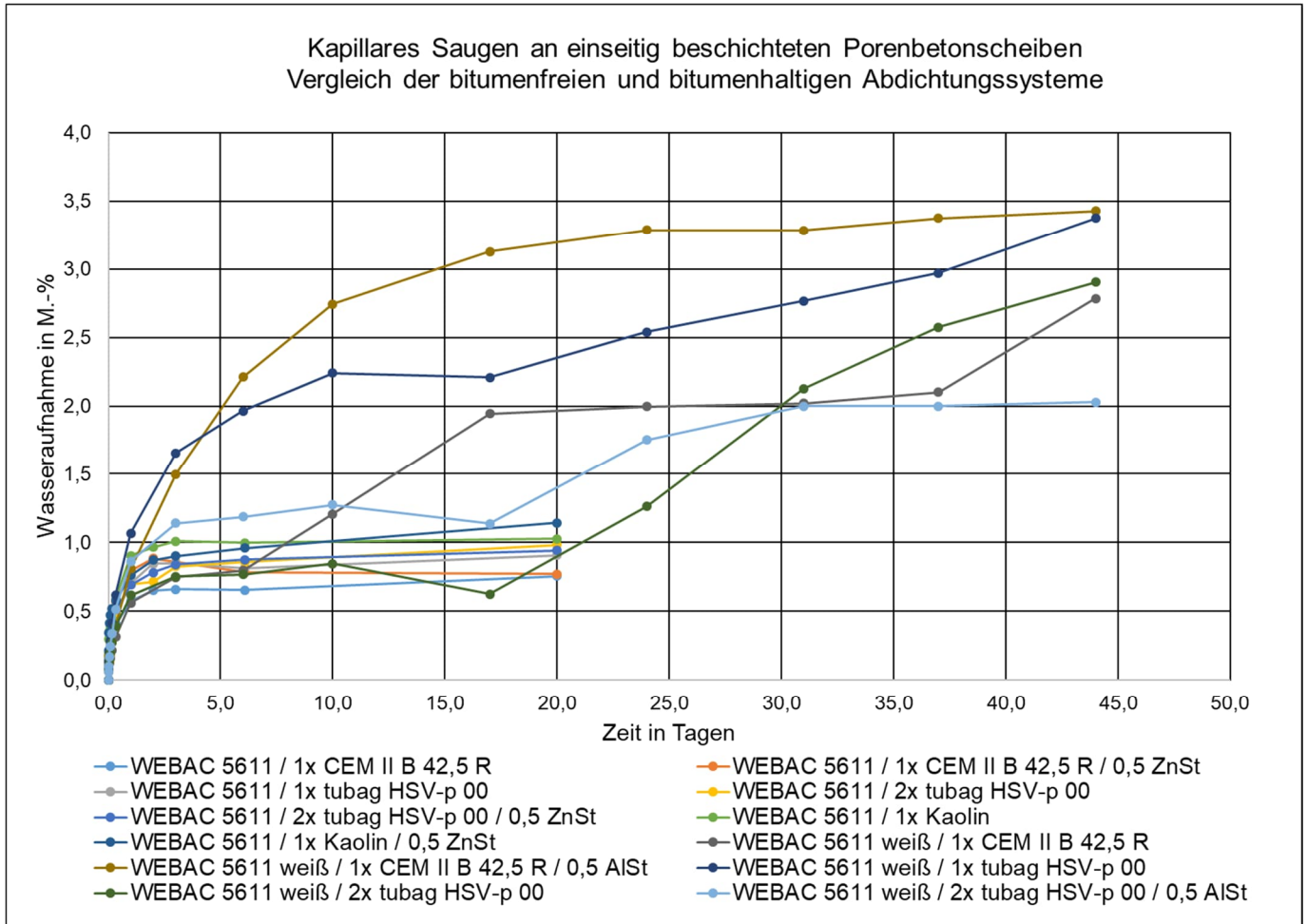


Abbildung 37: Ermittlung der Wasseraufnahme durch kapillares Saugen an einseitig beschichteten Porenbetonprüfkörpern – Vergleich der bitumenhaltigen und bitumenfreien Variante der Dicht- und Entkopplungsschicht unter Berücksichtigung unterschiedlicher Füllstoffe und zugesetzter Stearate. In der Darstellung wird die relevante Zeitachse zwischen 0 und 20 bzw. 44 Tagen dargestellt. Es wurden jeweils die Mittelwerte aus 3 Einzelproben berücksichtigt.

Im Falle der bitumenhaltigen Abdichtungs- und Entkopplungsschicht konnten keine signifikanten Einflüsse der Füllstoffe, der Anzahl der Schichtaufträge und der zugesetzten Stearate auf die Wasseraufnahme festgestellt werden. Im Unterschied dazu sind bei den Prüfkörpern mit bitumenfreier Abdichtungs- und Entkopplungsschicht deutlich höhere Wasseraufnahmen im Untersuchungszeitraum feststellbar (absolut sind die Werte mit maximal 3,5 M.-% nach 44 Tagen immer noch niedrig). Jedoch ist auch hier ein direkter Einfluss der Füllstoffe und zugesetzten Stearate auf die Wasseraufnahmeeigenschaften nicht abzuleiten. Im Rahmen der Untersuchungen war auffallend, dass bei der bitumenfreien Variante der Abdichtungen die Auftragsstärke bzw. die Anzahl der Schichten einen Einfluss haben. Bei einigen Prüfkörpern wurde ein „Durchbrechen“ der Abdichtung im Bereich von Fehlstellen bzw. zu geringen Auftragsstärken festgestellt.

4.2 Untersuchungen zu den Eigenschaften der Abdichtungs- und Entkopplungsmaterialien

4.2.1 Untersuchungen zu den thermoplastischen Eigenschaften

Mittels dynamisch-mechanischer Analyse erfolgten Untersuchungen zu den Elastizitätseigenschaften der Bitumenacrylatdichtschicht. Dafür stand eine Hoch-Last DMA Eplexor 500 der Netzsch Gerätebauer GmbH zur Verfügung.

Untersucht wurden das Bitumenacrylat-Dichtmaterial WEBAC 5611 sowie die bitumenfreie Variante („WEBAC 5611 weiß“), jeweils mit reaktivem Füllstoff HSV-p 00 versehen (MV 1:0,8 MT).

Die Zugversuche erfolgten bis zur Belastungsgrenze, jeweils bei Temperaturen von 23 und 50 °C.



Abbildung 38: Dichtmaterialien für die Prüfung in der DMA, links Bitumenacrylat WEBAC 5611, rechts die bitumenfreie Variante („WEBAC 5611 weiß“), jeweils mit Füllstoff HSV-p 00 versehen

Abbildung 39: Streifen der Dichtmaterialien vor der Prüfung in der DMA

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Spannungs-Dehnungs- und Modul-Temperatur-Diagramme der Untersuchungen wiedergegeben.

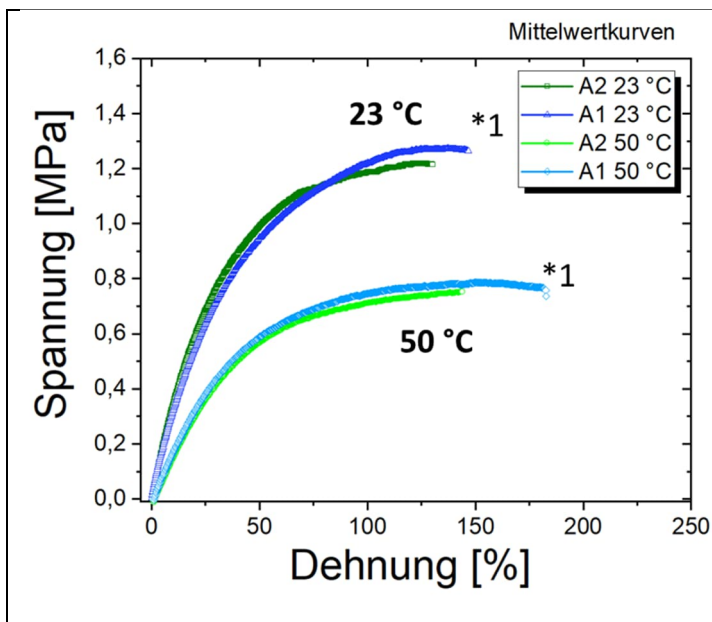
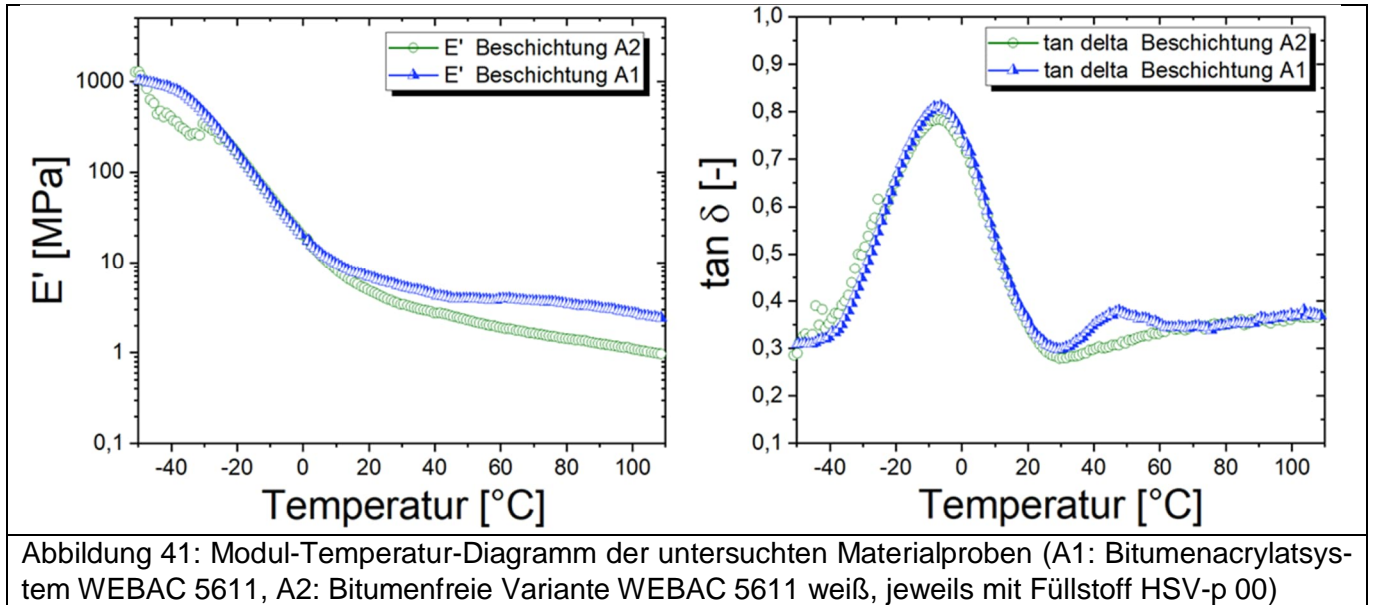


Abbildung 40: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der untersuchten Materialproben bei jeweils 23 und 50 °C (A1: Bitumenacrylatsystem WEBAC 5611, A2: Bitumenfreie Variante WEBAC 5611 weiß, jeweils mit Füllstoff HSV-p 00) (1* Bruchdehnungen – Probe mit minimalem Wert)



Die Untersuchungen erbrachten folgende Ergebnisse:

- Der Spannungs-Dehnungs-Verlauf beider Materialvarianten ist vergleichbar.
- Das Dehnungsverhalten der bitumenhaltigen Materialvariante ist etwas besser, was die maximale Reißdehnung betrifft, jedoch liegen beide Varianten bei einer Reißdehnung von deutlich über 100 %. Teilweise versagten die Proben nicht, da die Messlänge der DMA nicht ausreichend war.
- Bei Temperaturerhöhung von 23 auf 50 °C ist eine deutliche Reduzierung der ertragbaren Spannungen beider Materialvarianten erkennbar.
- Beide Materialvarianten weisen einen dynamischen Glasübergang bei ca. -10 °C auf. Bis zu einer Temperatur von ca. 10 °C sind bei beiden Materialvarianten kaum Unterschiede in den Werten des Speichermoduls E' , danach machen sich offensichtlich die Einflüsse der Bitumenkomponenten in unterschiedlichen Kurvenverläufen bemerkbar.

4.2.2 Untersuchungen zu Hafteigenschaften

Wesentlich für den Einsatz der Bitumenacrylatsysteme als Abdicht- und Entkopplungsschicht ist deren ausreichender Haftverbund zu angrenzenden Materialien. Dabei waren folgende Einflussgrößen zu berücksichtigen:

- Schichtenaufbau, Anzahl der Schichten
- Auftragsweise (frisch-in-frisch oder nach festgelegter Standzeit)

Die Untersuchungen wurden auch an der bitumenfreien Variante durchgeführt.

Die Untersuchungen erfolgten an Verbundprüfkörpern, bestehend aus Mörtelscheiben (SAKRET-Mörtel, M2,5; Scheibendurchmesser 50 mm) mit mittiger Entkopplungsschicht. Die Prüfkörper wurden auf Stahlstempel aufgeklebt und einer Zugbelastung ausgesetzt (Prüfmaschine Z100, Prüfgeschwindigkeit 0,05 MPa/s).



Abbildung 42: Prüfkörper während des Auftrages des Bitumenacrylat-Entkopplungssystems



Abbildung 43: Verbundprüfkörper nach den Haftzugfestigkeitsprüfungen

Tabelle 6: Haftzugfestigkeiten von Verbundprüfkörpern (Mittelwerte aus jeweils 3 Prüfkörpern)

Probenbezeichnung	C2a-c	T2a-c	C3a-c	T3a-c	T4a-c
Mörtel oben	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA
4. Entkopplungsschicht					
3. Entkopplungsschicht	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 / CEM II B 42,5 R	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 / Sand Haida 0,1-0,25 mm, MT 1:1
2. Entkopplungsschicht	WEBAC 5611 / CEM II B 42,5 R	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 / CEM II B 42,5 R	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00
1. Entkopplungsschicht	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 ungefüllt
Mörtel unten	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA
Bemerkungen:	Deckmörtelauftrag 1 Tag nach Auftrag 3. Dichtschicht	Deckmörtelauftrag 1 Tag nach Auftrag 3. Dichtschicht	obere Mörtelschicht frisch-in-frisch	obere Mörtelschicht frisch-in-frisch	obere Mörtelschicht frisch-in-frisch
Bruchbild	Abriss zwischen Dichtschicht und unterer / oberer Mörtelschicht jeweils ca. 50%	Abriss zwischen Dichtschicht und unterer / oberer Mörtelschicht jeweils ca. 50%	Abriss zwischen Dichtschicht und unterer / oberer Mörtelschicht jeweils ca. 50%	T3a: Abriss zwischen Dichtschicht und oberer Mörtelschicht; T3c: Abriss zwischen Dichtschicht und unterer / oberer Mörtelschicht jeweils ca. 50%	Abriss zwischen Dichtschicht und oberer Mörtelschicht
Zugfestigkeiten	MPa				
Mittelwert (3 PK)	0,28	0,27	0,23	0,20	0,20

Probenbezeichnung	T5a-c	T6a-c	T7a-c	T8a-c	T9a-c	T10a-c
Mörtel oben	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA
4. Entkopplungsschicht		WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00		WEBAC 5611 weiß ungefüllt		
3. Entkopplungsschicht	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00, Wartezeit 1 Tag	WEBAC 5611 weiß ungefüllt	WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00, Wartezeit 1 Tag	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00, Wartezeit 1 Tag	WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00, Wartezeit 1 Tag
2. Entkopplungsschicht	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00, Wartezeit 1 Tag	WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00, Wartezeit 1 Tag	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00, Wartezeit 1 Tag	WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00, Wartezeit 1 Tag
1. Entkopplungsschicht	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 weiß ungefüllt	WEBAC 5611 weiß ungefüllt	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 weiß ungefüllt
Mörtel unten	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA
Bemerkungen:	obere Mörtelschicht frisch-in-frisch (Wartezeit bis Antrocknung)	obere Mörtelschicht frisch-in-frisch (Wartezeit bis Antrocknung)	obere Mörtelschicht frisch-in-frisch (Wartezeit bis Antrocknung)	obere Mörtelschicht frisch-in-frisch (Wartezeit bis Antrocknung)	Deckmörtelauftrag 1 Tag nach Auftrag letzte Dichtschicht	Deckmörtelauftrag 1 Tag nach Auftrag letzte Dichtschicht
Bruchbild	Abriss zwischen Dichtschicht und unterer Mörtelschicht	T6a +b: Abriss zwischen Dichtschicht und oberer Mörtelschicht; T6c: Abriss zwischen Dichtschicht und unterer Mörtelschicht	Abriss zwischen Dichtschicht und unterer Mörtelschicht	T8a +b: Abriss zwischen Dichtschicht und unterer Mörtelschicht; T8c: Abriss zwischen Dichtschicht und oberer Mörtelschicht	Abriss zwischen Dichtschicht und oberer Mörtelschicht, leichter "Hauch" Mörtel auf oberer Dichtschicht vorhanden	Abriss zwischen Dichtschicht und oberer Mörtelschicht, leichter "Hauch" Mörtel auf oberer Dichtschicht vorhanden
Zugfestigkeiten	MPa					
Mittelwert (3 PK)	0,16	0,19	0,21	0,22	0,13	0,13

Die Auswertung der Haftzugfestigkeitsprüfungen erbrachte folgende Ergebnisse:

- Die Art des reaktiven Füllstoffes hat offensichtlich keinen Einfluss auf die Haftzugfestigkeiten im Verbund.
- Bitumenhaltiges („WEBAC 5611“) und bitumenfreies („WEBAC 5611 weiß“) Entkopplungsmaterial erbringt bei ansonsten gleichen Parametern ähnliche Haftzugfestigkeiten.
- Zwischen dem Auftrag der letzten Entkopplungsschicht und dem Deckmörtelauftrag sollte zumindest ein Zeitraum von einem Tag liegen, ein Auftrag frisch-in-frisch scheint geringere Haftzugfestigkeiten zu bewirken.
- Ein Abstreuen bzw. der Zusatz von Quarzsand zur obersten Entkopplungsschicht hat keinen Einfluss auf die Haftzugfestigkeiten.

4.2.3 Bildgebende Untersuchungen zum Aufbau der Dichtungsschichten und Anschlussbereiche

Von großem Interesse waren die Ausbildungen der Übergangsbereiche zwischen Abdichtungs- und Entkopplungsschicht und Mörtel. Dafür wurden wieder Verbundkörper in verschiedenen Rezeptur- und Auftragsvarianten hergestellt und mikroskopisch untersucht.

Zum Einsatz kam ein Zoommikroskop des Herstellers Zeiss (AXIO Zoom V16).

In der nachfolgenden Tabelle sind die Rezeptur- und Auftragsvarianten wiedergegeben.

Tabelle 7: Rezeptur- und Auftragsvarianten für die Verbundkörper für mikroskopische Untersuchungen

Probenbezeichnung	A	B	C	D	E	F
Mörtel oben	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA
4. Dichtschicht			WEBAC 5611 ungefüllt			WEBAC 5611 weiß, ungefüllt
3. Dichtschicht	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 weiß, ungefüllt	WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00
2. Dichtschicht	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00
1. Dichtschicht	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 weiß, ungefüllt	WEBAC 5611 weiß, ungefüllt	WEBAC 5611 weiß, ungefüllt
Mörtel unten	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA
Bemerkungen	Auftrag oberer Mörtel 1 Tag nach Auftrag 3. Dichtschicht	Auftrag oberer Mörtel frisch-infrisch	Auftrag oberer Mörtel 1 Tag nach Auftrag 4. Dichtschicht	Auftrag oberer Mörtel 1 Tag nach Auftrag 3. Dichtschicht	Auftrag oberer Mörtel frisch-infrisch	Auftrag oberer Mörtel 1 Tag nach Auftrag 4. Dichtschicht



Abbildung 44: Verbundkörper A im Bereich der Dicht- und Entkopplungsschicht: Die Schichtdicke liegt im Bildausschnitt zwischen ca. 0,4 und 1,3 mm. Der Übergang von Abdichtungsschicht zum aufliegenden Mörtel ist scharf abgegrenzt und ohne Übergangszone. (Bildunterkante: 12,1 mm)

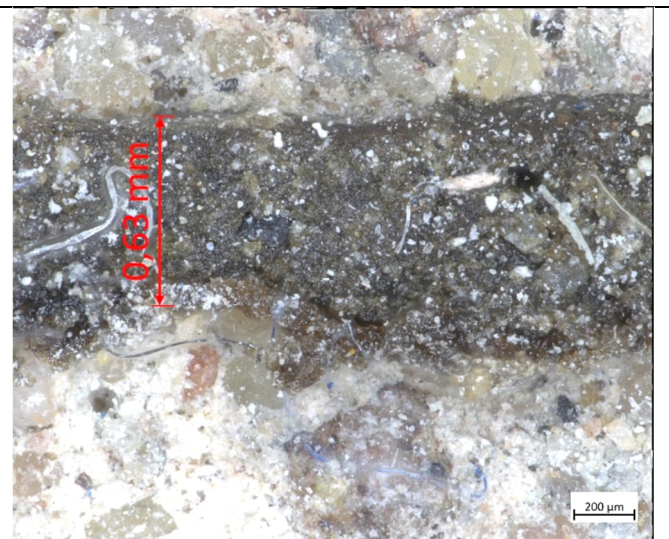


Abbildung 45: Verbundkörper A, im vergrößerten Bildausschnitt ist die erste (untere) ungefüllte Bitumenacrylatschicht deutlich abgegrenzt zur darüberliegenden mit Füllstoff versetzten Schicht. (Bildunterkante: 1,9 mm)

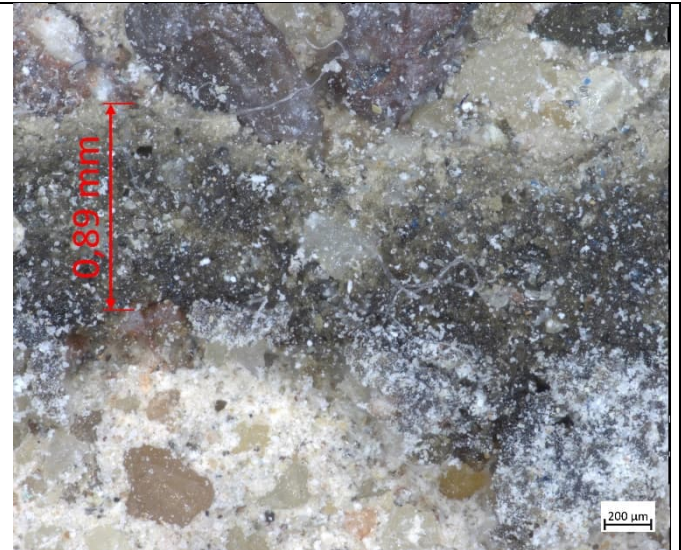
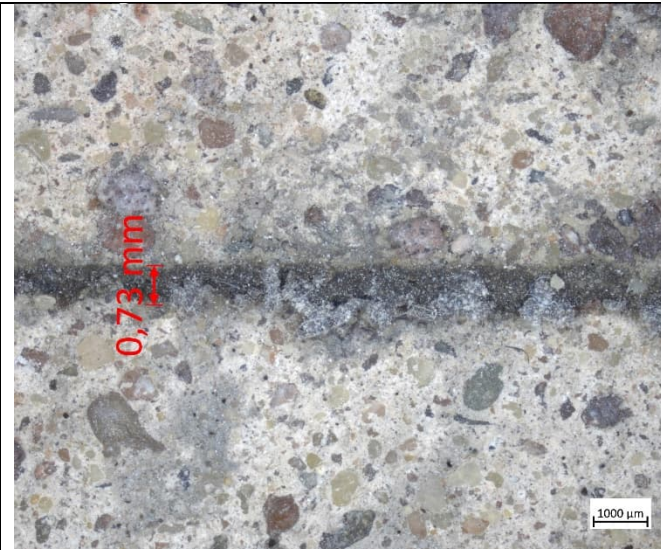


Abbildung 46: Verbundkörper B im Bereich der Dicht- und Entkopplungsschicht: Die Schichtdicke liegt im Bildausschnitt zwischen ca. 0,4 und 0,7 mm. Der Übergang von der Abdichtungsschicht zum aufliegenden Mörtel ist aufgrund des Mörtelauftrages frisch-in-frisch nicht abgegrenzt, sondern weist eine Durchdringungszone auf. (Bildunterkante: 12,1 mm)

Abbildung 47: Verbundkörper B, im vergrößerten Bildausschnitt ist der Schichtenaufbau gut erkennbar. (Bildunterkante: 2,45 mm)

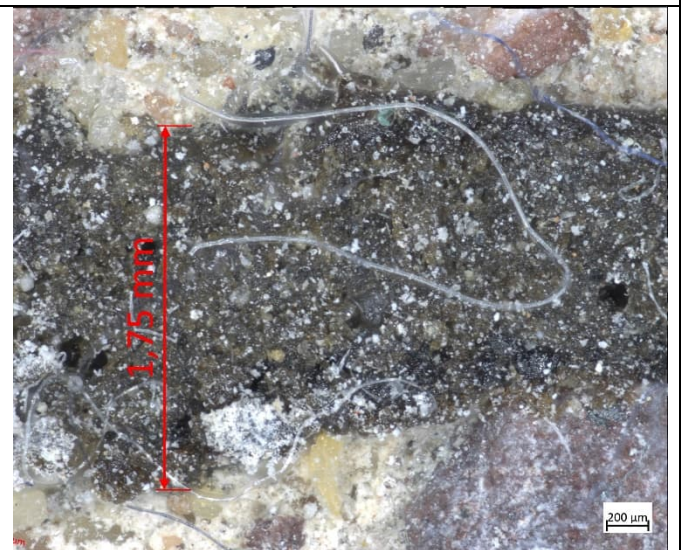


Abbildung 48: Verbundkörper C im Bereich der Dicht- und Entkopplungsschicht: Die Schichtdicke im Bildausschnitt ist vergleichsweise höher und liegt zwischen ca. 1 und 1,5 mm. Der Übergang von der Abdichtungsschicht zum aufliegenden Mörtel ist scharf abgegrenzt. (Bildunterkante: 12,1 mm)

Abbildung 49: Verbundkörper C, vergrößerter Bildausschnitt mit erkennbarem Schichtenaufbau (Bildunterkante: 2,83 mm)



Abbildung 50: Verbundkörper D im Bereich der Dicht- und Entkopplungsschicht: Die Schichtdicke im Bildausschnitt ist vergleichbar mit A und beträgt zwischen 0,5 und 1,4 mm. Der Übergang von der Abdichtungsschicht zum aufliegenden Mörtel ist relativ scharf abgegrenzt. (Bildunterkante: 12,1 mm)

Abbildung 51: Verbundkörper D, vergrößerter Bildausschnitt mit erkennbarem Schichtenaufbau (Bildunterkante: 2,83 mm)

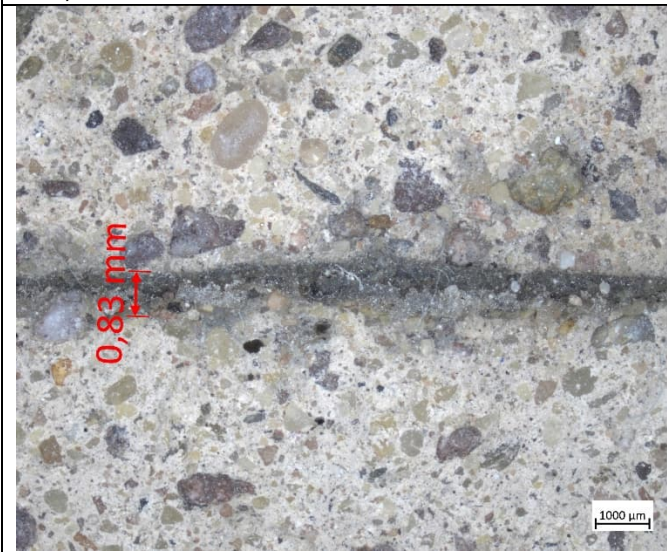


Abbildung 52: Verbundkörper E im Bereich der Dicht- und Entkopplungsschicht: Die Schichtdicke im Bildausschnitt ist hier relativ gering, zwischen 0,4 und 0,6 mm. Im Übergang von der Abdichtungsschicht zum aufliegenden Mörtel ist eine leichte Hofbildung erkennbar. (Bildunterkante: 12,1 mm)

Abbildung 53: Verbundkörper E, vergrößerter Bildausschnitt (Bildunterkante: 2,83 mm)

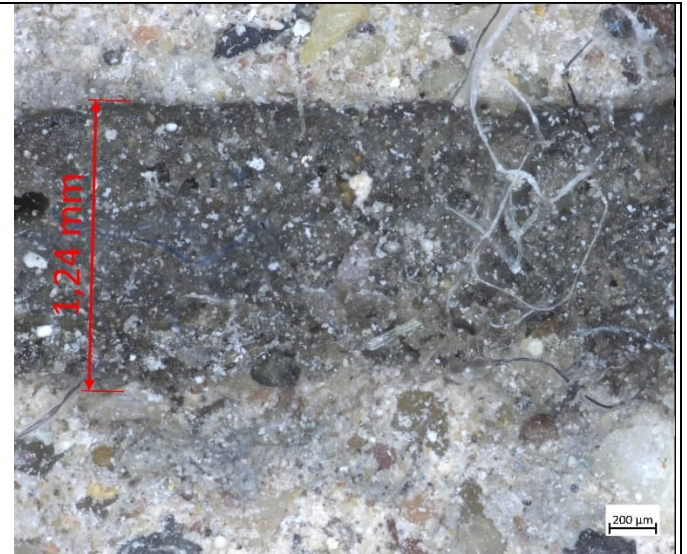
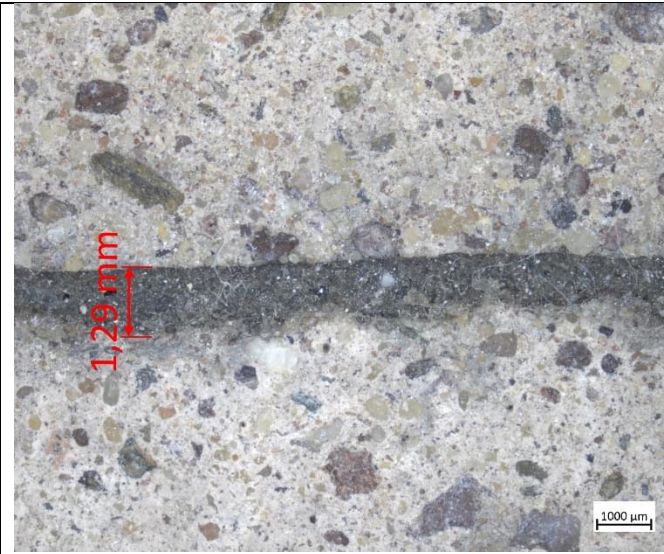


Abbildung 54: Verbundkörper F im Bereich der Dicht- und Entkopplungsschicht: Aufgrund des zweimaligen Auftrages der mit Füllstoff versehenen Dichtungsschicht ist hier eine Trockenschichtdicke von minimal 1 mm vorliegend. (Bildunterkante: 12,1 mm)

Abbildung 55: Verbundkörper F, vergrößerter Bildausschnitt mit erkennbarem Schichtenaufbau (Bildunterkante: 2,83 mm)

4.2.4 Untersuchungen zum Diffusionsverhalten der Abdichtungsschicht

Zur Ermittlung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ wurden Verbundkörper aus Mörtelscheiben und Dichtungsbeschichtungen Untersuchungen nach dem Trockenbereichsverfahren nach DIN EN ISO 12572 /10/ unterzogen. Als Sorbens diente Calciumchlorid.

Von Interesse war dabei der Einfluss der Schichtdicken (dargestellt über die Anzahl der Aufträge), der Art der reaktiven Füllstoffe und der eigentlichen Dichtungsmaterialien (WEBAC 5611 und bitumenfreie Variante WEBAC 5611 weiß). Die Schichtaufbauten sind in der nachfolgenden Tabelle 8 wiedergegeben.

Tabelle 8: Rezeptur- und Auftragsvarianten für die Verbundkörper für Untersuchungen zum Diffusionsverhalten

Mörtelscheiben sakret PUMA M2,5	Masseteile	webac 5611	CEM II B	HSV-p
Verbundproben Mörtel-Dichtungsschicht		1	0,8	
Scheiben D= ca. 100 mm, H ca. 20 mm		1		0,8
Obere Scheibenfläche abgedichtet		1		

Probenbezeichnung	80	81	82	83	84
3. Dichtschicht			WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00		WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00
2. Dichtschicht	WEBAC 5611 / CEM II B 42,5 R	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00
1. Dichtschicht	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 ungefüllt	WEBAC 5611 weiß, ungefüllt	WEBAC 5611 weiß, ungefüllt
Mörtel unten	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA
Bemerkungen	Aufträge jeweils nach 1 Tag Standzeit	Aufträge jeweils nach 1 Tag Standzeit	Aufträge jeweils nach 1 Tag Standzeit	Aufträge jeweils nach 1 Tag Standzeit	Aufträge jeweils nach 1 Tag Standzeit

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in der nachfolgenden Tabelle 9 wiedergegeben. Dabei sind die Differenzen zwischen den Werten der beschichteten und unbeschichteten Scheiben dargestellt – somit geben sie den Diffusionswiderstand allein der Entkopplungsschicht wieder (Mittelwerte aus jeweils 2 identischen Probekörpern).

Tabelle 9: Ermittelte Werte der Diffusionswiderstandszahl und der äquivalenten Luftschichtdicke für die jeweiligen Entkopplungsschichten der untersuchten Verbundkörper

Probennummer	Beschreibung	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	w_d -äquivalente Luftschichtdicke s_d in m
80	WEBAC 5611 / 1x CEM II B 42,5 R	58,55	1,14
81	WEBAC 5611 / 1x tubag HSV-p 00	52,35	1,01
82	WEBAC 5611 / 2x tubag HSV-p 00	92,45	1,78
83	WEBAC 5611 weiß / 1x tubag HSV-p 00	36,85	0,71
84	WEBAC 5611 weiß / 2x tubag HSV-p 00	60,60	1,16

Die Ergebnisse zeigen – wie erwartet – den starken Einfluss der Schichtdicke auf den Diffusionswiderstand der Dichtschicht. Ebenso ist ein deutlicher Einfluss der Bitumenkomponente auf das Diffusionsverhalten erkennbar. Dieses ist im Falle der bitumenfreien Rezepturvariante (WEBAC 5611 weiß) geringer,

ein Verhalten, welches sich bereits im Zuge der Untersuchungen zum Wasseraufnahmeverhalten in der Tendenz abzeichnete. Dagegen ist die Art des reaktiven Füllstoffes ohne signifikante Bedeutung für das Diffusionsverhalten.

Die Werte für die Verbundprobekörper Nr. 82 entsprechen in etwa den werksseitig von der Fa. WEBAC GmbH angegebenen (sd = 1,5 m bei 1,5 mm Schichtdicke). /8/

4.2.5 Untersuchungen zum Migrationsverhalten von Salzlösungen durch die Abdichtungsschicht

Ausgangspunkt für die Untersuchungen war die Fragestellung, inwieweit die Ergebnisse zum Wasseraufnahmeverhalten der Verbundkörper auf reale, bauwerkstypische Situationen, nämlich dem Vorhandensein wässriger Salzlösungen übertragen werden können. Aus diesem Grund wurde eine Salzlösung, bestehend aus Natriumsulfat (Na₂SO₄), Natriumchlorid (NaCl) und Natriumnitrat (NaNO₃) hergestellt. In der Tabelle 10 sind die Salzkonzentrationen der Lösung wiedergegeben.

Tabelle 10: Salzkonzentrationen in der Untersuchungslösung

	Konzentration in Lösung
Natriumsulfat (Na ₂ SO ₄)	17,66 g/kg
Natriumchlorid (NaCl)	4,61 g/kg
Natriumnitrat (NaNO ₃)	6,85 g/kg

Für die Untersuchungen wurden Verbundprüfkörper, bestehend aus Mörtelscheiben und einer zwischenliegenden Dichtungsschicht unterschiedlicher Rezeptierung hergestellt.

Tabelle 11: Zusammensetzung der Verbundprüfkörper für die Untersuchungen zur Salzmigration

Verbundproben Mörtel-Dichtungsschicht-Mörtel
 Saugseite: Mörtel Sakret PUMA, D = 10 cm, H = 2 cm
 Dichtschicht: WEBAC 5611 oder WEBAC 5611 weiß
 Oberseite: Kalkmörtel CL90, D = 5 cm, H = 2 cm

Massenverhältnisse		
webac 5611 / webac 5611 weiß	CEM II B	HSV-p
1	0,8	
1		0,8

Probenbezeichnung	70	71	72	73	74
Mörtel oben	Luftkalkmörtel CL90	Luftkalkmörtel CL90	Luftkalkmörtel CL90	Luftkalkmörtel CL90	Luftkalkmörtel CL90
3. Dichtschicht		WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00		WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00
2. Dichtschicht	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00 / 0,5 M.-% Al-St*	WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00	WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00
1. Dichtschicht	WEBAC 5611, ungefüllt	WEBAC 5611, ungefüllt	WEBAC 5611, ungefüllt	WEBAC 5611 weiß, ungefüllt	WEBAC 5611 weiß, ungefüllt
Mörtel unten	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA	Sakret M2,5 PUMA
Bemerkungen	Auftrag oberer Mörtel 1 Tag nach Auftrag der letzten Dichtschicht	Auftrag oberer Mörtel 1 Tag nach Auftrag der letzten Dichtschicht	Auftrag oberer Mörtel 1 Tag nach Auftrag der letzten Dichtschicht	Auftrag oberer Mörtel 1 Tag nach Auftrag der letzten Dichtschicht	Auftrag oberer Mörtel 1 Tag nach Auftrag der letzten Dichtschicht

* Aluminiumstearat



Abbildung 56: Verbundprüfkörper vor Beginn der Untersuchungen zur Salzmigration: Die untere Mörtelscheibe besteht aus einem hydraulischen Kalkmörtel, die obere, kleinere aus einem Luftkalkmörtel; dazwischen befindet sich die Abdichtungsschicht

Abbildung 57: Verbundprüfkörper während der Untersuchungen zur Salzmigration: Die Salzlösung wird über die unteren Mörtelscheiben aufgenommen.



Abbildung 58: Verbundprüfkörper nach 120 Tagen Lagerung über der Salzlösung

Abbildung 59: Detail der Abdichtungsoberfläche über der unteren Mörtelscheibe mit starken Salzauskristallisationen

Nach einer Lagerung von 120 Tagen wurden die Verbundkörper der Salzlösung entnommen und die Mörtel oberhalb der Abdichtungsschicht auf Anteile migrierter wasserlöslicher Anionen und Kationen untersucht.

In der nachfolgenden Tabelle 12 sind die Untersuchungsergebnisse wiedergegeben.

Tabelle 12: Belastung der Mörtelbereiche oberhalb der Dichtungsschicht mit löslichen Anionen und Kationen

Probe	Material Entkopplungsschicht	pH-Wert	LF	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
			μS/cm	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%
70c	WEBAC 5611 / 1x tubag HSV-p 00	11,60	3.630	0,03	0,01	0,06	0,01	0,01	1,52	0,01
71c	WEBAC 5611 / 2x tubag HSV-p 00	11,60	4.750	0,03	0,15	0,09	0,01	0,04	2,01	0,01
72c	WEBAC 5611 / 1x tubag HSV-p 00 / 0,5 M. % AlSt	11,80	5.100	0,03	0,11	0,06	0,01	0,01	2,27	0,01
73c	WEBAC 5611-weiß / 1x tubag HSV-p 00	12,20	4.450	0,03	0,01	0,06	0,01	0,01	1,83	0,01
74c	WEBAC 5611weiß / 2x tubag HSV-p 00	12,30	4.810	0,03	0,01	0,06	0,01	0,01	2,21	0,01
75	Salzauskristalli-sation	10,10	22.600	0,23	0,71	48,90	0,01	24,20	0,12	0,01
76	unbelasteter Mörtel (Nullprobe)	12,30	3.910	0,03	0,11	0,08	0,01	0,01	0,86	0,01

Zur besseren Veranschaulichung sind die ermittelten Anionen- und Kationengehalte der Mörtel oberhalb der Abdichtungsschicht in der nachfolgenden Abbildung 60 in mval/kg³ wiedergegeben.

³ mval/kg entspricht mmol x stöchiometrischer Wertigkeit / kg

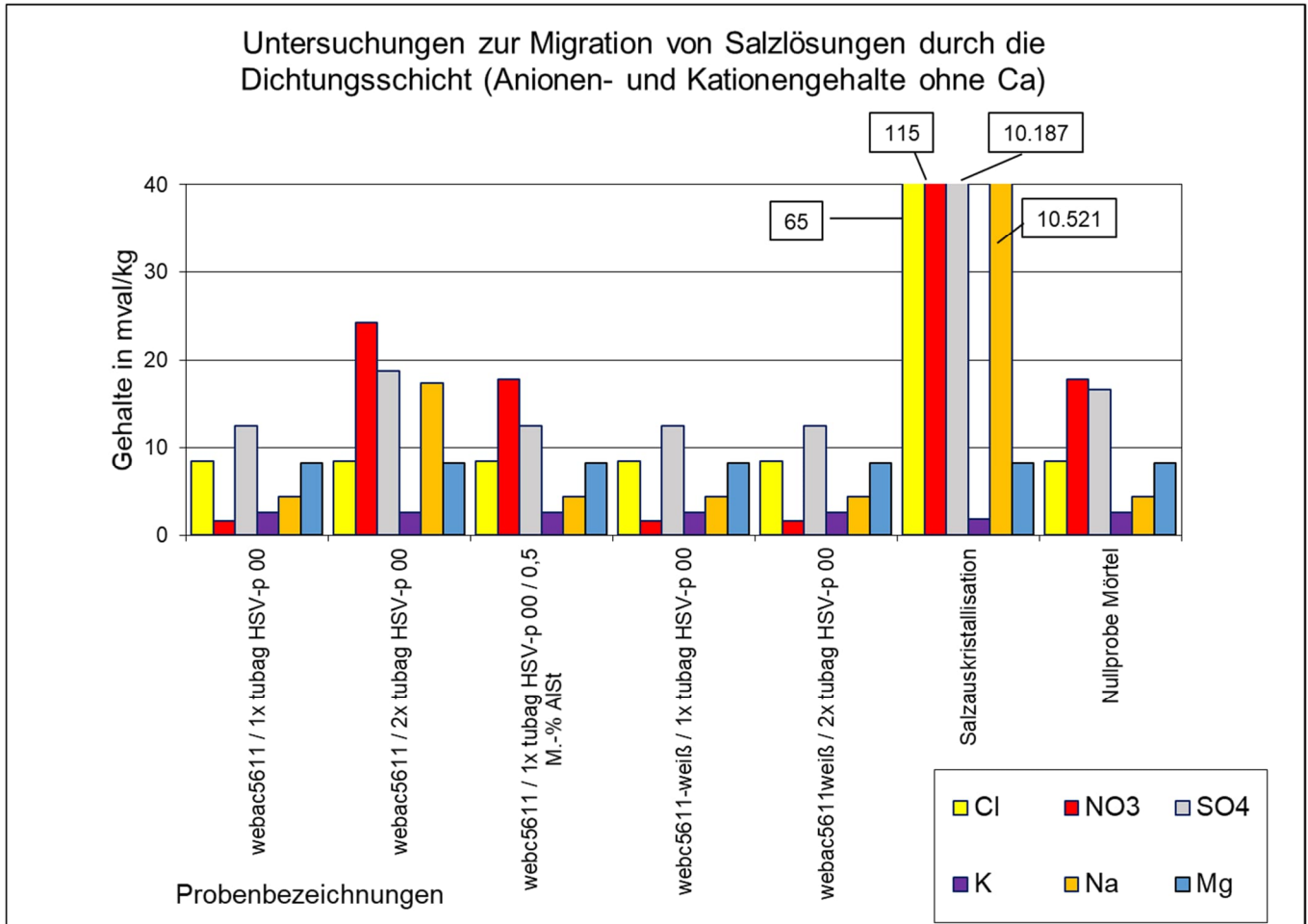


Abbildung 60: Gehalte an Anionen und Kationen in den Mörteln über der Abdichtungsschicht der Verbundproben

Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass sämtliche Abdichtungen die Anforderungen an eine Sperrung gegenüber Migration relevanter Anionen und Kationen auch bei vergleichsweise extremen Gehalten erfüllen. Die Streuungen in den Werten sind im Verhältnis zur Belastungssituation nicht signifikant und lassen sich auch nicht auf den unterschiedlichen Aufbau der Abdichtungsschicht zurückführen.

Auffällig ist, dass die Salzauskristallisation hauptsächlich aus Natriumsulfat (-Decahydrat) bestehen. Vermutlich liegen Natriumchlorid und Natriumnitrat nur in gelöster Form in der unteren Mörtelscheibe vor. Die hohe Leitfähigkeit der Eluate resultiert aus den OH-Ionen des noch nicht carbonatisierten Calciumhydroxids aus dem Luftkalkmörtel.

4.2.6 Untersuchungen zur Salzmigrations-Wechselbeständigkeit

Seitens des Projektbeirates wurde die Frage nach der Salzmigrations-Wechselbeständigkeit aufgeworfen. Für diesbezügliche Nachweisführungen fanden die Verbundprüfkörper der Untersuchungen zur Salzmigration und auch die in diesem Zusammenhang benutzte Untersuchungslösung (s. Tabelle 10) nochmalige Verwendung. Auch der Versuchsaufbau war identisch. Die Proben wurden allerdings in Zyklen zwischenzeitlichen Trocknungen ausgesetzt. Nach 9 Trocknungszyklen waren die als Träger der Dicht- und Entkopplungsschicht fungierenden Mörtelscheiben so stark geschädigt, dass der Versuch abgebrochen werden musste. Die Dicht- und Entkopplungsschichten waren bei keinem der Verbundprüfkörper davon betroffen - sie fungierten sogar als Stabilisierung der Mörtelscheiben.



Abbildung 61: Verbundprüfkörper nach Abbruch der Untersuchungen zur Salzmigrations-Wechselbeanspruchung: Die untere Mörtelscheibe ist bereits extrem geschädigt, Salzränder haben sich am oberen Rand gebildet. Die Abdichtungs- und Entkopplungsschicht selbst ist indessen intakt.

4.2.7 Untersuchungen zur thermisch-mechanischen Stabilität

Interessant war die Frage, inwieweit sich eine thermoplastische Abdichtungs- und Entkopplungsschicht gegenüber Scherkräften bei höheren Temperaturen und langanhaltender Belastung als stabil erweist. Es wurden daher Verbundprüfkörper aus Aluminiumprofilen und zwischenliegender Entkopplungsschicht mittels Dynamisch-Mechanischer-Analyse (DMA) untersucht. Die Untersuchungen erfolgten wieder mit der Hoch-Last DMA Eplexor 500 der Fa. Netzsch als Zugscherversuch bei verschiedenen Temperaturen und unterschiedlichen Zugbeanspruchungen.

<p>Abbildung 62: Verbundprüfkörper für die Untersuchungen zur thermisch-mechanischen Stabilität der Entkopplungsschicht (Profil 10,46x6 mm², Klebefläche 206 mm², Dicke der Entkopplungsschicht 0,7 mm)</p>	<p>Abbildung 63: Verbundprüfkörper in der DMA</p>

Die Verbundprüfkörper wurden sukzessive bei Temperaturen von 20, 40, 60 und 80 °C einer Kraft von 3 N ausgesetzt, danach bei 80 °C sukzessive Zugkräften von 9 und 18 N. In dem nachfolgenden Diagramm ist die Kriechdehnung in Abhängigkeit von der Zeitdauer der Belastung bei den verschiedenen Parametern dargestellt.

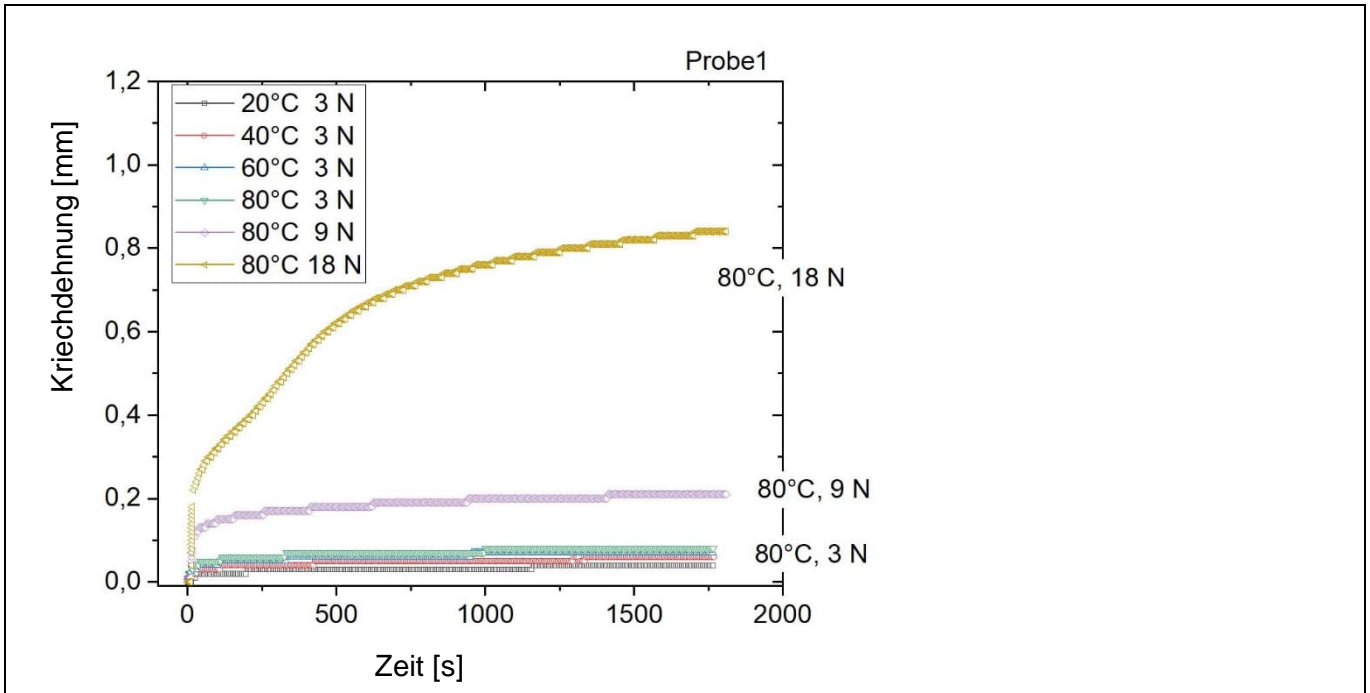


Abbildung 64: Kriechdehnung des Verbundprüfkörpers 1 bei verschiedenen Temperaturen und Zugkräften

Die Ergebnisse zeigen eine Kriechdehnung von unter 1 mm bei 80 °C, einer Zugkraft von 18 N und einer Krafteinwirkungszeit von 30 min. Bei halber Zugkraft betrug die Kriechdehnung nur ca. 0,2 mm.

Im Rahmen einer größenskalierten Wiederholung des Prüfprinzips wurde die Kriechverformung entlang der Entkopplungsschicht zwischen zwei Mörtelschichten untersucht. Dafür erfolgte die Herstellung eines Verbundprüfkörpers aus 2 Normalformatklinkern und mittiger Entkopplungsschicht. Dieser wurde bei 80 °C im Klimaschrank im Winkel von 45° über einen Zeitraum von 14 Tagen gelagert. Etwaige Kriechbewegungen wurden in diesem Zeitraum nicht beobachtet.

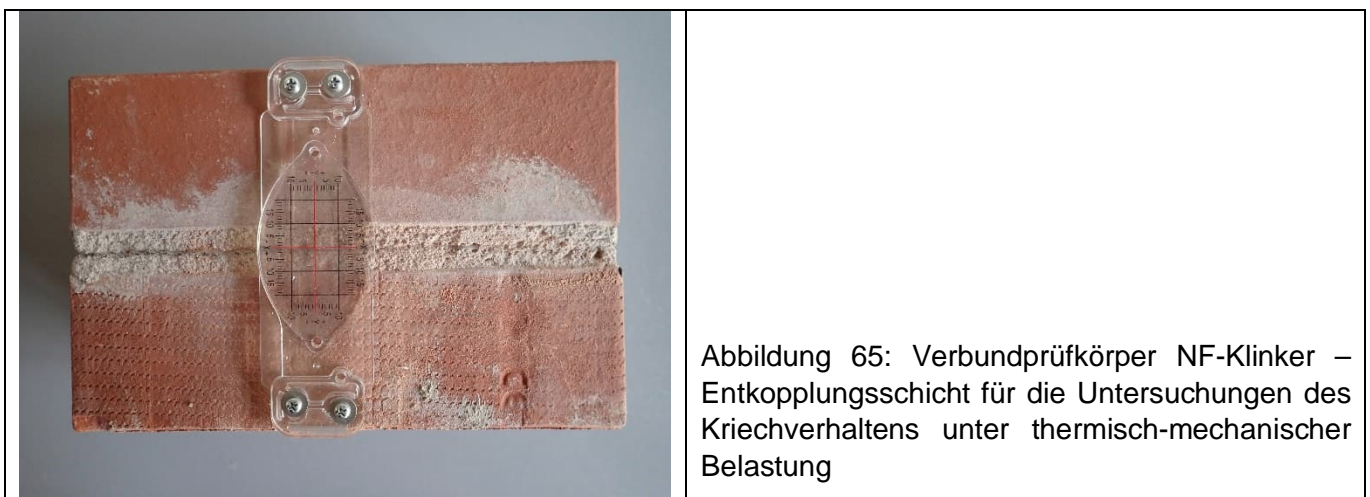


Abbildung 65: Verbundprüfkörper NF-Klinker – Entkopplungsschicht für die Untersuchungen des Kriechverhaltens unter thermisch-mechanischer Belastung

4.3 Auswertung der Laboruntersuchungen

Die Laboruntersuchungen haben die prinzipielle Eignung von Abdichtungs- und Entkopplungsschichten auf Basis von Bitumenacrylaten erwiesen. Reaktive, nicht zu schädlicher Treibmineralbildung führende Füllstoffe (tubag HSV-p 00) sind für das System einsetzbar, ohne dass deren Wirksamkeit eingeschränkt wird.

Das Material ist in der Lage, temperaturbedingte bzw. hygrysch induzierte Dehnungen und auch in gewissem Maße Bauteilbewegungen rissfrei aufzunehmen und besitzt ausreichende Haftzugfestigkeiten. Die Abdichtungswirkung gegen Feuchte und auch gegen lösliche Salze ist nachgewiesen.

Temperaturbedingte Einschränkungen der Stabilität der Dichtungsschicht waren nicht erkennbar.

Die bitumenfreie Variante des Abdichtungs- und Entkopplungssystems reagiert weniger robust gegenüber den Beaufschlagungen und Belastungstests, ist aber gleichfalls geeignet.

Bezüglich des Aufbaues der Entkopplungsschicht hat sich folgende Technologie als geeignet herausgestellt:

- Schaffung eines geeigneten Unterbaues für die Entkopplungsschicht (Vermeidung scharfer Kanten, ausreichende Festigkeit, Beachtung der Wasserabführung, Vermeidung von Wassersäcken auf der Oberfläche). Bei Kontakt zu gipshaltigem Mauerwerk sind geeignete Mörtelsysteme entsprechend WTA-Merkblatt /12/ einzusetzen.
- Gewährleistung der Staubbefreiheit der Oberflächen des Unterbaues
- Auftrag einer Primerschicht aus ungefülltem Bitumenacrylat (WEBAC 5611) bzw. bitumenfreier Variante (WEBAC 5611 weiß) mittels Pinsel, Gewährleistung einer geschlossenen Oberfläche
- Nach Abtrocknen der Primerschicht (erkennbar an der Dunkelfärbung der Oberfläche bzw. beginnender Transparenz der Schicht) Auftrag der mit Füllstoff versehenen 1. Entkopplungsschicht. Der Füllstoff (tubag HSV-p 00) wird im Masseverhältnis WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00 1:0,8 klumpfrei mittels schnelllaufendem Rührgerät angemischt und sofort mittels Pinsel / Quast volldeckend aufgebracht.
- Nach Abbinden über 24 Stunden erfolgt der 2. Auftrag des mit reaktivem Füllstoff versehenen Entkopplungsmaterials.
- Nach einer Abbindezeit von wiederum 24 Stunden kann auf die Entkopplungsschicht aufgemörtelt / aufgemauert werden. Zuvor ist ein weiterer Auftrag des ungefüllten Materials als Haftvermittler erforderlich. Der Mörtelauftrag kann nach Auftrocknung erfolgen, entsprechend der Umgebungsbedingungen etwa 10...30 min nach Auftrag der letzten Entkopplungsschicht, wenn sich deren Oberfläche dunkel gefärbt hat (bitumenhaltiges Material) bzw. farblos wird (bitumenfreie Variante).

5 Arbeitspaket 4: Verifizieren der im Labor entwickelten Produkte und Technologien im Demonstratormaßstab

Zur Verifizierung der im Labormaßstab gewonnenen Erkenntnisse unter praxisnahen Bedingungen wurden Mauerwerksdemonstratoren hergestellt, an denen die Wirkung der unterschiedlichen Abdichtungs- und Entkopplungssituationen untersucht werden konnte.

Es wurden insgesamt drei verschiedene Mauerwerksdemonstratoren eingesetzt. Diese waren bereits im Zusammenhang mit einem früheren Forschungsprojekt gefertigt worden und standen nun für das DBU-Projekt zur Verfügung. Es handelte sich dabei um mit Gipsmörtel („Historischer Gipsmörtel“ – casusan HGM1, Fa. Casea) gemauerte Mauerwerksblöcke in den Maßen von ca. 100x80x40 cm³ auf Paletten. Die Mauerwerksblöcke bestanden aus Sandstein-, Kalkstein- und Ziegelmauerwerk.

Entsprechend der vorgesehenen Einsatzzwecke wurden unterschiedliche Sanierungssituationen dargestellt:

1. Sperrung / Entkopplung zwischen mit Gipsmörtel gemauertem Mauerwerk und einer Mauerkrone / Mauerabdeckung, gemauert mit hydraulischem Mörtel
2. Sperrung / Entkopplung zwischen mit Gipsmörtel gemauertem Mauerwerk einer Anmauerung mit hydraulischem Mörtel
3. Sperrung / Entkopplung zwischen mit Gipsmörtel gemauertem Mauerwerk und einem hydraulisch gebundenen Verputz



Abbildung 66: Mauerwerksdemonstrator, Sandsteinmauerwerk (Seeberger Sandstein), vor Applikation der Abdichtungen



Abbildung 67: Mauerwerksdemonstrator, Kalksteinmauerwerk (Dichter Muschelkalk), vor Applikation der Abdichtungen

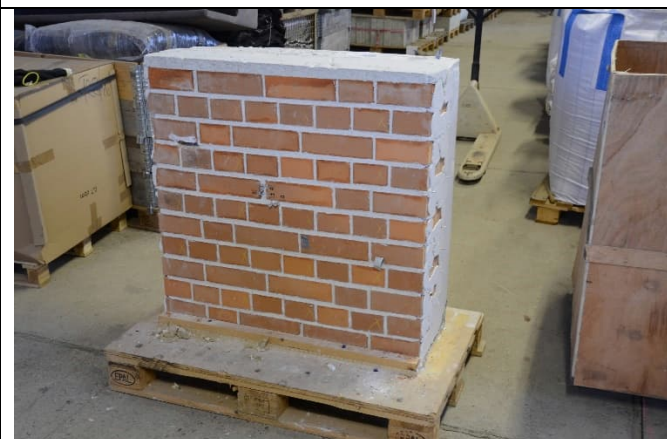


Abbildung 68: Mauerwerksdemonstrator, Ziegelmauerwerk (Vollziegel, Normalformat), vor Applikation der Abdichtungen



Abbildung 69: Herstellen der Aufmauerung hinter der Entkopplungsschicht, auf der Vorderseite des Demonstrators im Bildvordergrund ist die Abdichtungs- und Entkopplungsschicht für den später aufgetragenen Verputz erkennbar



Abbildung 70: Mauerwerksdemonstrator, Sandsteinmauerwerk mit Hintermauerung und auf der Oberseite aufgetragener Abdichtungsschicht



Abbildung 71: Mauerwerksdemonstrator, Ziegelmauerwerk mit aufgemauertem Klinker-Rollschicht über der Abdichtungsschicht, hier fehlt noch die Deckverfugung



Abbildung 72: Mauerwerksdemonstrator, Sandsteinmauerwerk, vor der Außenbewitterung
 1 ... Sandstein-Quadermauerwerk, gemauert mit Gipsmörtel
 2 ... Hintermauerung mit Ziegelmauerwerk, Normalformat, gemauert mit Kalk-Zement-Mörtel, Entkopplung zum Sandstein-Mauerwerk durch WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00

3 ... Aufmauerung Mauerkrone, Sandstein, gemauert mit Kalk-Zement-Mörtel, Entkopplung zum Sandstein-Mauerwerk durch WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00
 4 ... Verputz auf Sandstein-Mauerwerk, einlagig, hydraulischer Kalkputz, Entkopplung zum Sandstein-Mauerwerk durch WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00



Abbildung 73: Mauerwerksdemonstrator, Kalksteinmauerwerk, vor der Außenbewitterung
 1 ... Kalkstein-Quadermauerwerk, gemauert mit Gipsmörtel
 2 ... Hintermauerung mit Ziegelmauerwerk, Normalformat, gemauert mit Kalk-Zement-Mörtel, Entkopplung zum Kalkstein-Mauerwerk durch WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00
 3 ... Aufmauerung Mauerkrone, Sandstein, gemauert mit Kalk-Zement-Mörtel, Entkopplung zum Kalkstein-Mauerwerk durch WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00
 4 ... Verputz auf Kalkstein-Mauerwerk, einlagig, hydraulischer Kalkputz, Entkopplung zum Kalkstein-Mauerwerk durch WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00



Abbildung 74: Mauerwerksdemonstrator, Ziegelmauerwerk, vor der Außenbewitterung
 1 ... Ziegelmauerwerk, gemauert mit Gipsmörtel
 2 ... Aufmauerung Mauerkrone, Klinkerrollschicht, gemauert mit Kalk-Zement-Mörtel, Entkopplung zum Ziegelmauerwerk durch WEBAC 5611 / tubag HSV-p 00
 3 ... Verputz auf Ziegelmauerwerk, einlagig, hydraulischer Kalkputz, Entkopplung zum Ziegelmauerwerk durch WEBAC 5611 weiß / tubag HSV-p 00

Die Demonstratoren wurden ab dem 03.08.2021 frei bewittert aufgestellt.

Am 13.09.2022, also nach etwa einem Jahr Standzeit, erfolgte ein visuelles Monitoring sowie die Entnahme von Bauwerksproben im Bereich der Entkopplungsschichten, um den Zustand der Übergangsbereiche zu untersuchen. Außerdem wurde die Haftzugfestigkeit der aufgetragenen Putze auf den bitumenfreien Entkopplungsschichten ermittelt.

Es konnten visuell keine systembedingten Schäden sowohl an den entnommenen Proben (Bohrkernabschnitte, D50 mm, trocken erbohrt) als auch an den Bohrungswänden erkannt werden.

Die Haftzugfestigkeiten der Putzflächen auf den Entkopplungsschichten an den 3 Demonstratoren sind in der nachfolgenden Tabelle 13 wiedergegeben. Es wurden die Mittelwerte aus 3 Messungen ermittelt.

Die Ermittlung der Haftzugfestigkeiten erfolgte mit dem Haftzugprüfgerät Easy-M, Hersteller: Josef Freundl (kalibriert auf Zugkraft ab 150 N, Belastungsgeschwindigkeit 0,008 N/mm²s und aufgeklebten Stempeln mit quadratischer Grundfläche 50x50 mm²).

Tabelle 13: Werte der Haftzugfestigkeiten Putz auf Entkopplungsschicht der Demonstratoren inkl. Beschreibung der Bruchbilder

Demonstrator	Unters.-bereich	Bruchart	Haftzugfest. (N/mm ²)	Abreißkraft (kN)	Untergrund	Mittelwert Haftzugfest.	Standardabweichung
Ziegelmauerwerk	Z1	Bruch in der Grenzfläche Putz / Entkoppl.	0,100	0,252	Ziegelmauerwerk	0,1043	0,0068
	Z2	Bruch 50% im Putz, 50% Grenzfläche Putz / Entkoppl.	0,114	0,286	Ziegelmauerwerk		
	Z3	Bruch 1/3 im Putz, 1/3 Grenzfl. Putz / Entkoppl., 1/3 Grenzfl. Ziegel	0,099	0,249	Ziegelmauerwerk		
Sandstein	S1	Bruch 60% Grenzfl. Putz / Entkoppl., 40% Grenzfl. Entkoppl. / Sandstein	0,215	0,538	Sandsteinmauerwerk	0,2307	0,0174
	S2	Bruch 90% Grenzfl. Putz / Entkoppl, 10% im Putz	0,255	0,639	Sandsteinmauerwerk		
	S3	Bruch 100% im Putz	0,222	0,554	Sandsteinmauerwerk		
Kalkstein	K1	Bruch 80% im Putz, 20% Grenzfl. Putz / Entkoppl.	0,195	0,489	Kalksteinmauerwerk	0,1773	0,0202
	K2	Bruch 100% Grenzfl. Putz / Entkoppl.	0,149	0,373	Kalksteinmauerwerk		
	K3	Bruch 80% im Putz, 20% Grenzfl. Putz / Entkoppl.	0,188	0,470	Kalksteinmauerwerk		

Die ermittelten Werte sind mit ca. 0,1 – 0,23 N/mm² als vergleichsweise niedrig anzusehen, anhand der Bruchbilder ist jedoch feststellbar, dass der Abriss überwiegend im Putzmörtel erfolgte, die Haftzugfestigkeiten der Putzschicht sind daher als „Schwachstelle“ im Verbundsystem zu werten. Die Haftzugfestigkeiten der Grenzfläche Entkopplungsschicht – Untergrund bzw. Entkopplungsschicht – Putzschicht sind als deutlich höher einzuschätzen.



Abbildung 75: Demonstrator aus Sandsteinmauerwerk zum Zeitpunkt des Monitorings



Abbildung 76: Putzfläche des Sandsteinmauerwerk-Demonstrators nach dem Aufsetzen der Prüfstempel für die Ermittlung der Haftzugfestigkeiten



Abbildung 77: Bruchbild S2 im Sandsteinmauerwerk-Demonstrator



Abbildung 78: Bohrlochwandung im Bereich Kalksteinmauerwerksdemonstrator mit Gipsmörtelfuge / Entkopplungsschicht / Putzschicht ohne erkennbare Schäden oder Ablösungen

6 Arbeitspaket 5: Anlegen von Testflächen unter Praxisbedingungen bzw. von Musterachsen am Bauwerk

Musterflächen wurden entsprechend dem Projektplan an den beiden Modellobjekten in folgenden Bereichen angelegt:

- Burgruine Winterstein: Mauerkronenabschnitt am Turmstumpf
- Kirchhofmauer Kleinbrennbach: Mauerkronenabschnitt

Die Arbeiten erfolgten im Zeitraum Juli bis November 2021. Aufgrund einer Fehllieferung des werksseitig hergestellten Verfugmörtels (Trockenmörtel) machte sich eine erneute Verfugung der Mauerkronen erforderlich. Diese wurde im Frühjahr 2022 ausgeführt.

In der nachfolgenden Tabelle sind die eingesetzten Materialien aufgeführt.

Tabelle 14: Übersicht der an den Musterflächen eingesetzten Materialien und Produkte

sulfatbeständiger Unterbau- mörtel	tubag HSM M5
Abdichtungs- und Entkopp- lungsschicht	1. Auftrag: Bitumenacrylatdispersion WEBAC 5611 (Haftvermittler und Primer) 2. Auftrag: Bitumenacrylatdispersion WEBAC 5611 + reaktiver Füllstoff tubag HSV-p 00 3. Auftrag: wie 2. Auftrag 4. Auftrag: Bitumenacrylatdispersion WEBAC 5611 (Haftvermittler)
hydraulischer Versatzmörtel	maxit 950 HS M5
Verfugmörtel	maxit Sondermischung HS, M5, wasserabweisend ausgerüstet, nicht eingefärbt

6.1 Musterfläche an der Burgruine Winterstein

Die Musterfläche wurde in einem ca. 6x2 m² Grundfläche umfassenden Abschnitt der nordwestlichen Mauerkrone des Turmstumpfes angelegt.

Dabei kamen drei unterschiedliche Instandsetzungs- und Entkopplungsvarianten zur Anwendung:

- Flächige Abdichtungs- und Entkopplungsschicht unter der Mauerkronenabdeckung
- Abdichtungs- und Entkopplungsschicht in den Stoßfugen der Mauerkronenabdeckung
- Kombination beider Varianten

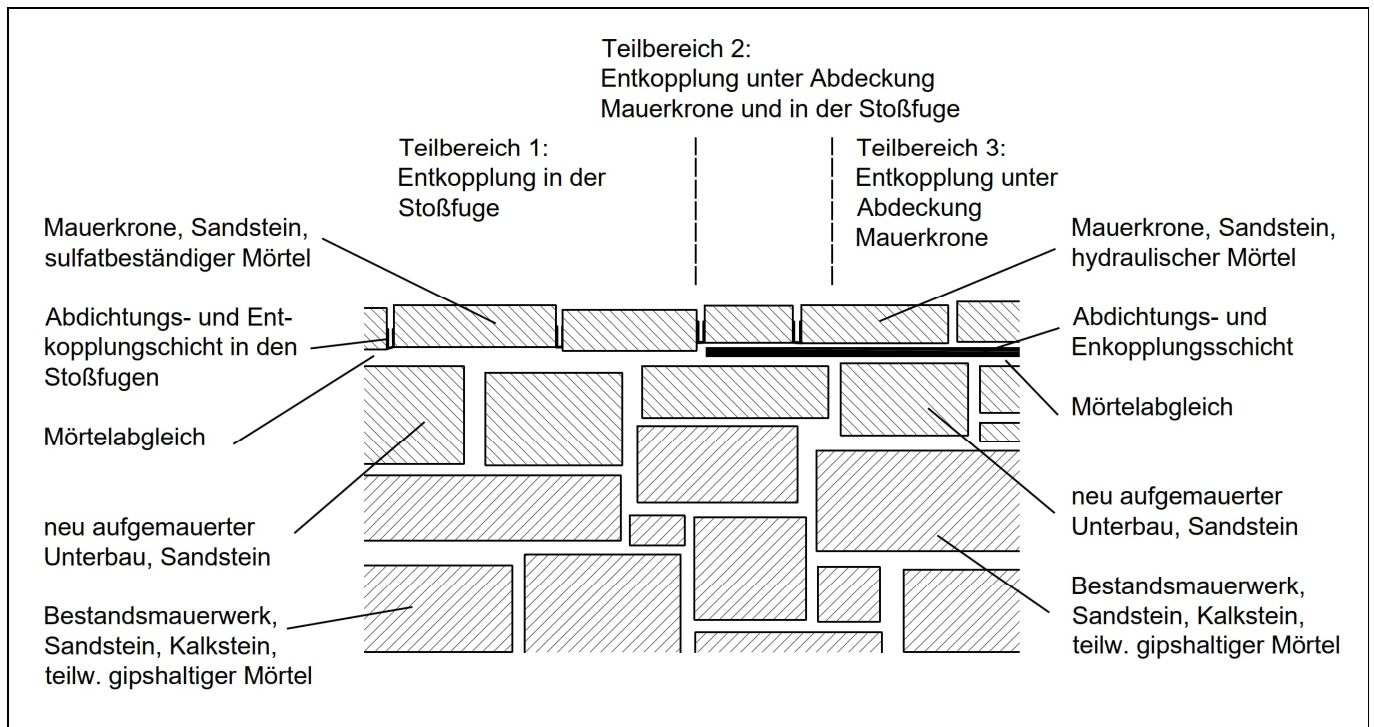


Abbildung 79: Schematischer Aufbau der Mauerkrone am Turmstumpf der Burgruine Winterstein mit den unterschiedlichen Instandsetzungsvarianten in den drei Teilbereichen



Abbildung 80: Turmstumpf der Burgruine Winterstein: Eingerüsteter Bereich vor Beginn des Anlegens der Musterflächen. Die Einarüstung wurde durch den Eigentümer und Projektpartner, die Verwaltungsgemeinschaft Waltershausen, veranlasst.



Abbildung 81: Mauerkrone im Bereich der anzulegenden Testfläche, Vorzustand



Abbildung 82: Abarbeiten der Mauerkrone im Bereich der anzulegenden Musterfläche



Abbildung 83: Aufmauern des Unterbaues für die Abdichtungs- und Entkopplungsschicht



Abbildung 84: Mörtelabgleich auf dem Unterbau



Abbildung 85: Aufbringen der Abdichtungs- und Entkopplungsschicht auf ca. 65 % der Fläche



Abbildung 86: Aufmauern der Mauerkrone



Abbildung 87: Fertig aufgemauerte Mauerkrone



Abbildung 88: Einbringen der Entkopplungsschicht in die Stoßfugen der Mauerkronenabdeckung (4. Auftrag, links im Bild) und anschließende Verfugung

Abbildung 89: Fertig verfugte Mauerkrone

6.2 Musterfläche an der Kirchhofmauer Kleinbrembach

Die Musterfläche wurde in einem ca. 3x0,6 m² Grundfläche umfassenden Abschnitt der nordseitigen Kirchhofmauer angelegt.

Auch hier kamen – analog zur Burg Winterstein - drei verschiedene Instandsetzungs- und Entkopplungsvarianten zur Anwendung:

- Flächige Abdichtungs- und Entkopplungsschicht unter der Mauerkronenabdeckung
- Abdichtungs- und Entkopplungsschicht in den Stoßfugen der Mauerkronenabdeckung
- Kombination beider Varianten

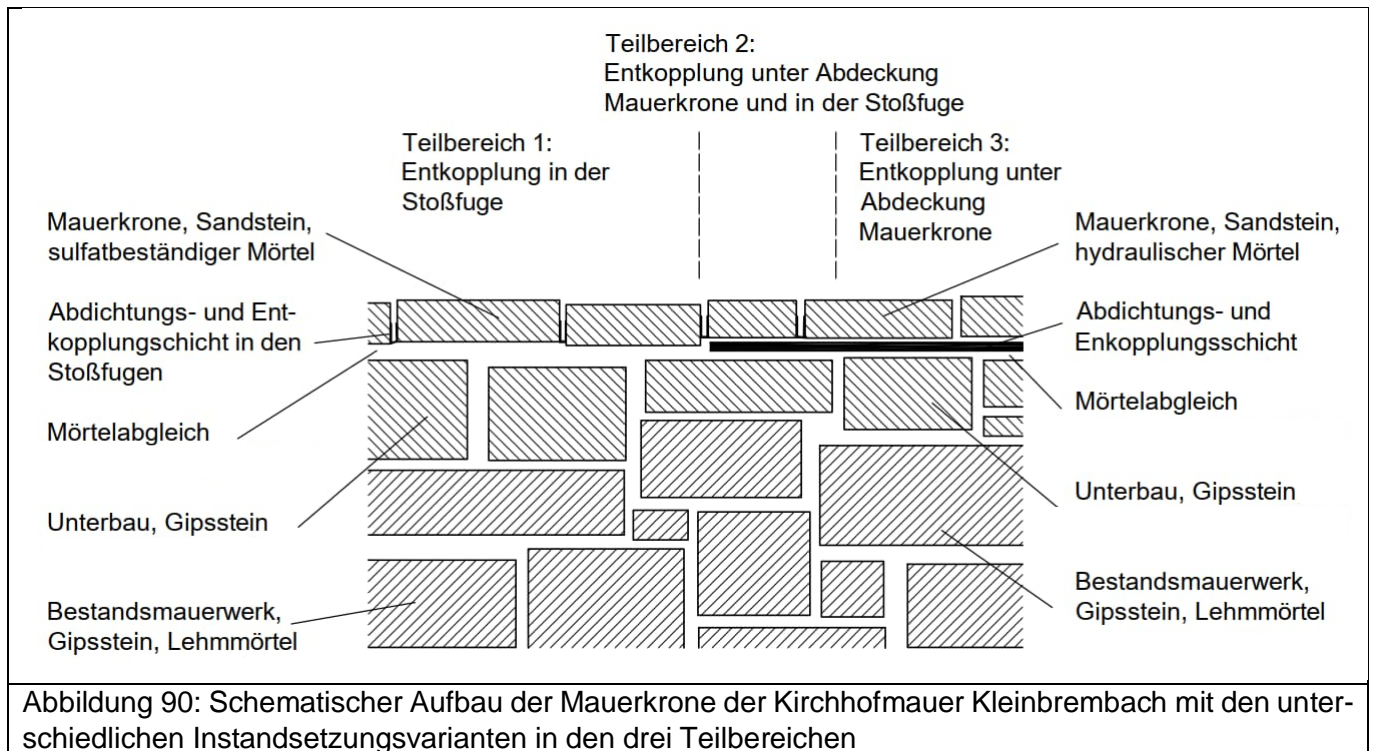




Abbildung 91: Teilbereich der Kirchhofmauer nach Abnahme der Mauerkronenabdeckung



Abbildung 92: Oberseite Bestandsmauerwerk nach Abnahme der Mauerkronenabdeckung



Abbildung 93: Unterbau aus sulfatbeständigem Mörtel für den Auftrag der flächigen Abdichtungs- und Entkopplungsschicht



Abbildung 94: Auftrag der Abdichtungs- und Entkopplungsschicht (1. Auftrag mit reaktivem Füllstoff). Im Teilbereich rechts im Bild erfolgt eine Abdichtung in den Stoßfugen der Abdeckung.



Abbildung 95: Aufmauern der Mauerkronenabdeckung



Abbildung 96: Auftrag der Abdichtungs- und Entkopplungsschicht in den Stoßfugen der Mauerkronenabdeckung (Teilbereiche 1 und 2).



Abbildung 97: Verfugung der Stoßfugen der Mauerkronenabdeckung

Im Februar 2023 wurden die Musterflächen einem eingehenden Monitoring, verbunden mit dem Anlegen von Mauerwerksöffnungen, unterzogen. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Verbundwirkung zwischen den Mörteln und den Entkopplungsschichten nach wie vor gegeben war.



Abbildung 98: Teilbereich der Mauerkrone des Turmstumpfes der Burgruine Winterstein: Auf den Oberflächen sind lediglich leichte Kalkaussinterungen erkennbar.



Abbildung 99: Mauerwerksöffnung im Bereich der Mauerkrone Turmstumpf: Die flächige Entkopplungsschicht ist intakt und in gutem Verbund (Pfeil), die Blaufärbung des darunter befindlichen Unterbaumörtels resultiert aus Bindemittelumwandlungen (Polysulfidbildungen)



Abbildung 100: Teil der Musterfläche der Kirchhofmauer: Im Bildvordergrund sind einige Fugenflankenablösungen erkennbar, ansonsten ist die Aufmauerung ungeschädigt.



Abbildung 101: Mauerwerksöffnung an der Mauer oberseite: Auch hier ist die Verbundwirkung zwischen Entkopplungsschichten sowohl in den Stoßfugen als auch in flächiger Ausbildung darunter gegeben.

7 Zusammenfassung der Arbeitsergebnisse und Evaluierung an den Modellobjekten

Für das Entkopplungssystem wurde ein in der Baupraxis bewährtes Abdichtungssystem auf Basis einer Bitumen-Acrylat-Dispersion adaptiert und für die zusätzlichen Anforderungen angepasst.

Im Zuge des Projektes wurde ein weiteres, bitumenfreies Entkopplungsmaterial getestet, welches eine Neuentwicklung des assoziierten Projektpartners darstellt.

Bereits das Monitoring der Mauerwerksdemonstratoren zeigte, dass eine vollständige Entkopplung zueinander unverträglicher Mauerwerkssysteme möglich ist. Die Nachuntersuchung der Musterflächen an den beiden Modellobjekten bestätigte diese Erkenntnisse.

Perspektiven für die Anwendung einer solchen Entkopplung werden in erster Linie im Zusammenhang mit der Sanierung von Mauerkronen gesehen, aber auch in der Verbindung von Bestandsmauerwerk zu neu geschaffenen Bauteilen. Eine Anbindung der entkoppelten Mauerwerksstrukturen ist prinzipiell über die Haftzugeigenschaften der Entkopplungsschicht gegeben, sollte aber, insbesondere bei höheren statisch-konstruktiven Anforderungen, durch zusätzliche Maßnahmen gesichert werden. Hier sind beispielsweise Zugankerverbindungen, die die Entkopplungsschicht durchdringen, denkbar. Diesbezügliche Untersuchungen erfolgten allerdings im Projektrahmen nicht. Als großer Vorteil des gewählten Entkopplungssystems erweist sich dagegen dessen thermoplastisches Verhalten, welches eine Abdichtungswirkung auch bei beträchtlichen thermisch- oder hygisch induzierten Mauerwerksbewegungen beibehält.

Bezüglich der Ausbildung der Entkopplungsebene im Bereich von Mauerkroneninstandsetzungen sind – je nach den Wasseraufnahmeeigenschaften des Mauermaterials – sowohl flächige Entkopplungen als auch Abdichtungen im Bereich der Stoßfugen möglich. Beide Varianten haben Vor- und Nachteile: Eine flächige Abdichtung weist deutlich weniger Schwachstellen gegenüber einer Migration von Wasser und darin gelöster Bestandteile auf, fungiert jedoch gleichzeitig als Sperre und möglicherweise als konstruktive Schwächezone. Durch Entkopplungen in der Fugenebene wird Letzteres vermieden, aber um den Preis eventuell höherer Anfälligkeit für eine Ionenmigration bei Feuchtebelastung. Zudem ist hier entsprechend dichtes Steinmaterial Voraussetzung für die Wirksamkeit.

Wesentlich für die Dauerhaftigkeit und Funktionsfähigkeit der Entkopplung ist die Einhaltung einer Mindestschichtdicke, realisierbar durch wenigstens zweimaligen Auftrag des Materials mit reaktivem Füllstoff. Eine Mindestschichtdicke von 2 mm sollte dabei nicht unterschritten werden. Im Falle der bitumenfreien Variante ist die Mindestschichtdicke sogar von noch größerer Bedeutung: Die Erfahrungen haben gezeigt, dass ein Durchbrechen der Feuchtesperre bei zu geringer Schichtdicke hier noch eher möglich erscheint als bei der bitumenhaltigen Variante der Entkopplungsschicht.

Der Anwendungsfall „Entkopplung von Putzflächen vom Mauerwerk“ wird prinzipiell als realisierbar erachtet, jedoch wird dadurch der Feuchtehaushalt des Gesamtsystems Mauerwerk - Oberfläche stark verändert. Daher sind hier die Einsatzmöglichkeiten eingeschränkt.

Auch nach Projektabschluss verbleiben die Musterflächen an den beiden Modellobjekten und stehen somit auch für ein längerfristiges Monitoring zur Verfügung. Gleiches gilt für die Mauerwerksdemonstratoren in ihrer Exposition im Außenraum.

Über den gesamten Projektzeitraum erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit den beiden Projektpartnern, der Stadt Waltershausen und der WEBAC Chemie GmbH.

8 Öffentlichkeitsarbeit

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes wurden in einem Abschlussbericht zusammengefasst, welcher über die website der Deutschen Bundesstiftung Umwelt allgemein zugänglich ist.

Im April 2023 fand ein wissenschaftliches Kolloquium statt, das sich dem Thema „Gipshaltiges Mauerwerk – Sanierungsprobleme und -strategien“ widmete und auf dem u.a. die Ergebnisse des Forschungsprojektes vorgestellt wurden. Die Vorträge des Kolloquiums sind in einem Band innerhalb der Schriftenreihe der IFS-Berichte zusammengefasst. /6/

9 Fazit

Das Forschungsprojekt hat gezeigt, dass es möglich ist, unter realen Bedingungen am Bauwerk zueinander unverträgliche Mörtelsysteme zu entkoppeln, wenn dies aus Gründen von Instandsetzungen, Modernisierungen und geplanten Umnutzungen unumgänglich ist. Damit existiert eine Instandsetzungsmethode, die vor allem auf die Anwendung im Bestandserhalt hinzielt. Das System hat sich bereits in seiner Ausgangskonstellation am Bau praktisch bewährt und kann auch dort eingesetzt werden, wo die Notwendigkeit einer Abdichtung, weniger einer Entkopplung zueinander unverträglicher Mörtelsysteme besteht.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- /1/ Arendt, C., Seele, J.: Feuchte und schädliche Salze in Gebäuden, Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinfelden-Echterdingen, 2000
- /2/ Auras, M., Zier, H.-W. (Hrsg.): Gipsmörtel im historischen Natursteinmauerwerk und an den Fassaden, WTA-Schriftenreihe, Heft 30, Kempten / Allgäu, 2008
- /3/ Auras, M.: Kleiner Exkurs zu den Auswirkungen des Klimawandels auf historisches Mauerwerk – Thermische Effekte, in: Gipshaltiges Mauerwerk am Baudenkmal, Erhalten – Instandsetzen – Ersetzen?, IFS-Bericht 57/2019, S. 85-90
- /4/ Deutsch, H.-P.: Bauzustandsbericht Burgruine Winterstein, Architekturbüro Deutsch, Winterstein 2015, unveröffentlicht
- /5/ Dreuse, H.: Untersuchungen zu durch Treibmineralbildung verursachten Volumenveränderungen - messtechnische Erfassung und Auswertung von Längenänderungen an Prismensätzen, Untersuchungsbericht B 16.18.109.01, MFPA Weimar 2018 (unveröff.)
- /6/ Gipshaltiges Mauerwerk – Sanierungsprobleme und –strategien, IFS-Bericht Nr. 64, Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz 2023
- /7/ <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/haushalt-wohnen/streumittel-streusalz#gewusst-wie>, Abruf 21.04.2020
- /8/ https://www.WEBAC.de/downloads/Technische_Merkblaetter/Deutsch/2018-12/TM__WEBAC-5611__2018-12__DE.pdf
- /9/ Katzschmann, L., Aselmeyer, G., Auras, M.: Natursteinkataster Thüringen, Bericht 23 – 2006, Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz 2006
- /10/ Lehfeldt, P.: Bau- und Kunstdenkmäler Thüringens, Herzogthum Sachsen-Coburg und Gotha, Bd. 2, Justizamt Waltershausen, Heft XI, Verlag Gustav Fischer, Jena 1891
- /11/ Wangenheim, F.H.A.v.: Beiträge zu einer Familiengeschichte der Freiherren von Wangenheim, Universitäts-Buchdruckerei, Göttingen, 1874
- /12/ WTA-Merkblatt 2-11-18/D (Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Außenfassaden)
- /13/ WTA-Merkblatt 3-13-19/D: Salzreduzierung an porösen mineralischen Baustoffen mittels Kompressen, Fraunhofer IRB-Verlag
- /14/ Zier, H.-W., Weise, G., Uschmann, W.: Flächendeckende Aufnahme von Schäden an Baustoffen, Forschungsbericht 108 07 027 im Rahmen des Umweltforschungsplanes des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 1994
- /15/ Zier, H.-W., Dreuse, H.: Gipsmörtel und Gipsstein in Bauwerken – Probleme und Ansätze für die Sanierung, in: Tagungsband Natursteinsanierung Stuttgart 2012, Stuttgart, Fraunhofer IRB-Verlag, S. 12 - 23

Anlage I: Mauerrest der Kapelle der Burg Winterstein: Beschreibung der entnommenen Materialproben, Darstellung der Ergebnisse der Untersuchungen zum Bestand und zur Belastungssituation

1 Lokalisierung und Beschreibung der Probenahmestellen am Bauwerk

Die Probenahme am Bauwerk erfolgte durch Entnahme von oberflächennahen Stückproben, teilweise durch manuelle Bauteilöffnungen.

In den nachfolgenden Abbildungen und Tabellen sind die Lagen der Probenahmestellen gekennzeichnet und die Proben beschrieben.

Die Probenindizes bedeuten:

WST ... Winterstein
B ... Burg
1 ff. ... lfd. Nummer Probenahmestelle

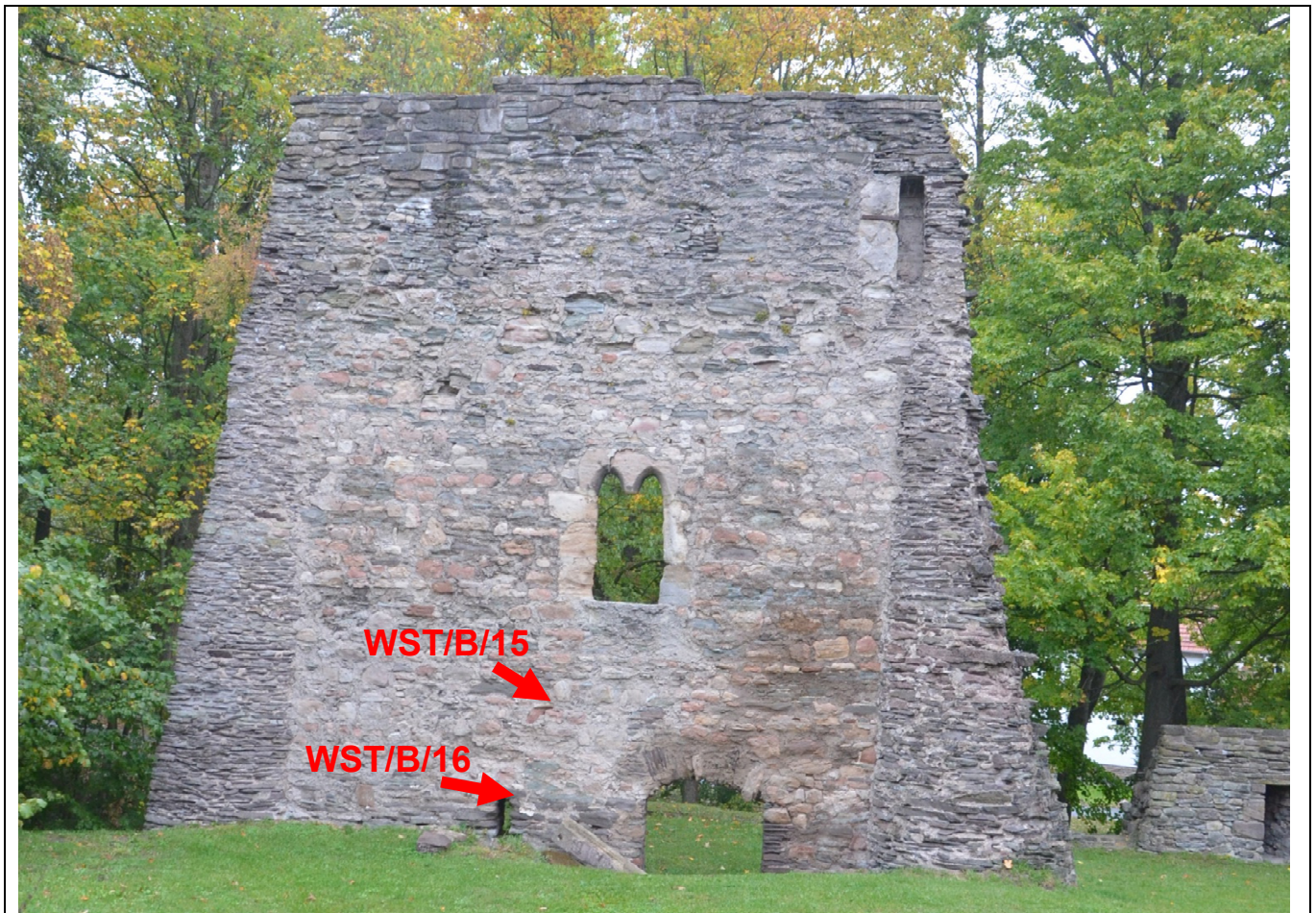


Abbildung 1: Mauerrest der Kapelle, Südseite mit Lokalisierung der Probenahmestellen.



Abbildung 2: Mauerrest der Kapelle, Nordseite mit Lokalisierung der Probenahmestellen.

Tabelle 1: Beschreibung der entnommenen Mauerwerksproben am Mauerrest der Kapelle (Materialbezeichnungen beruhen auf visuellen Voreinschätzungen)

Probe	Entnahmeort	Entnahme-höhe	Entnahme-tiefe	Beschreibung
		cm	cm	
WST/B/10M	Nordseite	ca. 190 ü. OKE	0 - 3	Mauermörtel
WST/B/11M	Nords., Bog.-laib.	ca. 170 ü. OKE	0 - 3	Mauermörtel
WST/B/15M1	Südseite	ca. 160 ü. OKE	0 - 3	Verfugmörtel, grobkörnig, hell
WST/B/15M2	Südseite	ca. 160 ü. OKE	3	Mauermörtel
WST/B/16M1	Südseite	ca. 30 ü. OKE	0 - 3	Verfugmörtel, grobkörnig, hell
WST/B/16M2	Südseite	ca. 30 ü. OKE	2	Mauermörtel
WST/B/17.1	Nordseite	ca. 80 ü. OKE	0 - 2	Mauermörtel, kalkgebunden
WST/B/17.2	Nordseite	ca. 80 ü. OKE	6 - 10	Mauermörtel, kalkgebunden
WST/B/18.1	Nordseite	ca. 200 ü. OKE	0 - 2	Mauermörtel, gipsgebunden
WST/B/18.2	Nordseite	ca. 200 ü. OKE	10 - 12	Mauermörtel, gipsgebunden
WST/B/19	Nordseite	ca. 140 ü. OKE	0 - 2	Mauermörtel, gipsgebunden
WST/B/20	Nordseite	ca. 120 ü. OKE	0 - 2	Verfugmörtel, grau

2 Untersuchungen zum Materialbestand und Belastungssituation

2.1 Bestimmung der Materialfeuchten

Die Bestimmung der Materialfeuchten in den Proben erfolgte nach Wägung (ca. 24 Stunden nach Entnahme der letzten Proben) zunächst durch Trocknung bei 40°C über 4 Tage („MF40“). Anschließend sind die Proben einer weiteren Trocknung über 3 Tage bei 105°C („MF105“) unterzogen worden.

Über die Trocknung bei 40°C sollte vor allem das ungebundene Wasser in den Proben erfasst werden.

Für eine Probenauswahl wurden die Sättigungsfeuchten („SF“) – Lagerung der bei 105°C getrockneten Proben über 5 Tage unter Wasser – bestimmt und daraus die Durchfeuchtungsgrade („DFG“) berechnet.

In den Tabellen und den nachfolgenden Abbildungen sind die Materialfeuchten und die Durchfeuchtungsgrade über den mittleren Entnahmetiefen der Proben für die hier untersuchten Probenahmestellen dargestellt. Berechnet wird die „mittlere Tiefe“ als arithmetischer Mittelwert aus der minimalen und maximalen Tiefe der Probenahme für die jeweilige Teilprobe.

Tabelle 2: Mittlere Probenahmetiefen und Materialfeuchten an untersuchten Mörtelproben des Mauerrestes der Kapelle

Probe	Material	mittlere Tiefe	MF40	MF105	SF	DFG
		cm	Masse-%	Masse-%	Masse-%	%
WST/B/10M	Mauermörtel	1,5	0,81	21,63		
WST/B/11M	Mauermörtel	1,5	1,08	20,35	18,17	6
WST/B/15M1	Verfugmörtel, grobkörnig, hell	1	2,55	4,32		
WST/B/15M2	Mauermörtel	2	1,40	13,17		
WST/B/16M1	Verfugmörtel, grobkörnig, hell	1	4,07	7,10		
WST/B/16M2	Mauermörtel	2	7,94	20,61	11,83	67
WST/B/17.1	Mauermörtel, kalkgebunden	1	6,79	7,65		
WST/B/17.2	Mauermörtel, kalkgebunden	8	8,54	8,73		
WST/B/18.1	Mauermörtel, gipsgebunden	1	1,08	21,15	8,16	13
WST/B/18.2	Mauermörtel, gipsgebunden	11	2,74	18,76		
WST/B/20	Verfugmörtel, grau	1	2,27	3,65		

Aus den Differenzen zwischen den bei 40 und 105 °C bestimmten Materialfeuchten der Mörtel wurden – unter der Annahme, dass der Masseverlust durch die Wasserabgabe aus Gips (Dihydrat) entsteht – „fiktive Gipsgehalte“ („FG“) berechnet. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle 3 ebenso wie die pH-Werte und elektrischen Leitfähigkeiten der aus einer Probenauswahl gewonnenen Eluate (Eluierung 1:20 MT) dargestellt.

Tabelle 3: Mittlere Probenahmetiefen, pH-Werte, elektrische Leitfähigkeiten („LF“) und „fiktive Gipsgehalte“ („FG“) an untersuchten Mörtelproben des Mauerrestes der „Kapelle“

Probe	Material	mittlere Tiefe	pH-Wert	elektr. LF	FG
		cm		µS/cm	Masse-%
WST/B/10M	Mauermörtel	1,5			109
WST/B/11M	Mauermörtel	1,5			102
WST/B/15M1	Verfugmörtel, grobkörnig, hell	1	9,77	2.060	11
WST/B/15M2	Mauermörtel	2			66
WST/B/16M1	Verfugmörtel, grobkörnig, hell	1	9,57	3.150	18
WST/B/16M2	Mauermörtel	2	8,05	2.590	67
WST/B/17.1	Mauermörtel, kalkgebunden	1			5
WST/B/17.2	Mauermörtel, kalkgebunden	8			1
WST/B/18.1	Mauermörtel, gipsgebunden	1	7,89	2.260	106
WST/B/18.2	Mauermörtel, gipsgebunden	11	7,82	2.240	86
WST/B/20	Verfugmörtel, grau	1	7,35	1.708	8

Die Ergebnisse der Berechnung der „fiktiven Gipsgehalte“ bestätigen die bereits getroffene Annahme, dass es sich bei den ursprünglichen Mauermörteln um Gipsmörtel handelt. Die Werte über 100 % können darauf hinweisen, dass die Mörtel weitere Salzhydrate enthalten. Die höheren pH-Werte der Proben WST/B/15M1 und /16M1 (jeweils >9) deuten auf hydraulisch gebundene Mörtel hin.

2.2 Untersuchungen zur Belastung mit löslichen Anionen und Kationen

Zur Charakterisierung der Belastungssituation mit löslichen Salzen erfolgte an einer repräsentativen Auswahl der Probeneluat (2 Kalkmörtel und 2 gipsgebundene Mörtel) die Ermittlung der Gehalte löslicher Kationen und Anionen (Bestimmung von Chlorid (Cl⁻), Sulfat (SO₄²⁻) und Nitrat (NO₃⁻) mit Anionen-Chromatographie und Calcium (Ca²⁺), Magnesium (Mg²⁺), Natrium (Na⁺) sowie Kalium (K⁺) mittels ICP-OES).

Folgende Untersuchungsverfahren kamen zur Anwendung:

- /1/ DIN EN 12457-4:2003-01 Charakterisierung von Abfällen - Auslaugung; Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen - Teil 4: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 l/kg für Materialien mit einer Korngröße unter 10 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung)
- /2/ DIN EN ISO 10304-1:2009-07 Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie - Teil 1: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat (ISO 10304-1:2007)
- /3/ DIN EN ISO 11885:2009-09 Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) (ISO 11885:2007)
- /4/ DIN EN ISO 10523:2012-04 Wasserbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Werts (ISO 10523:2008)
- /5/ DIN EN 27888:1993-11 Wasserbeschaffenheit; Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (ISO 7888:1985)

Tabelle 4: pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit (LF) in Eluaten aus Mörtelproben sowie wasserlösliche An- und Kationen (in M.-%) (Belastungsstufe nach Tabelle 5)

Probe	Material	mittl. Tiefe	pH-Wert	LF	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Dimension		cm		µS/cm	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%
WST/B/16M1	Verfugmörtel, grobkörnig, hell	1,0	9,57	3.150	0,21	0,80	5,51	0,23	1,76	1,96	0,05
WST/B/16M2	Mauermörtel, gipsgebunden	2,0	8,05	2.590	0,07	0,32	9,61	0,09	0,08	4,06	0,04
WST/B/18.1	Mauermörtel, gipsgebunden	1,0	7,89	2.260	0,01	0,02	9,08	0,01	0,01	3,63	0,01
WST/B/20	Verfugmörtel, kalkgebunden	1,0	7,35	1.708	0,01	0,01	3,28	0,13	0,04	0,78	0,05

Tabelle 5: Belastungsstufen mit bauschädlichen Salzen - hier auf lösliche Anionen bezogen (nach: C. Arendt & J. Seele: „Feuchte und schädliche Salze in Gebäuden“, Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinfelden-Echterdingen, 2000)

Sulfat in M.-%	Chlorid in M.-%	Nitrat in M.-%	Konzentration in mmol/kg	Wertung
bis 0,024	bis 0,009	bis 0,016	bis 2,5	unbelastet - Stufe 0
bis 0,077	bis 0,028	bis 0,050	bis 8,0	gering belastet – Stufe I
bis 0,24	bis 0,09	bis 0,16	bis 25,0	mittel belastet – Stufe II
bis 0,77	bis 0,28	bis 0,50	bis 80,0	hoch belastet – Stufe III
ab 0,77	ab 0,28	ab 0,50	ab 80,0	extrem belastet – Stufe IV

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Gehalte der An- und Kationen zur besseren Zuordnung zu Salzarten in mval/kg (Ionenwertigkeit x mmol/kg) grafisch dargestellt.

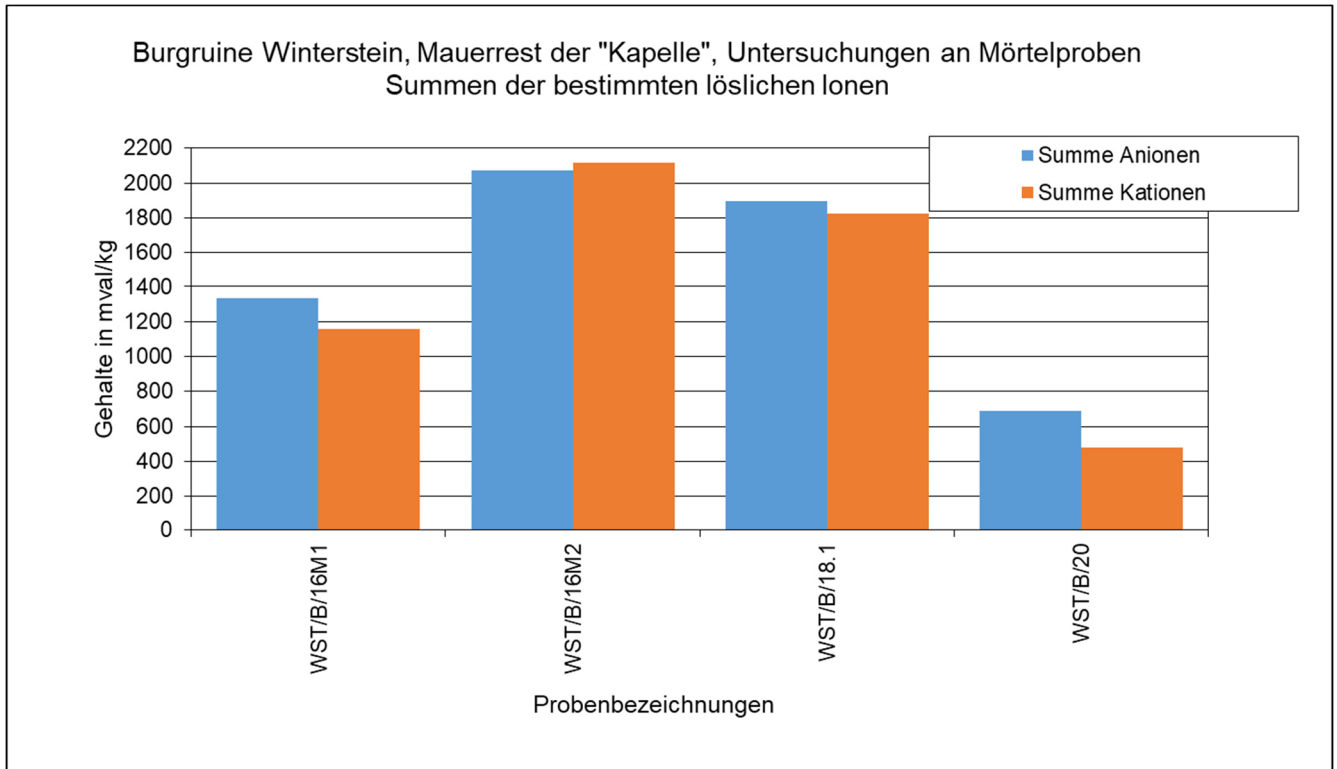


Abbildung 3: Summen der An- und Kationen in ausgewählten Proben (Werte in mval/kg)

Der Vergleich zeigt bei den untersuchten Proben mit den höchsten Ionengehalten ein annähernd ausgeglichenes Verhältnis der Anionen- und Kationengehalte, was darauf hindeutet, dass neben den analysierten keine nennenswerten weiteren Anteile nicht bestimmter Ionen vorliegen.

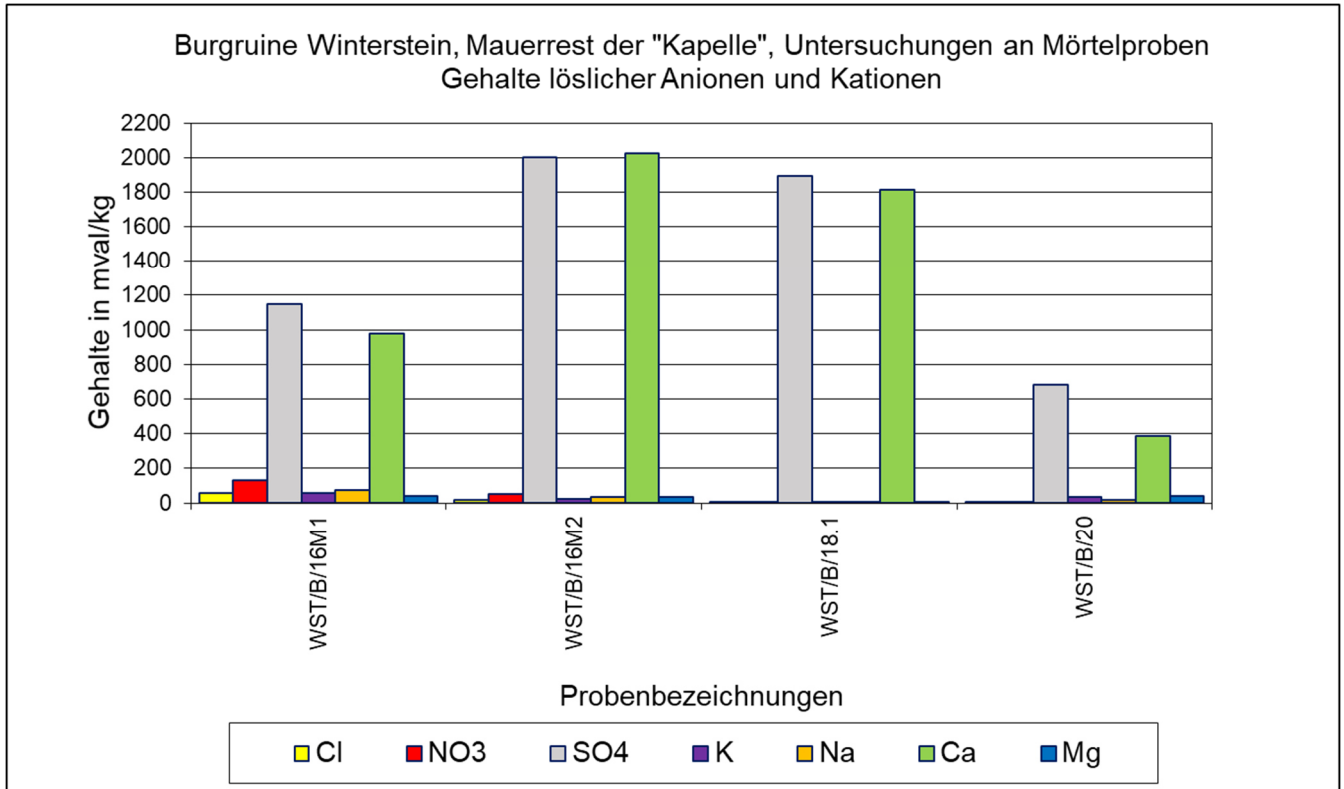


Abbildung 4: Gehalte der ermittelten An- und Kationen an einer Auswahl gewonnener Proben (Werte in mval/kg)

Die untersuchten Mörtelproben WST/B/16M2 und /18.1 sind offensichtlich gipshaltige Mörtel. Die übrigen Proben sind als Kalkmörtel zu charakterisieren. Bei allen vier untersuchten Proben sind allerdings die Hauptbestandteile löslicher Ionen Calcium und Sulfat. Diese entstammen dem gipshaltigen Bindemittel bzw. sind (im Falle der Kalkmörtelproben) aus den Gipsmörteln eingewandert.

Zur Charakterisierung der weiteren löslichen Ionen sind im Diagramm in Abbildung 5 die Gehalte an Calcium und Sulfat ausgeblendet.

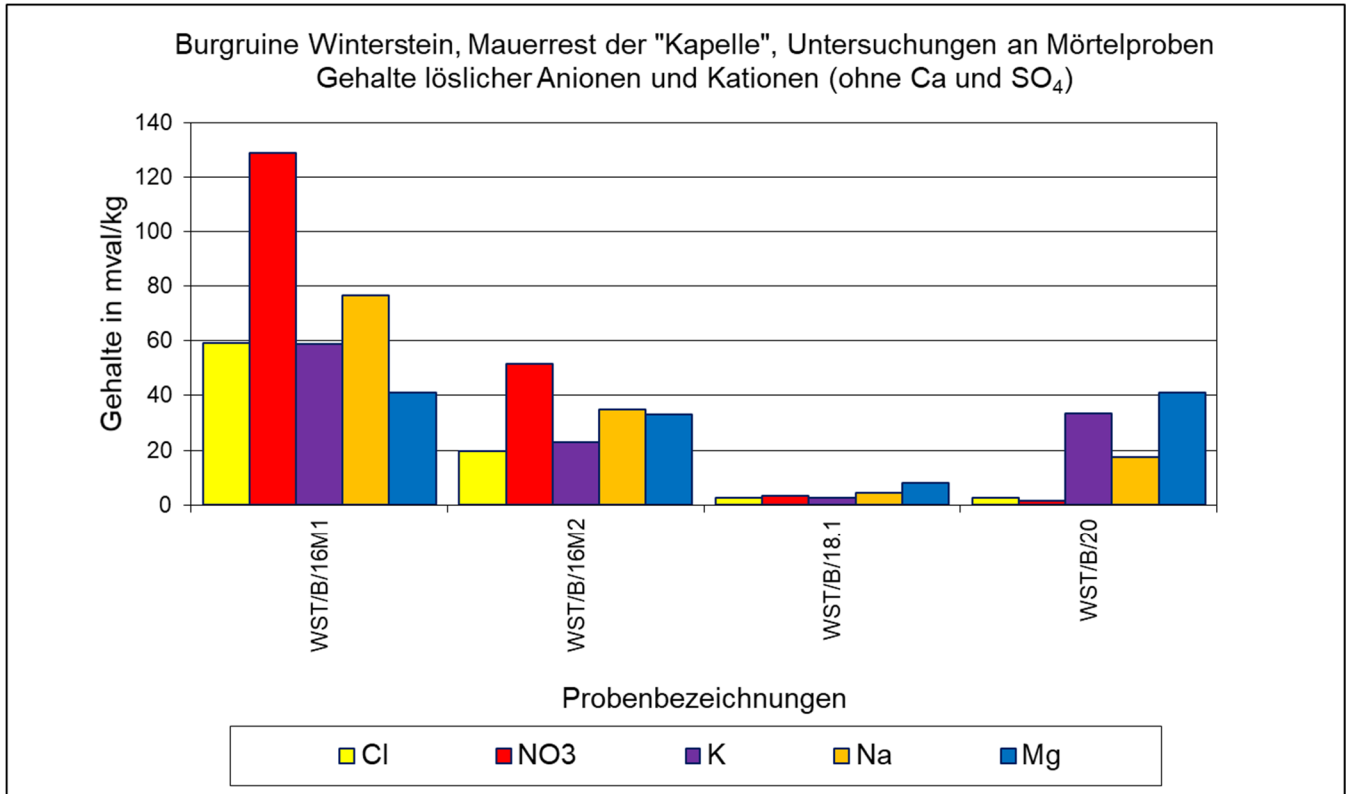


Abbildung 5: Gehalte der ermittelten An- und Kationen (außer Calcium und Sulfat) an einer Auswahl gewonnener Proben (Werte in mval/kg)

Anlage II: Turmstumpf der Burgruine Winterstein: Beschreibung der entnommenen Materialproben, Darstellung der Ergebnisse der Untersuchungen zum Bestand und zur Belastungssituation

1 Lokalisierung und Beschreibung der Probenahmestellen am Bauwerk

Die Probenahme am Bauwerk erfolgte durch Entnahme von Bohrkernproben mittels Trockenbohrverfahrens bzw. manueller Bauteilöffnung. Die Gewinnung der Bohrkernproben im Durchmesser von ca. 70 mm erfolgte abschnittsweise in Einzellängen von maximal 10 cm. Die Bohrkernabschnitte sollten möglichst Mörtel- und Mauersteinbestandteile umfassen.

In den nachfolgenden Abbildungen und Tabellen sind die Lagen der Probenahmestellen gekennzeichnet und die Proben beschrieben.

Die Probenindizes bedeuten:

WST ... Winterstein
 B ... Burg
 1 ff. ... lfd. Nummer Probenahmestelle



Abbildung 1: Südseite des Turmstumpfes mit Lokalisierung der Probenahmestellen



Abbildung 2: Westseite des Turmstumpfes mit Lokalisierung der Probenahmestellen



Abbildung 3: Nordseite des Turmstumpfes mit Lokalisierung der Probenahmestelle

Die Materialbezeichnungen in den folgenden Übersichten beziehen sich auf Voreinschätzungen aufgrund der Phänomenologie des Natursteins und der Mörtel.

Probenahmestelle WST/B/01

Tabelle 1: Kennzeichnung der Proben und Angaben zu der Probenentnahmestelle WST/B/01

Bezeichnung WST/B/	Entnahmetiefe in cm	Material	Anmerkungen
01	Die Probenahmestelle befindet sich an der Westseite des Turmstumpfes. Die Proben wurden als Bohrkernproben in ca. 1 m Höhe über OKE entnommen. Das Mauerwerk im Probenahmebereich besteht aus Sandsteinmauerwerk.		
01.1	0 – 5	Mörtel	01.1M – Verfügmörtel, hydraul. Mörtel mit Salzausblühungen
01.2	5 - 10	Mörtel, Sandstein	Probenteilung: 01.2S – roter Sandstein 01.2M – Mörtel wie 01.1M
01.3	10 - 14	Mörtel	Probenteilung: 01.3M – Mörtel wie 01.1M, Reparatur?, evtl. 2 Mörtel
01.4	14 - 18	Mörtel	Probenteilung: 01.4M – Mörtel wie 01.1M
01.5	18 - 26	Mörtel	Probenteilung: 01.5M1 – Mörtel wie 01.1M 01.5M2 – lehmhaltiger Mörtel
01.6	26 - 30	Mörtel	Probenteilung: 01.6M1 – sehr entfestigter Mauermörtel 01.6M2 – Mörtel wie 01.5M2
01.7	30 - 40	Mörtel	Probenteilung: 01.7S – grauer Sandstein 01.7M – Mauermörtel
01.8	40 - 41	Mörtel	Probenteilung: 01.8M – Mauermörtel, stark entfestigt
01.9	41 - 42	Mörtel	Probenteilung: 01.9M – Mauermörtel, wie 01.8M



Abbildung 4: Kernbohrung WST/B/01, Bohrlochstirn nach Entnahme der Teilprobe WST/B/01.6 in 30 cm Bohrtiefe

Probenahmestelle WST/B/02

Tabelle 2: Kennzeichnung der Proben und Angaben zu der Probenentnahmestelle WST/B/02

Bezeichnung WST/B/	Entnahmetiefe in cm	Material	Anmerkungen
02	Die Probenahmestelle befindet sich an der Südseite des Turmstumpfes. Die Proben wurden als Bohrkernproben in ca. 80 cm Höhe über OKE entnommen. Das Mauerwerk im Probenahmebereich besteht aus Sandsteinmauerwerk.		
02.1	0 - 1	Mörtel	02.1M – Verfügmörtel, hydraul. Mörtel mit Krusten und Salzausblühungen
02.2	1 - 4	Mörtel	Probenteilung: 02.2M1 – Verfügmörtel wie 02.1M 02.2M2 – Mauermörtel, hellbraun, grobkörnig
02.3	4 - 11	Sandstein, Mörtel	Probenteilung: 02.3S – grauer Sandstein 02.3M – Mörtel wie 02.2M2
02.4	11 - 15	Sandstein, Mörtel	Probenteilung: 02.4S – grauer Sandstein 02.4M – Mörtel wie 02.2M2
02.5	15 - 20	Sandstein, Mörtel	Probenteilung: 02.5S – grauer Sandstein 02.5M – Mauermörtel wie 02.2M2, sehr gute Festigk. nur unmittelb. am Sst., ansonst. sehr entfestigt
02.6	20 - 26	Sandstein, Mörtel	Probenteilung: 02.6S – grauer Sandstein 02.6M – Mörtel wie 02.2M2
02.7	26 - 31	Sandstein, Mörtel	Probenteilung: 02.7S – grauer Sandstein 02.7M1 – Mauermörtel wie 02.2M2 02.7M2 – Verpressmörtel, dunkelgrau
02.8	31 - 36	Sandstein, Mörtel	Probenteilung: 02.8S – grauer Sandstein 02.8M1 – Mauermörtel wie 02.2M2 02.8M2 – Verpressmörtel, dunkelgrau



Abbildung 5: Kernbohrung WST/B/02, Bohrlochstirn nach Entnahme der Teilprobe WST/B/02.5 in 20 cm Bohrtiefe



Abbildung 6: Kernbohrung WST/B/02, Bohrlochstirn nach Entnahme der Teilprobe WST/B/02.7 in 31 cm Bohrtiefe. Gut erkennbar ist der dunkle Verpressmörtel.

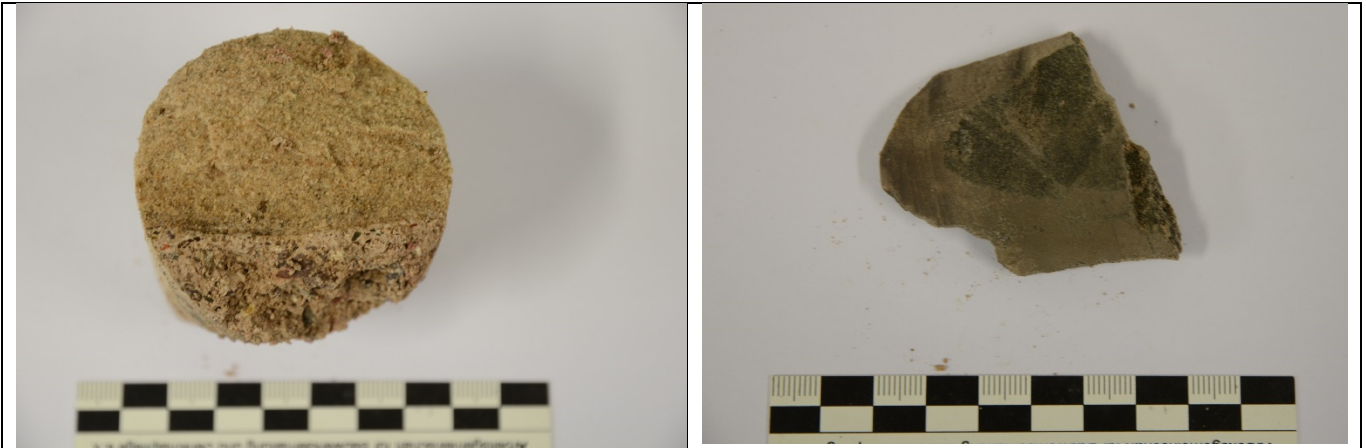


Abbildung 7: Bohrkernabschnitt WST/B/02.5 mit dem gelbgrauen Sandstein und dem anhaftenden Mauermörtel

Abbildung 8: Verpressmörtel WST/B/02.7M2

Probenahmestelle WST/B/03

Tabelle 3: Kennzeichnung der Proben und Angaben zu der Probenentnahmestelle WST/B/03

Bezeichnung WST/B/	Entnahmetiefe in cm	Material	Anmerkungen
03	Die Probenahmestelle befindet sich an der Südseite des Turmstumpfes. Die Probe wurde als Stückprobe in einer Setzfuge in ca. 100 cm Höhe über OKE entnommen. Das Mauerwerk im Probenahmebereich besteht aus Sandsteinmauerwerk, Mauermörtel und Versetzhilfen (Schieferstücke).		
03.1	0 – 2	Sandstein, Mörtel	03.1M – Mauermörtel



Abbildung 9: Probenahmestelle WST/B/03 im Bereich einer Setzfuge, erkennbar sind die Versetzhilfen

Probenahmestelle WST/B/04

Tabelle 4: Kennzeichnung der Proben und Angaben zu der Probenentnahmestelle WST/B/04

Bezeichnung WST/B/	Entnahmetiefe in cm	Material	Anmerkungen
04	Die Probenahmestelle befindet sich an der Südseite des Turmstumpfes. Die Probe wurde als Stückprobe im Mauerwerk in ca. 140 cm Höhe über OKE entnommen. Das Mauerwerk im Probenahmebereich besteht aus Mischmauerwerk (Sand- und Kalkstein).		
04.1	0 – 5	Mörtel	04.1M – Verugmörtel mit Salzausblühungen
04.2	5 - 8	Mörtel	04.2M – Mauermörtel, stark entfestigt



Abbildung 10: Probenahmestelle WST/B/04

Probenahmestelle WST/B/05

Tabelle 5: Kennzeichnung der Proben und Angaben zu der Probenentnahmestelle WST/B/05

Bezeichnung WST/B/	Entnahmetiefe in cm	Material	Anmerkungen
05	Die Probenahmestelle befindet sich an der Südseite des Turmstumpfes in der gemauerten Fensterlaibung. Die Probe wurde als Stückprobe im Mauerwerk entnommen. Das Mauerwerk im Probenahmebereich besteht aus Mischmauerwerk (Sand- und Kalkstein).		
05	0 – 5	Mörtel	05M – Mauermörtel, stark entfestigt, enthält Steinbruchstücke bis 20 mm Durchmesser, rötliche Kiese, wenig gerundet



Abbildung 11: Probenahmestelle WST/B/05 in der Laibungsfläche, gut erkennbar ist der durchgehende vertikale Riss etwa in der Mitte des Mauerwerks

Probenahmestelle WST/B/06

Tabelle 6: Kennzeichnung der Proben und Angaben zu der Probenentnahmestelle WST/B/06

Bezeichnung WST/B/	Entnahmetiefe in cm	Material	Anmerkungen
06			Die Probenahmestelle befindet sich an der Südseite des Turmstumpfes ca. 20 cm über OKE. Die Probe wurde als Stückprobe im Mauerwerk entnommen. Das Mauerwerk im Probenahmebereich besteht aus Mischmauerwerk (Sand- und Kalkstein).
06	0 – 2	Mörtel	06M – Verfugmörtel (Reparatur) mit weißer Salzkruste

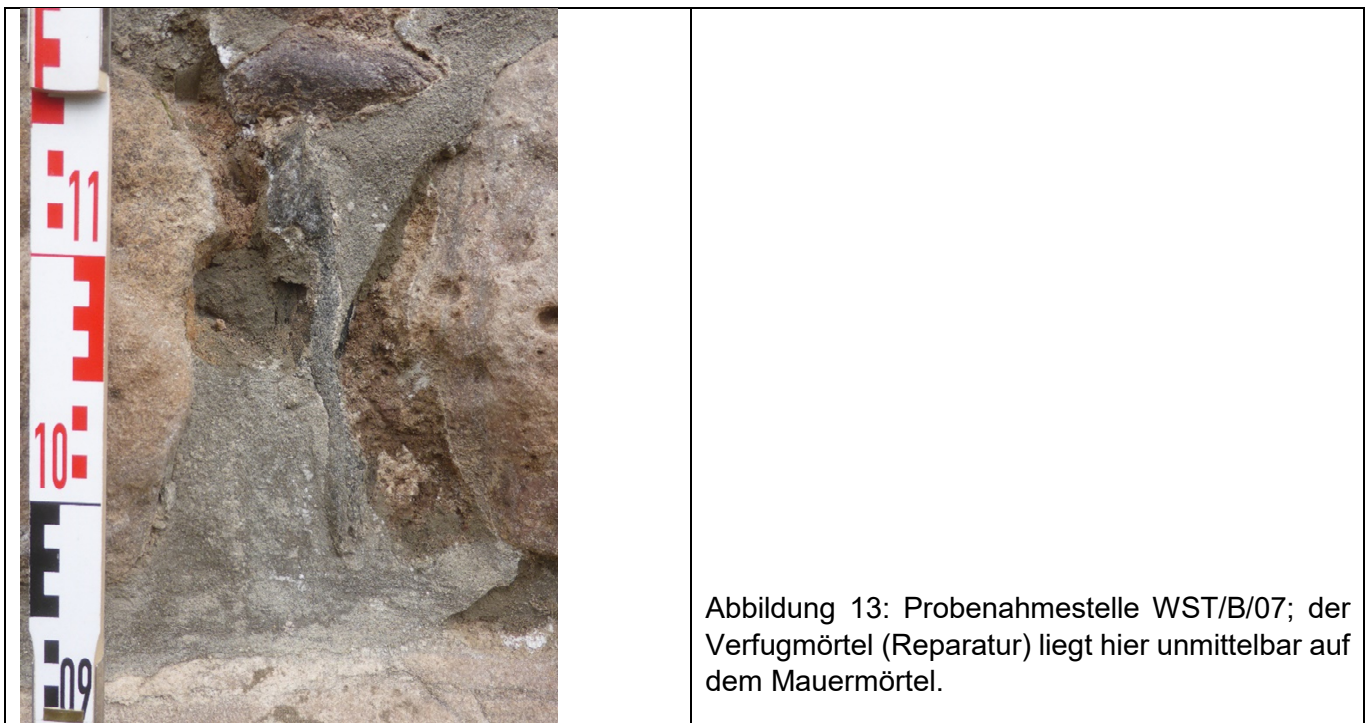


Abbildung 12: Probenahmestelle WST/B/06; Verfugmörtel mit weißer Salzkruste

Probenahmestelle WST/B/07

Tabelle 7: Kennzeichnung der Proben und Angaben zu der Probenentnahmestelle WST/B/07

Bezeichnung WST/B/	Entnahmetiefe in cm	Material	Anmerkungen
07	Die Probenahmestelle befindet sich an der Südseite des Turmstumpfes ca. 100 cm über OKE. Die Probe wurde als Stückprobe im Mauerwerk entnommen. Das Mauerwerk im Probenahmebereich besteht aus Mischmauerwerk (Sand- und Kalkstein).		
07	0 – 2	Mörtel	07M – Verfugmörtel (Reparatur) mit Salzausblühungen, unmittelbar auf ursprünglichem Mauermörtel



Probenahmestelle WST/B/08

Tabelle 8: Kennzeichnung der Proben und Angaben zu der Probenentnahmestelle WST/B/08

Bezeichnung WST/B/	Entnahmetiefe in cm	Material	Anmerkungen
08	Die Probenahmestellen befinden sich an der Westseite des Turmstumpfes ca. 150 cm über OKE. Die Proben wurden als Stückprobe im Mauerwerk entnommen. Das Mauerwerk im Probenahmebereich besteht aus Mischmauerwerk (Sand- und Kalkstein).		
08.1	0 – 2	Mörtel	08.1M – Verfügmörtel, Reparatur, aber älter als der dunkelgraue Verfügmörtel, sehr fest, enthält gebrochene Gesteinskörnungen, mittelgrau
08.2	2 - 5	Mörtel	08.2M – Verfügmörtel, Reparatur, aber älter als 08.1M, sehr fest, enthält gebrochene Gesteinskörnungen, leicht rötlich



Abbildung 14: Probenahmestelle WST/B/08.1, älterer Reparaturmörtel



Abbildung 15: Probenahmestelle WST/B/08.2; der rötliche Reparaturmörtel liegt unter dem Mörtel 08.1M

Probenahmestelle WST/B/09

Tabelle 9: Kennzeichnung der Proben und Angaben zu der Probenentnahmestelle WST/B/09

Bezeichnung WST/B/	Entnahmetiefe in cm	Material	Anmerkungen
09	Die Probenahmestelle befindet sich an der Nordseite des Turmstumpfes ca. 500 cm über OKE. Die Probe wurde als Stückprobe (weiße Aussinterung) von der Oberfläche des Mauerwerks entnommen. Im Probenahmebereich wurde das Mauerwerk wieder aufgemauert (ca. Anfang des 21. Jh.)		
09	0 – 0,5	Sinter	09 – weiße Aussinterung an der Oberfläche



Abbildung 16: Probenahmestelle WST/B/09 mit der weißen oberflächigen Aussinterung auf dem Mauerwerk

Probenahmestelle WST/B/24

Tabelle 10: Kennzeichnung der Proben und Angaben zu der Probenentnahmestelle WST/B/24

Bezeichnung WST/B/	Entnahmetiefe in cm	Material	Anmerkungen
24	Die Probenahmestelle befindet sich an der Nordseite des Turmstumpfes im Bereich der Fensternische, die über die Zwischendecke von innen her zugänglich ist. Die Probe wurde als Stückprobe des sich deutlich hell gegenüber den vermauerten Steinen abzeichnenden Mauermörtels entnommen.		
	0 – 2	Mauermörtel	Mörtel vermutlich gipshaltig bzw. gipsgebunden



Abbildung 17: Probenahmestelle WST/B/24 (Pfeil)

Probenahmestelle WST/B/25

Tabelle 11: Kennzeichnung der Proben und Angaben zu der Probenentnahmestelle WST/B/25

Bezeichnung WST/B/	Entnahmetiefe in cm	Material	Anmerkungen
25	Die Probenahmestelle befindet sich in der Laibung der Fensteröffnung an der Südseite des Turmstumpfes im Bereich der Fensternische oberhalb der Probenahmestelle WST/B/05. Die Probe wurde als Stückprobe eines gegenüber der Mörtelprobe WST/B/05 deutlich heller erscheinenden Materials entnommen.		
	0 – 2	Mauermörtel	Mörtel evtl. gipshaltig

2 Untersuchungen zum Materialbestand und Belastungssituation

2.1 Bestimmung der Materialfeuchten

Die Bestimmung der Materialfeuchten in den Proben erfolgte nach Wägung (ca. 24 Stunden nach Entnahme der letzten Proben) zunächst durch Trocknung bei 40°C über 4 Tage („MF40“). Anschließend sind die Proben einer weiteren Trocknung über 3 Tage bei 105°C („MF105“) unterzogen worden.

Über die Trocknung bei 40°C sollte vor allem das ungebundene Wasser in den Proben erfasst werden. Für eine Probenauswahl wurden die Sättigungsfeuchten („SF“) – Lagerung der bei 105°C getrockneten Proben über 5 Tage unter Wasser – bestimmt und daraus die Durchfeuchtungsgrade („DFG“) berechnet. In den Tabellen und den nachfolgenden Abbildungen sind die Materialfeuchten und die Durchfeuchtungsgrade über den mittleren Entnahmetiefen der Proben für die hier untersuchten Probenahmestellen dargestellt. Berechnet wird die „mittlere Tiefe“ als arithmetischer Mittelwert aus der minimalen und maximalen Tiefe der Probenahme für die jeweilige Teilprobe.

Die Materialbezeichnungen in den folgenden Übersichten beziehen sich auf Voreinschätzungen aufgrund der Phänomenologie des Natursteins und der Mörtel.

Tabelle 12: Mittlere Probenahmetiefen, Materialfeuchten (MF40, MF105) sowie Sättigungsfeuchten (SF) und Durchfeuchtungsgrade (DFG) an untersuchten Teilproben (Steinmaterial)

Probe	Material	mittlere Tiefe	MF40	MF105	SF	DFG
		cm	Masse-%	Masse-%	Masse-%	%
WST/B/1.2S	Sandstein weiß	7,5	2,30	2,85		
WST/B/1.7S	Sandstein weiß	35	3,47	3,63		
WST/B/2.3S	Sandstein weiß	7,5	2,11	2,39	4,08	59
WST/B/2.4S	Sandstein weiß	13	2,38	2,49		
WST/B/2.5S	Sandstein weiß	17,5	2,80	2,92		
WST/B/2.6S	Sandstein weiß	23	3,03	3,19	5,32	60

Tabelle 13: Mittlere Probenahmetiefen, Materialfeuchten (MF40, MF105) sowie Sättigungsfeuchten (SF) und Durchfeuchtungsgrade (DFG) an untersuchten Teilproben (Mörtelmaterial)

Probe	Material	mittl. Tiefe	MF40	MF105	SF	DFG
		cm	Masse-%	Masse-%	Masse-%	%
WST/B/1.1M	Verfugmörtel grau	2,5	11,19	14,38		
WST/B/1.2M	Verfugmörtel grau	7,5	12,03	12,67	14,96	80
WST/B/1.3M	Verfugmörtel grau, dunkelgrauer Saum	12	11,07	13,42	14,25	94
WST/B/1.4M	Verfugmörtel grau	16	10,20	12,34		
WST/B/1.5M1	Verfugmörtel grau	22	11,52	14,80		
WST/B/1.5M2	brauner Lehmörtel?	22	17,89	18,75		
WST/B/1.6M1	Mauermörtel, stark entfestigt	28	11,09	11,70		
WST/B/1.6M2	brauner Lehmörtel?	28	17,83	18,59		
WST/B/1.7M	Mauermörtel, stark entfestigt	35	21,75	22,07		
WST/B/1.8M	Mauermörtel, stark entfestigt	40,5	16,91	17,76		
WST/B/1.9M	Mauermörtel, stark entfestigt	41,5	18,98	19,83		
WST/B/2.1M	Verfugmörtel grau, Kruste u. Salzausbl.	0,5	5,22	9,17		
WST/B/2.2M1	Verfugmörtel grau	2,5	9,21	9,91		
WST/B/2.2M2	Mauermörtel	2,5	6,45	6,81		
WST/B/2.3M	Mauermörtel	6,5	11,91	12,13		
WST/B/2.4M	Mauermörtel	13	14,16	14,65	13,43	109
WST/B/2.5M	Mauermörtel	17,5	22,33	22,98		
WST/B/2.6M	Mauermörtel	23	18,82	19,34		
WST/B/2.7M1	Mauermörtel	28,5	21,98	22,76		
WST/B/2.7M2	Verpressmörtel, dunkelgrau	28,5	2,79	2,99	2,46	122
WST/B/2.8M1	Mauermörtel	33,5	17,11	17,78		
WST/B/2.8M2	Verpressmörtel, dunkelgrau	33,5	2,16	2,38		
WST/B/3M	Mauermörtel, Oberflächenbereich	1	10,70	11,68		
WST/B/4.1M	Verfugmörtel grau, Kruste u. Salzausbl.	2,5	4,33	6,74		
WST/B/4.2M	Mauermörtel, stark entfestigt	6,5	19,00	20,08		
WST/B/5M	Mauermörtel, stark entfestigt	2,5	13,59	19,99		
WST/B/6M	Verfugmörtel grau, Of. weiß (Salz?)	1	6,56	7,45		
WST/B/7M	Verfugmörtel grau, Salzausblühungen	1	5,93	9,02		
WST/B/8.1M	Verfugmörtel, graubraun, sehr fest	1	3,56	5,71		
WST/B/8.2M	Verfugmörtel, rötlich-graubraun, fest	3,5	6,12	7,56		
WST/B/9M	Sinterschicht, weiß	0,2	28,04	28,54		
WST/B/24	Mauermörtel	1	3,73	24,29		
WST/B/25	Mauermörtel	1	8,27	13,29		

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Materialfeuchten über den mittleren Entnahmetiefen der Proben dargestellt. Berechnet wird die „mittlere Tiefe“ als arithmetischer Mittelwert aus der minimalen und maximalen Tiefe der Probenahme für die jeweilige Teilprobe.

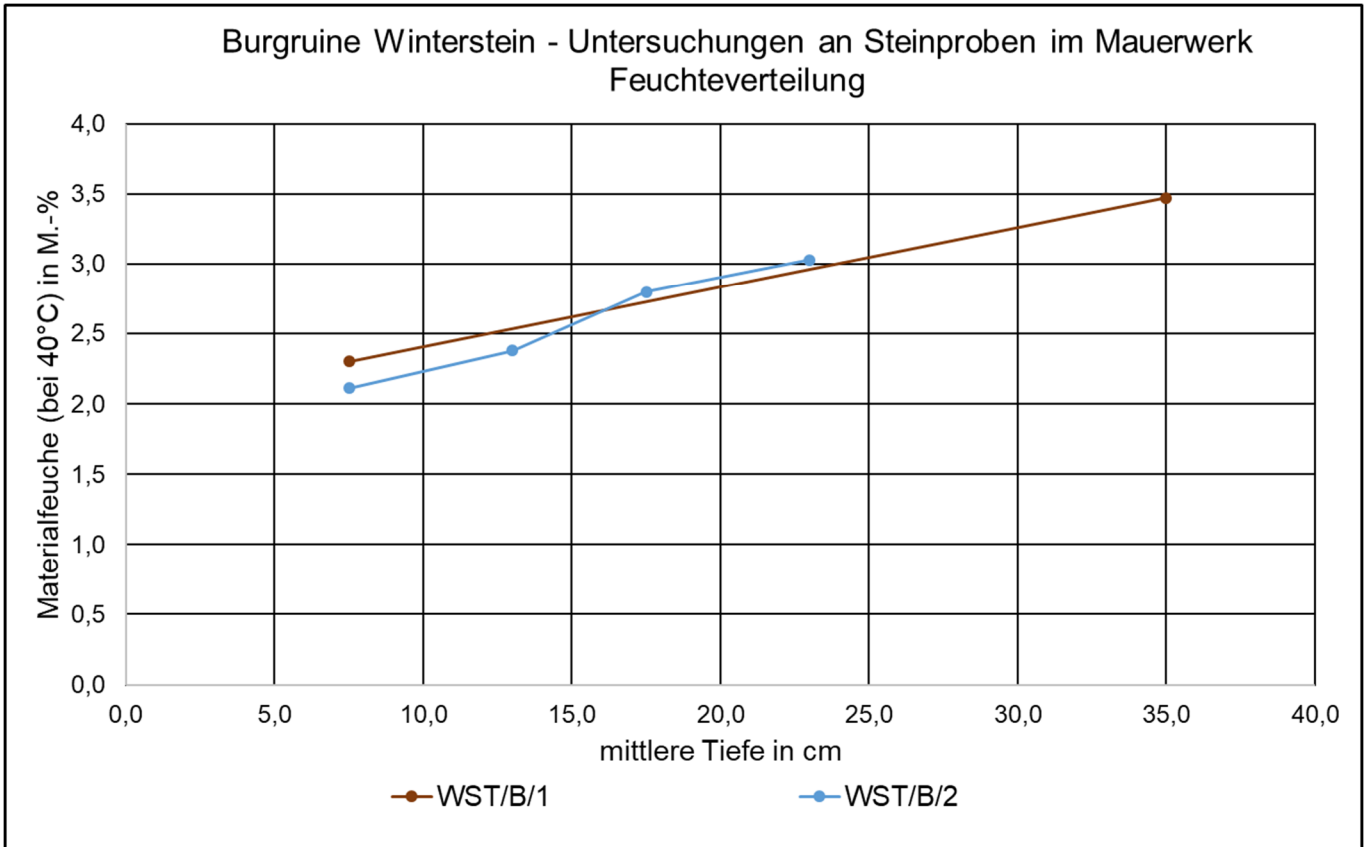


Abbildung 18: Feuchtegehalte der entnommenen Teilproben Stein in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe

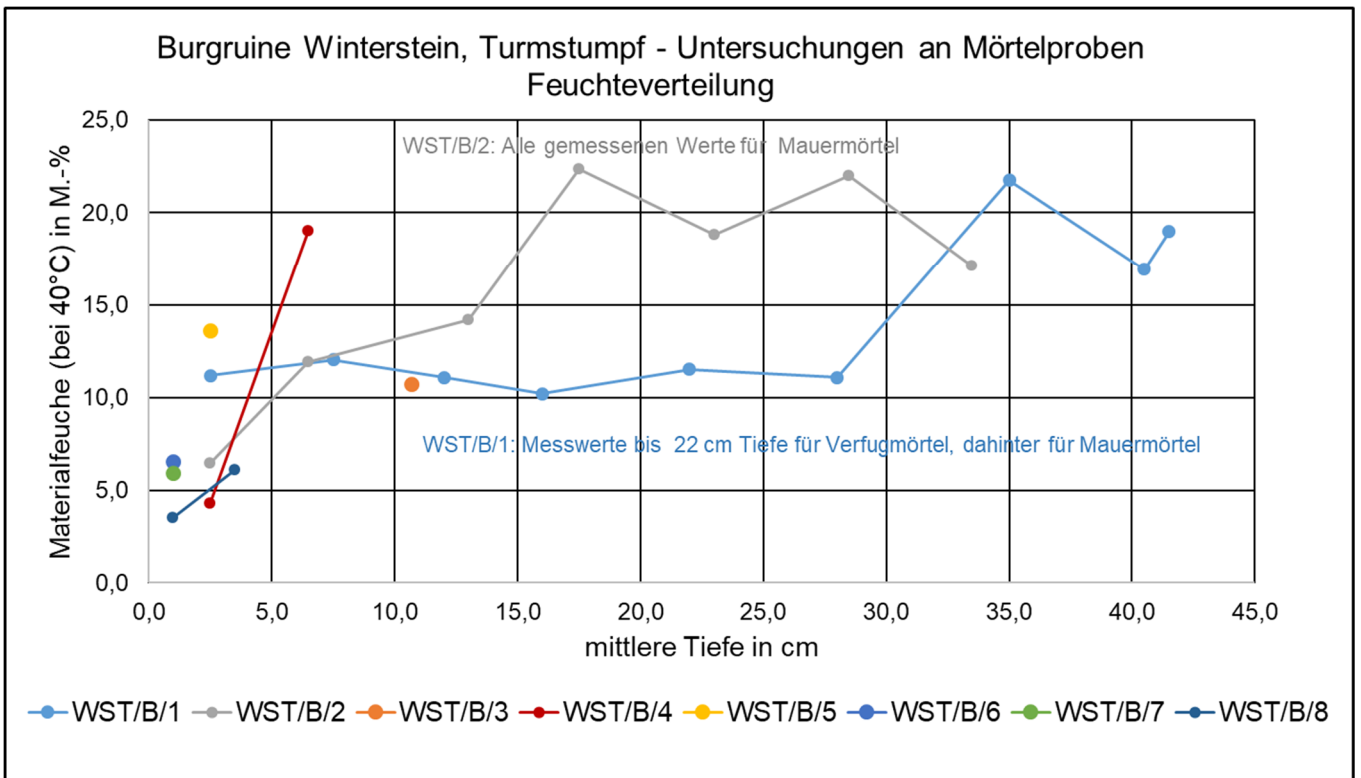


Abbildung 19: Feuchtegehalte der entnommenen Teilproben Mörtel in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe

Aus den Differenzen zwischen den bei 40 und 105 °C bestimmten Materialfeuchten der Mörtel wurden – unter der Annahme, dass der Masseverlust durch die Wasserabgabe aus Gips (Dihydrat) entsteht – „fiktive Gipsgehalte“ („FG“) berechnet. Diese sind - wie die pH-Werte und elektrischen Leitfähigkeiten der aus einer Probenauswahl gewonnenen Eluate (Eluierung 1:20 MT) in der Tabelle 14 wiedergegeben.

Tabelle 14: Mittlere Probenahmetiefen, pH-Werte, elektrische Leitfähigkeiten und „fiktive Gipsgehalte“ von Mörtelproben

Probe	Material	mittlere Tiefe	pH-Wert	elektr. LF	FG
		cm		µS/cm	Masse-%
WST/B/1.1M	Verfugmörtel grau	2,5		1.074	18
WST/B/1.2M	Verfugmörtel grau	7,5			4
WST/B/1.3M	Verfugmörtel grau, dunkelgrauer Saum	12	10,70	690	13
WST/B/1.4M	Verfugmörtel grau	16			12
WST/B/1.5M1	Verfugmörtel grau	22	10,40	798	18
WST/B/1.5M2	brauner Lehmörtel?	22			5
WST/B/1.6M1	Mauermörtel, stark entfestigt	28	8,87	637	3
WST/B/1.6M2	brauner Lehmörtel?	28			4
WST/B/1.7M	Mauermörtel, stark entfestigt	35			2
WST/B/1.8M	Mauermörtel, stark entfestigt	40,5			5
WST/B/1.9M	Mauermörtel, stark entfestigt	41,5	8,30	182	5
WST/B/2.1M	Verfugmörtel grau, Kruste u. Salzausbl.	0,5	8,55	4.760	23
WST/B/2.2M1	Verfugmörtel grau	2,5	8,71	620	4
WST/B/2.2M2	Mauermörtel	2,5	8,56	720	2
WST/B/2.3M	Mauermörtel	6,5			1
WST/B/2.4M	Mauermörtel	13			3
WST/B/2.5M	Mauermörtel	17,5			3
WST/B/2.6M	Mauermörtel	23			3
WST/B/2.7M1	Mauermörtel	28,5			4
WST/B/2.7M2	Verpressmörtel, dunkelgrau	28,5			1
WST/B/2.8M1	Mauermörtel	33,5	8,70	180	4
WST/B/2.8M2	Verpressmörtel, dunkelgrau	33,5			1
WST/B/3M	Mauermörtel, Oberflächenbereich	1			6
WST/B/4.1M	Verfugmörtel grau, Kruste u. Salzausbl.	2,5			14
WST/B/4.2M	Mauermörtel, stark entfestigt	6,5			6
WST/B/5M	Mauermörtel, stark entfestigt	2,5	8,26	3.110	34
WST/B/6M	Verfugmörtel grau, Of. weiß (Salz?)	1			5
WST/B/7M	Verfugmörtel grau, Salzausblühungen	1			18
WST/B/8.1M	Verfugmörtel, graubraun, sehr fest	1	8,22	1.243	13
WST/B/8.2M	Verfugmörtel, rötlich-graubraun, fest	3,5	7,98	2.100	9
WST/B/9M	Sinterschicht, weiß	0,2	9,13	1.105	3
WST/B/24	Mauermörtel	1			105
WST/B/25	Mauermörtel	1			28

2.2 Untersuchungen zur Belastung mit löslichen Anionen und Kationen

Zur Charakterisierung der Belastungssituation erfolgten an einer repräsentativen Auswahl der Probene-luate die Ermittlung der Gehalte löslicher Kationen und Anionen (Bestimmung von Chlorid (Cl⁻), Sulfat (SO₄²⁻) und Nitrat (NO₃⁻) mit Anionen-Chromatographie und Calcium (Ca²⁺), Magnesium (Mg²⁺), Natrium (Na⁺) sowie Kalium (K⁺) mittels ICP-OES). Informationen zum Analyseverfahren finden sich in Anlage I zum Bericht.

Tabelle 15: pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit (LF) in Eluaten aus Mörtelproben sowie wasserlösliche An- und Kationen (in M.-%) von Materialproben vom Turmstumpf (farbige Markierung der Belastungsstufen nach Tabelle 16)

Probe	Material	pH-Wert	LF	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Dimension			µS/cm	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%
WST/B/1.1M	Verfugmörtel grau		1.074	<0,01	0,07	1,09	0,04	0,02	0,59	0,01
WST/B/1.3M	Verfugmörtel grau, dunkelgrauer Saum	10,70	690	<0,01	<0,01	0,61	0,01	0,01	0,35	0,01
WST/B/2.1M	Verfugmörtel grau, Kruste und Salzausblüh.	8,55	4.760	0,23	0,76	6,09	0,84	0,69	2,44	0,12
WST/B/5M	Mauermörtel, stark entfestigt	8,26	3.110	<0,01	0,06	5,68	0,15	0,06	2,47	0,10
WST/B/8.1M	Verfugmörtel, graubraun, sehr fest	8,22	1.243	<0,01	0,07	1,16	0,04	0,06	0,56	0,01
WST/B/8.2M	Verfugmörtel, rötlich-graubraun, fest	7,98	2.100	<0,01	0,12	2,25	0,06	0,16	1,03	0,01

Tabelle 16: Belastungsstufen mit bauschädlichen Salzen - hier auf lösliche Anionen bezogen (nach: C. Arendt & J. Seele: „Feuchte und schädliche Salze in Gebäuden“, Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinfelden-Echterdingen, 2000)

Sulfat in M.-%	Chlorid in M.-%	Nitrat in M.-%	Konzentration in mmol/kg	Wertung
bis 0,024	bis 0,009	bis 0,016	bis 2,5	unbelastet - Stufe 0
bis 0,077	bis 0,028	bis 0,050	bis 8,0	gering belastet – Stufe I
bis 0,24	bis 0,09	bis 0,16	bis 25,0	mittel belastet – Stufe II
bis 0,77	bis 0,28	bis 0,50	bis 80,0	hoch belastet – Stufe III
ab 0,77	ab 0,28	ab 0,50	ab 80,0	extrem belastet – Stufe IV

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Gehalte der An- und Kationen zur besseren Zuordnung zu Salzarten in mval/kg (Ionenwertigkeit x mmol/kg) grafisch dargestellt.

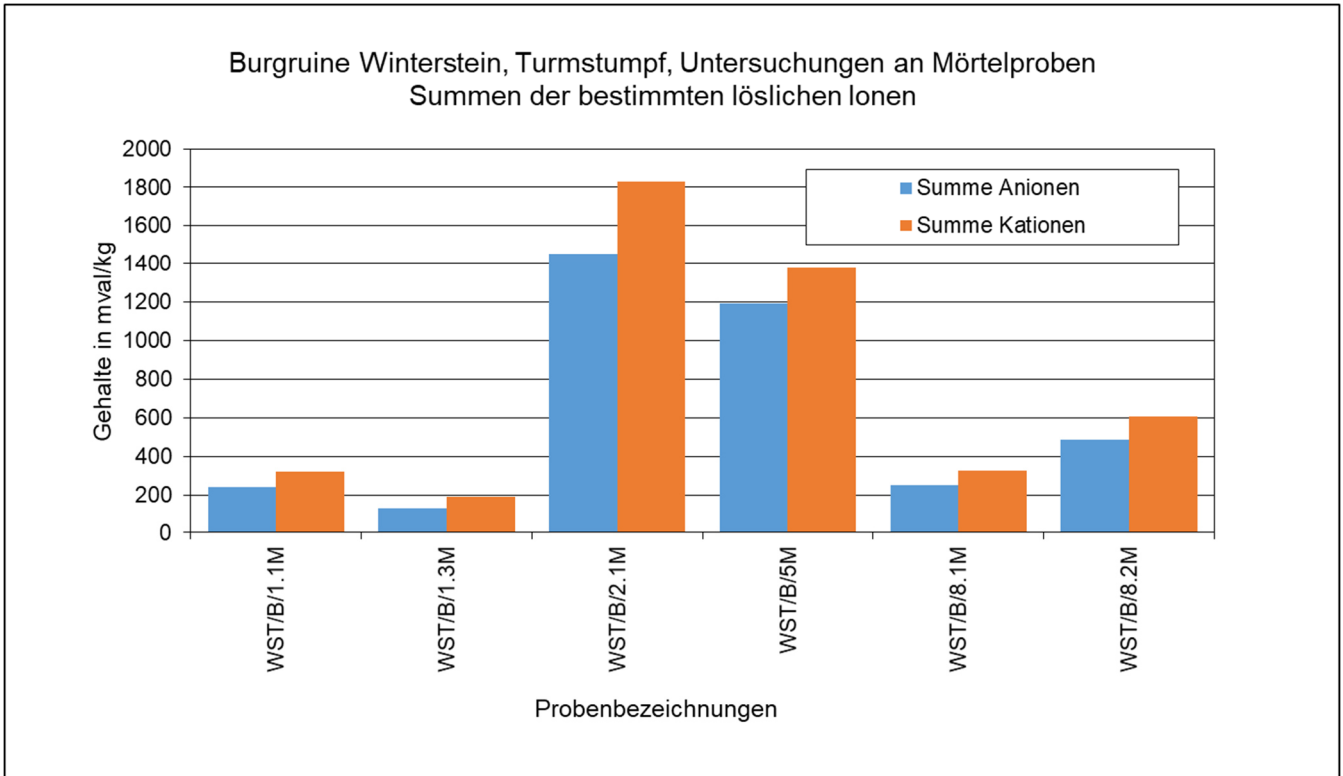


Abbildung 20: Summen der An- und Kationen in ausgewählten Proben (Werte in mval/kg)

Der Vergleich zeigt bei den untersuchten Proben durchweg einen Kationenüberschuss. Dieser kann auf das Vorhandensein von OH-Ionen aus hydraulischen Mörtelbestandteilen zurückzuführen sein. Die vergleichsweise hohe Alkalität der untersuchten Proben weist ebenfalls darauf hin.

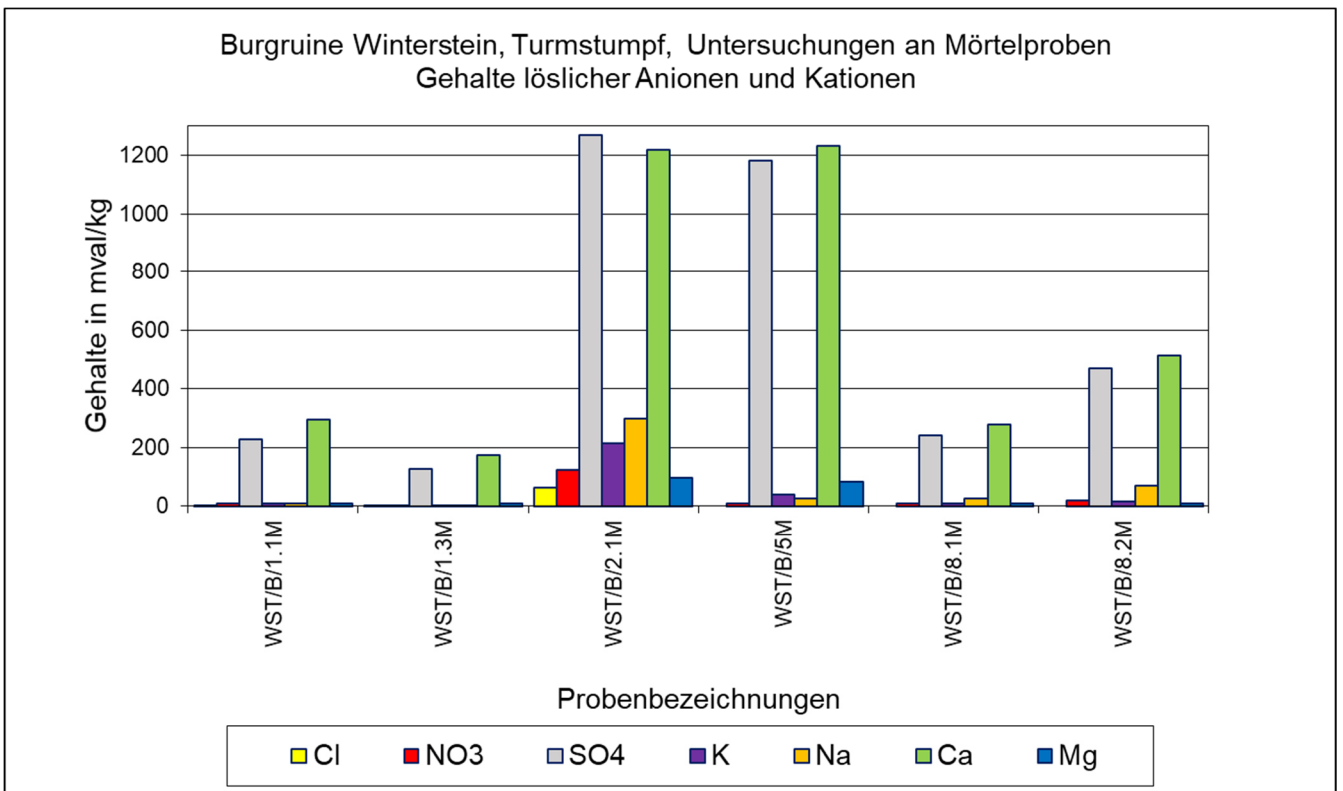


Abbildung 21: Gehalte der ermittelten An- und Kationen an einer Auswahl gewonnener Proben (Werte in mval/kg)

Zur Charakterisierung der weiteren löslichen Ionen sind im Diagramm in Abbildung 22 die Gehalte an Calcium und Sulfat ausgeblendet.

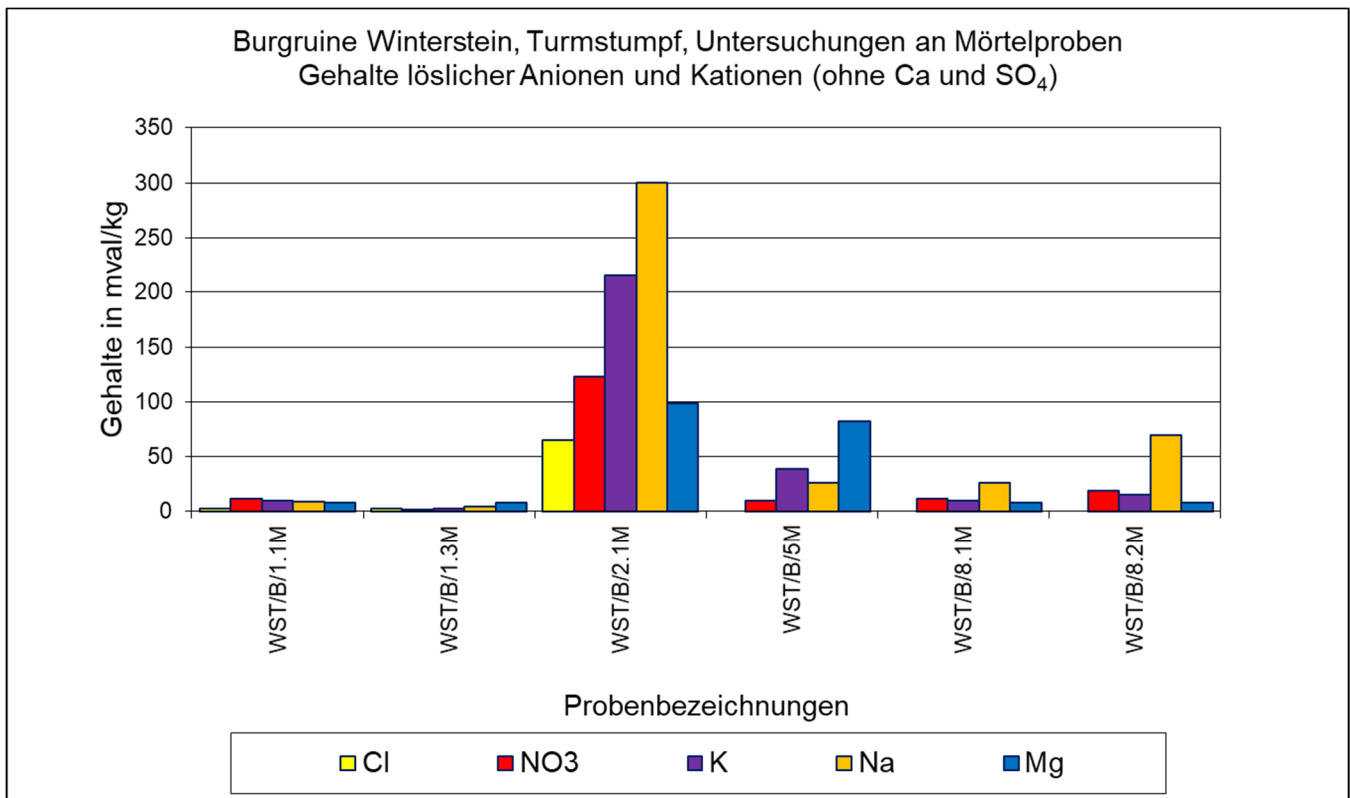


Abbildung 22: Gehalte der ermittelten An- und Kationen (außer Calcium und Sulfat) an einer Auswahl gewonnener Proben (Werte in mval/kg)

2.3 Bestimmung des Gesamt-SO₃-Gehaltes

Die Bestimmung des Gesamt-SO₃-Gehaltes wird für die Berechnung der Gipsanteile im Mörtel genutzt. Andere Verbindungen, aus denen ebenfalls Anteile des ermittelten Gesamt-SO₃-Gehaltes stammen können, werden hier nicht berücksichtigt.

Die Bestimmung des Gesamt-SO₃-Gehaltes erfolgte nach DIN EN 196-2:2013-10 „Prüfverfahren für Zement Teil 2: Chemische Analyse von Zement“. Die Ergebnisse der Bestimmungen sind in Tabelle 17 wiedergegeben.

Tabelle 17: Gesamt-SO₃-Gehalte und daraus berechnete Gipsgehalte der untersuchten Mörtelproben

Probenbezeichnung	Material	Gesamt-SO ₃ -Gehalt in M.-%	berechneter Gipsgehalt (Dihydrat) in M.-%
WST/B/1.8M	Mörtel	0,03	0,06
WST/B/5M	Mörtel	11,3	24,30
WST/B/8.2M	Mörtel	0,03	0,06

Die berechneten Gipsgehalte weisen darauf hin, dass es sich bei der untersuchten Mörtelprobe WST/B/5M um einen gipshaltigen Mörtel (Gipsgehalt zwischen 5 und 50 M.-%) entsprechend dem WTA-Merkblatt 2-11-18/D (Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Außenfassaden) handelt. Die beiden anderen Mörtelproben sind lediglich gipsbelastet.

Anlage III: Kirchhofmauer in Kleinbrennbach: Beschreibung der entnommenen Materialproben, Darstellung der Ergebnisse der Untersuchungen zum Bestand und zur Belastungssituation

1 Lokalisierung und Beschreibung der Probenahmestellen am Bauwerk

Um Rückschlüsse zur Feuchte- und Belastungssituation der Mauer zu erhalten, wurden in repräsentativen Bereichen händisch Proben des Mauer- und Verugmörtels entnommen. Die Probenahmebereiche und -beschreibungen sind in der nachfolgenden Tabelle 1 wiedergegeben.

Die nachfolgend verwendeten Probenindizes bedeuten:

KBR ... Kleinbrennbach
 KM ... Kirchhofmauer
 1.1ff, ... lfd. Nr. der Probenahmestelle

Tabelle 1: Beschreibung der entnommenen Mauerwerksproben an der Kirchhofmauer Kleinbrennbach

Probe	Entnahmeort	Entnahmehöhe	Entnahmetiefe	Beschreibung	Anmerkungen
		cm	cm		
KBR/KM/1.1	Nordabschnitt Mauer, Südseite	ca. 35 ü. OKE	1 - 10	Mauermörtel (Lehmmörtel)	rel. trocken
KBR/KM/1.2	Nordabschnitt Mauer, Südseite	ca. 35 ü. OKE	10 - 20	Mauermörtel (Lehmmörtel)	rel. trocken
KBR/KM/2.1	Nordabschnitt Mauer, Südseite	ca. 85 ü. OKE	1 - 10	Mauermörtel (Lehmmörtel)	sehr nass
KBR/KM/2.2	Nordabschnitt Mauer, Südseite	ca. 85 ü. OKE	10 - 20	Mauermörtel (Lehmmörtel)	sehr dass
KBR/KM/3	Nordabschnitt Mauer, Südseite, unter Mauerabdeckung	ca. 130 ü. OKE	ca. 10	Mauermörtel (hydraul. Kalk- oder Kalk-Zement-Mörtel)	sehr nass
KBR/KM/4	Nordabschnitt Mauer, Südseite	ca. 75 ü. OKE	0 - 0,5	Gipskrusten auf Verugmörtel	
KBR/KM/5	Westabschnitt Mauer, Ostseite, Einsturzbereich	ca. 80 ü. OKE	ca. 30	Mauermörtel (Lehmmörtel)	

In der nachfolgenden Abbildung 1 sind die Probenahmestellen lokalisiert.

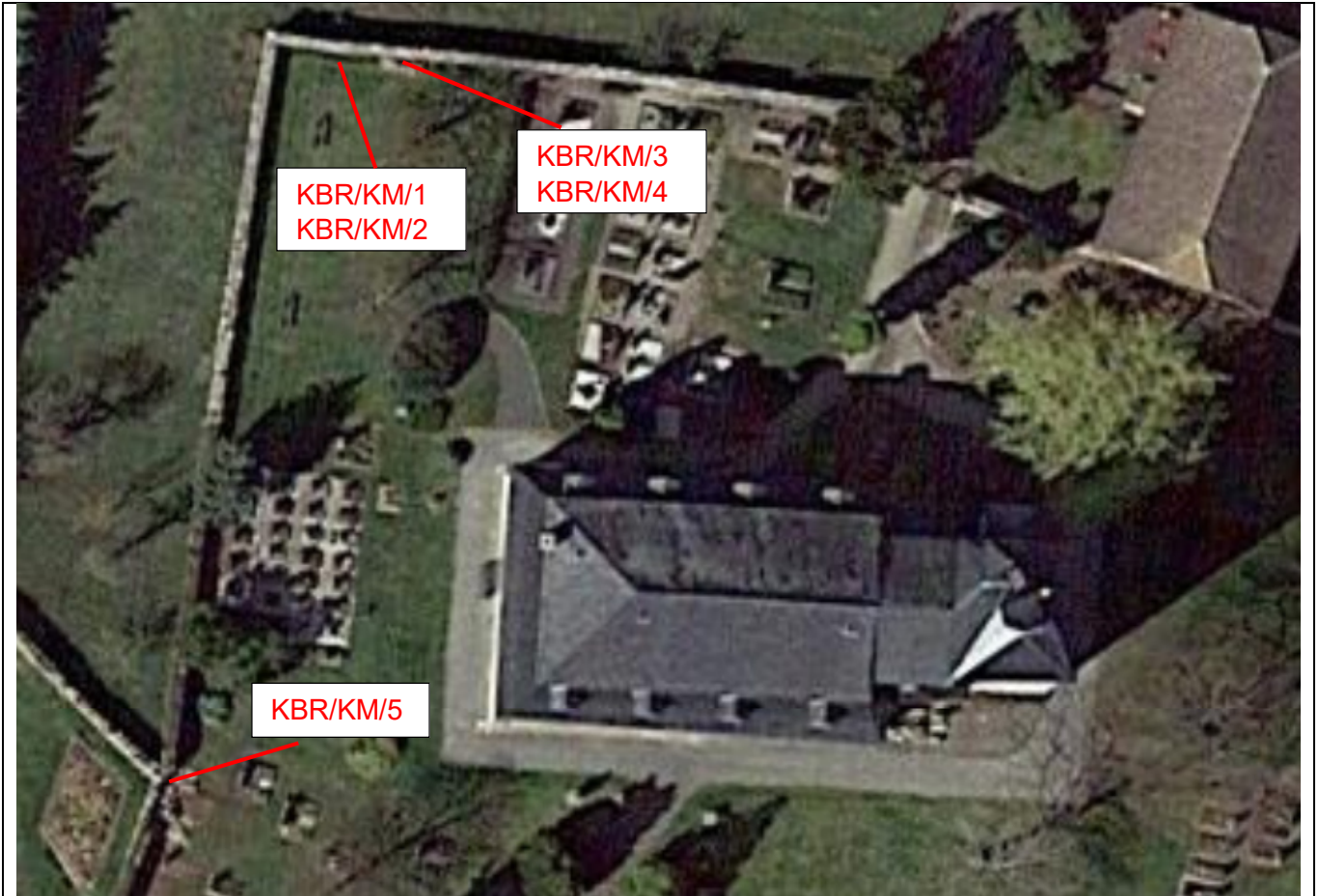


Abbildung 1: Grundriss des Kirchenbereiches mit Lokalisierung der Probenahmestellen
(Bildquelle: <https://www.google.de/maps/@51.1246736,11.2719299,107m/data=!3m1!1e3>)

2 Untersuchungen zum Materialbestand und Belastungssituation

2.1 Bestimmung der Materialfeuchten

Die Bestimmung der Materialfeuchten in den Proben erfolgte nach Wägung (ca. 24 Stunden nach Entnahme der letzten Proben) zunächst durch Trocknung bei 40°C über 4 Tage („MF40“). Anschließend sind die Proben einer weiteren Trocknung über 3 Tage bei 105°C („MF105“) unterzogen worden.

Über die Trocknung bei 40°C sollte vor allem das ungebundene Wasser in den Proben erfasst werden. In den Tabellen und den nachfolgenden Abbildungen sind die Materialfeuchten über den mittleren Entnahmetiefen der Proben für die hier untersuchten Probenahmestellen dargestellt. Berechnet wird die „mittlere Tiefe“ als arithmetischer Mittelwert aus der minimalen und maximalen Tiefe der Probenahme für die jeweilige Teilprobe.

Die Materialbezeichnungen in den folgenden Übersichten beziehen sich auf Voreinschätzungen aufgrund der Phänomenologie des Natursteins und der Mörtel.

Tabelle 2: Mittlere Probenahmetiefen und Materialfeuchten (MF40, MF105)

Probe	Material	mittlere Tiefe cm	MF40 Masse-%	MF105 Masse-%
KBR/KM/1.1	Mauermörtel (Lehmmörtel)	5	8,67	11,23
KBR/KM/1.2	Mauermörtel (Lehmmörtel)	15	8,34	10,32
KBR/KM/2.1	Mauermörtel (Lehmmörtel)	5	23,60	27,42
KBR/KM/2.2	Mauermörtel (Lehmmörtel)	15	19,77	21,34
KBR/KM/3	Mauermörtel (hydraul. Kalk- oder Kalk-Zement-Mörtel)	10	11,43	11,97
KBR/KM/4	Gipskrusten auf Verfugmörtel	0	26,66	43,11
KBR/KM/5	Mauermörtel (Lehmmörtel)	40	20,06	23,95

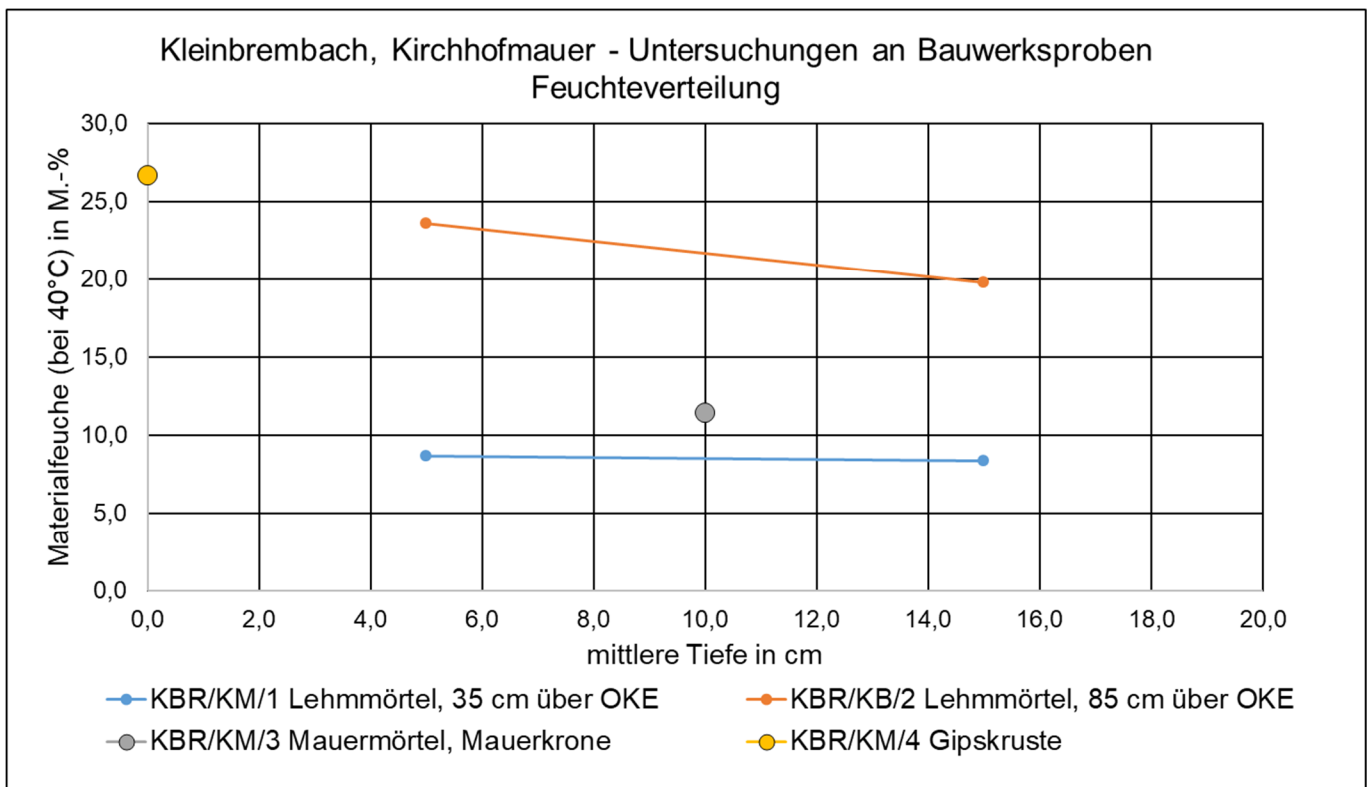


Abbildung 2: Feuchtegehalte der entnommenen Teilproben Mörtel in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe

Die Darstellung in Abbildung 2 zeigt deutlich, dass der Feuchteeintrag in die Mauer im Wesentlichen über die Niederschläge und die Mauerkrone erfolgt. Hierbei lassen sich wesentliche Änderungen in der Feuchtebelastung über den Mauerquerschnitt nicht erkennen. Die Feuchtebelastung in der Probenahmestelle KBR/KM/2 vom oberen Teil der Mauer zeigt mit einer Materialfeuchte von 20 - 24 M.-% extrem hohe Werte, die nur noch von denen der Gipskruste (KBR/KM/4) mit fast 27 M.-% übertroffen werden. Hier spielen vermutlich neben direkter Feuchtebeaufschlagung auch hygroskopische Eigenschaften der in der Kruste vorhandenen Salze eine Rolle.

Aus den Differenzen zwischen den bei 40 und 105 °C bestimmten Materialfeuchten der Mörtel wurden – unter der Annahme, dass der Masseverlust durch die Wasserabgabe aus Gips (Dihydrat) entsteht – „fiktive Gipsgehalte“ („FG“) berechnet. Diese sind - wie die pH-Werte und elektrischen Leitfähigkeiten der aus einer Probenauswahl gewonnenen Eluate (Eluierung 1:20 MT) in der Tabelle 3 wiedergegeben.

Tabelle 3: Mittlere Probenahmetiefen, pH-Werte, elektrische Leitfähigkeiten („LF“) und „fiktive Gipsgehalte“ („FG“) von Mörtelproben

Probe	Material	mittlere Tiefe	pH-Wert	elektr. LF	FG
		cm		µS/cm	Masse-%
KBR/KM/1.1	Mauermörtel (Lehmmörtel)	5	6,72	2.500	15
KBR/KM/1.2	Mauermörtel (Lehmmörtel)	15			11
KBR/KM/2.1	Mauermörtel (Lehmmörtel)	5	7,09	2.030	19
KBR/KM/2.2	Mauermörtel (Lehmmörtel)	15			8
KBR/KM/3	Mauermörtel (hydraul. Kalk- oder Kalk-Zement-Mörtel)	10			3
KBR/KM/4	Gipskrusten auf Verfugmörtel	0	7,00	2.980	73
KBR/KM/5	Mauermörtel (Lehmmörtel)	40			20

2.2 Untersuchungen zur Belastung mit löslichen Anionen und Kationen

Zur Charakterisierung der Belastungssituation erfolgten an einer repräsentativen Auswahl der Probene-luate die Ermittlung der Gehalte löslicher Kationen und Anionen (Bestimmung von Chlorid (Cl⁻), Sulfat (SO₄²⁻) und Nitrat (NO₃⁻) mit Anionen-Chromatographie und Calcium (Ca²⁺), Magnesium (Mg²⁺), Natrium (Na⁺) sowie Kalium (K⁺) mittels ICP-OES). Informationen zum Analyseverfahren finden sich in ANLAGE I zum Bericht.

Tabelle 4: pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit (LF) in Eluaten aus Mörtelproben sowie wasserlösliche An- und Kationen (in M.-%) von Materialproben aus dem Mauerwerk (farbige Markierung der Belastungsstufen nach Tabelle 5)

Probe	Material	pH-Wert	LF	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Dimension			µS/cm	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%
KBR/KM/1.1	Lehmmörtel	6,72	2.500	<0,03	0,12	6,63	0,02	0,01	2,93	0,01
KBR/KM/2.1	Lehmmörtel	7,09	2.030	<0,03	0,03	4,96	0,04	0,01	2,30	0,02
KBR/KM/4	Gipskruste	7,00	2.980	<0,03	0,18	14,00	0,05	0,02	6,42	0,05

Tabelle 5: Belastungsstufen mit bauschädlichen Salzen - hier auf lösliche Anionen bezogen (nach: C. Arendt & J. Seele: „Feuchte und schädliche Salze in Gebäuden“, Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinfelden-Echterdingen, 2000)

Sulfat in M.-%	Chlorid in M.-%	Nitrat in M.-%	Konzentration in mmol/kg	Wertung
bis 0,024	bis 0,009	bis 0,016	bis 2,5	unbelastet - Stufe 0
bis 0,077	bis 0,028	bis 0,050	bis 8,0	gering belastet – Stufe I
bis 0,24	bis 0,09	bis 0,16	bis 25,0	mittel belastet – Stufe II
bis 0,77	bis 0,28	bis 0,50	bis 80,0	hoch belastet – Stufe III
ab 0,77	ab 0,28	ab 0,50	ab 80,0	extrem belastet – Stufe IV

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Gehalte der An- und Kationen zur besseren Zuordnung zu Salzarten in mval/kg (Ionenwertigkeit x mmol/kg) grafisch dargestellt.

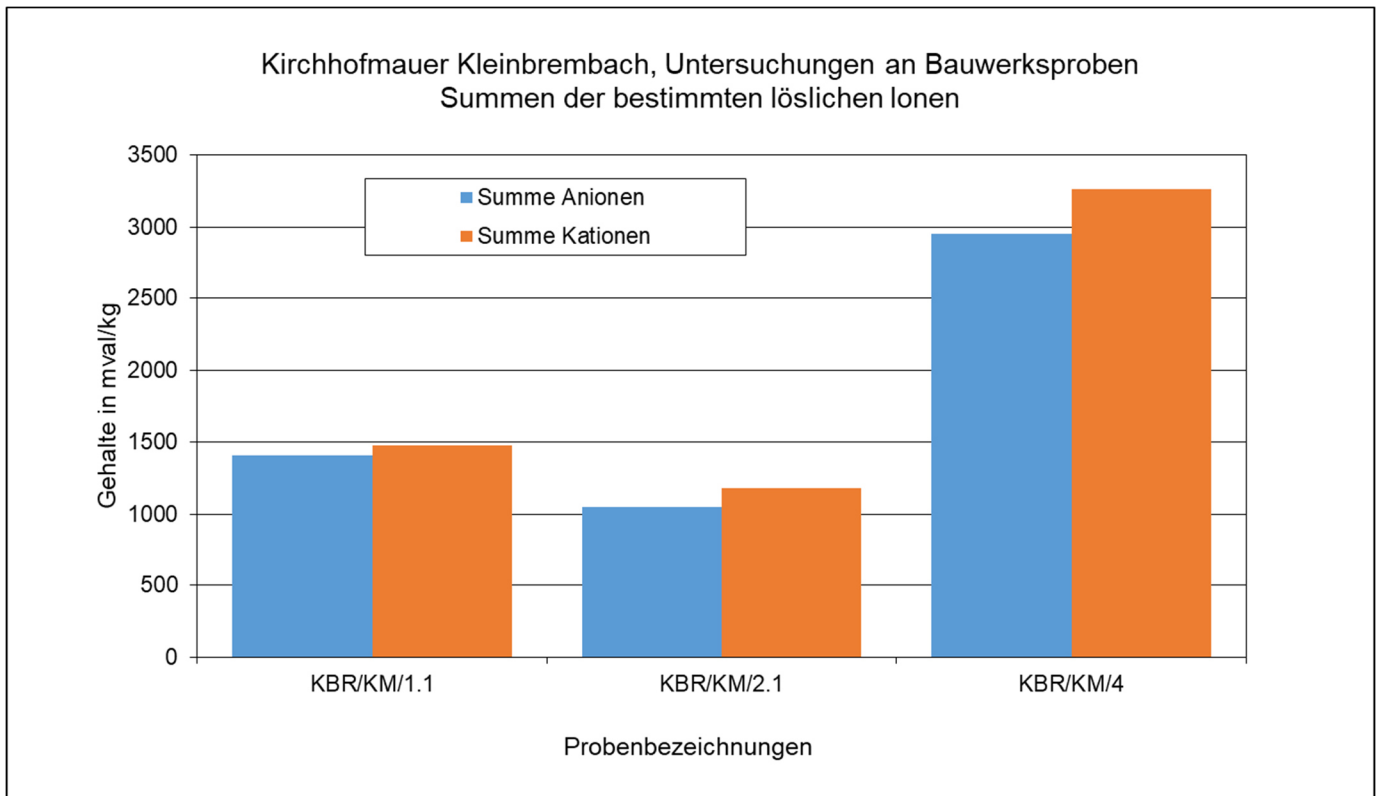


Abbildung 3: Summen der An- und Kationen in ausgewählten Proben (Werte in mval/kg)

Der Vergleich zeigt bei den untersuchten Proben durchweg einen leichten Kationenüberschuss. Dieser kann auf das Vorhandensein von OH-Ionen aus hydraulischen Mörtelbestandteilen zurückzuführen sein.

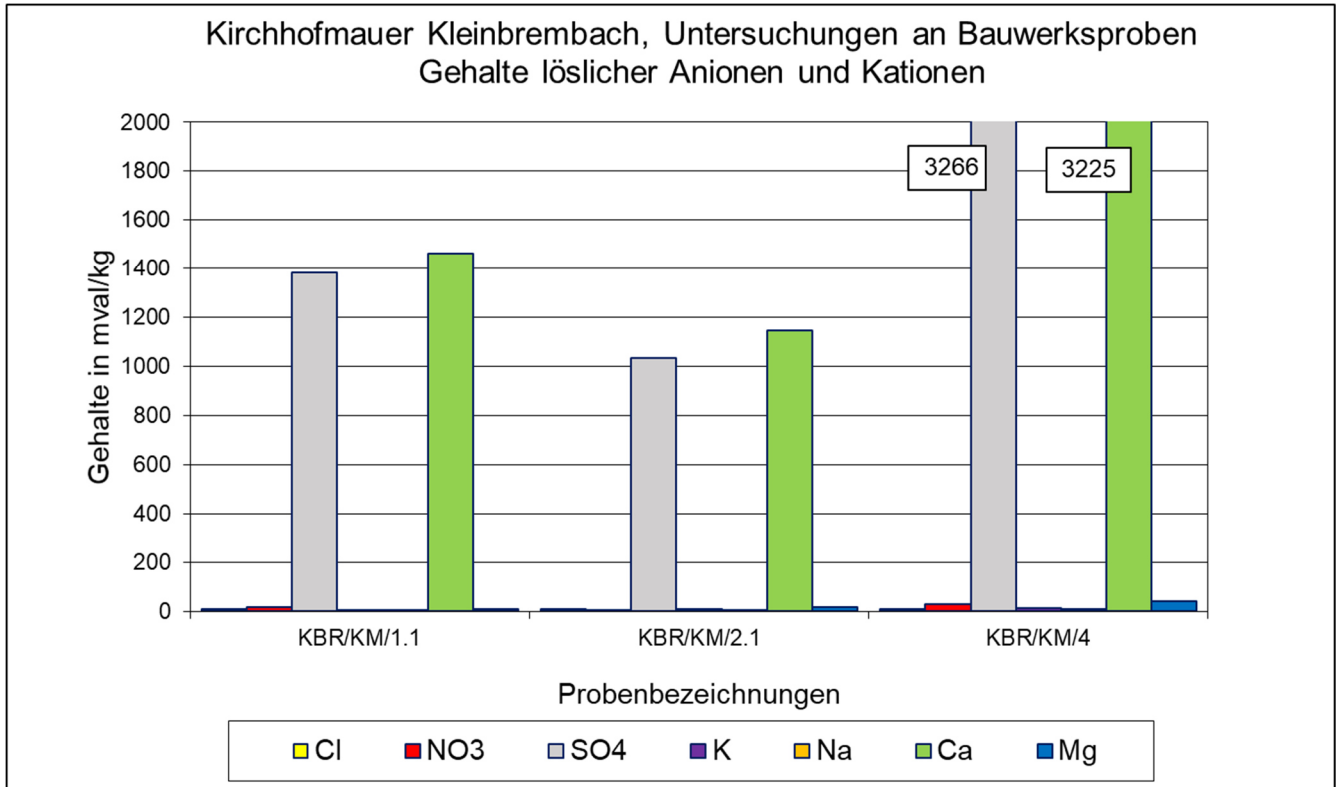


Abbildung 4: Gehalte der ermittelten An- und Kationen an einer Auswahl gewonnener Proben (Werte in mval/kg)

Wie aufgrund des verbauten Keupergipsmaterials bereits zu vermuten, resultiert die extrem hohe Belastung mit löslichen Anionen nahezu vollständig aus gelösten Gipsbestandteilen. Die elektrische Leitfähigkeit sämtlicher untersuchten Proben weist ebenfalls auf extreme Belastungen hin, die Leitfähigkeit liegt bei der Probe KBR/KM/4 (Gipskruste) sogar über der einer gesättigten Gipslösung. Hier sind weitere, löslichere Sulfate in geringem Anteil vorliegend, worauf auch der Sulfatüberschuss hinweist.

Zur Charakterisierung der weiteren löslichen Ionen sind im Diagramm in Abbildung 5 die Gehalte an Calcium und Sulfat ausgeblendet.

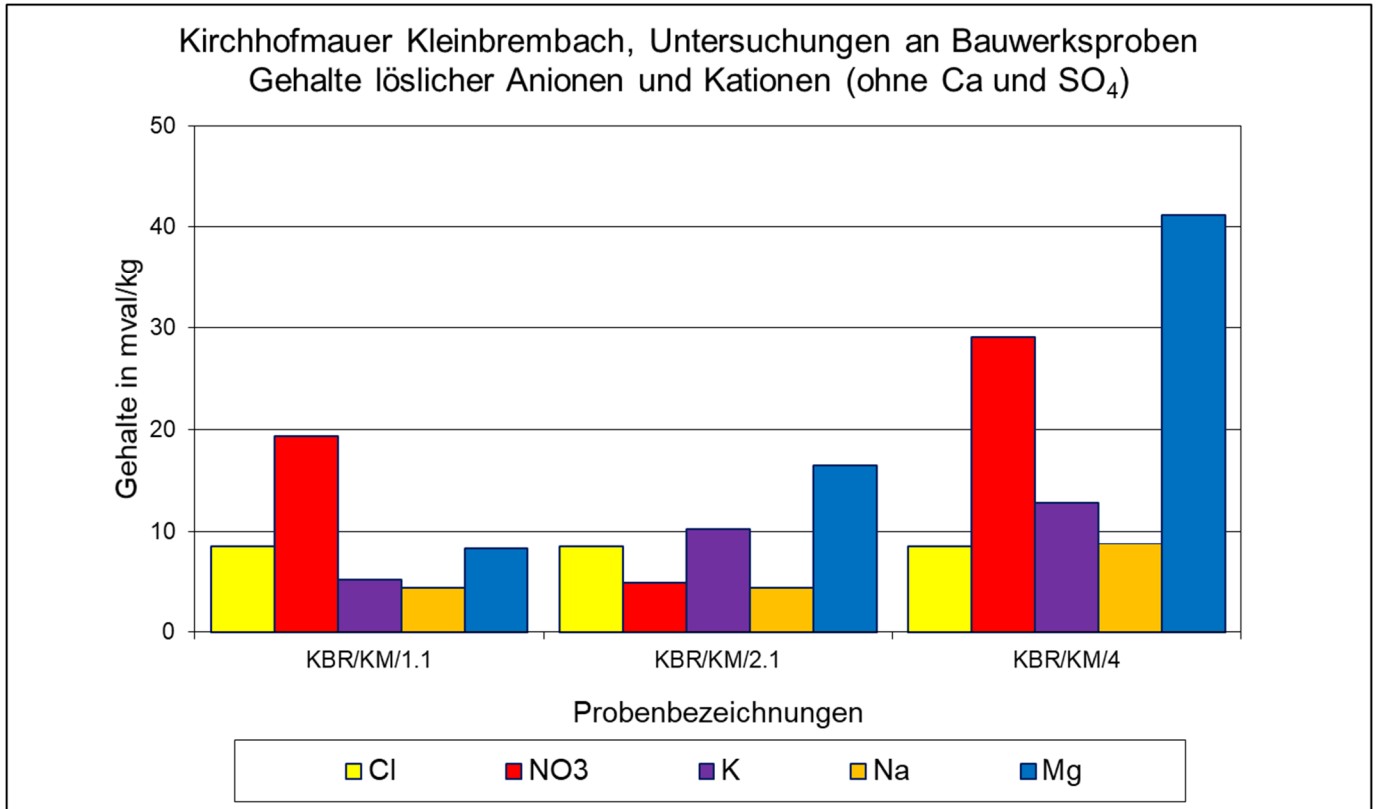


Abbildung 5: Gehalte der ermittelten An- und Kationen (außer Calcium und Sulfat) an einer Auswahl gewonnener Proben (Werte in mval/kg)

Es ist erkennbar, dass in den untersuchten Proben noch relevante Anteile an Nitrat hinsichtlich der Belastungssituation eine Rolle spielen – unter Berücksichtigung der Probenherkunft war dies zu erwarten. Das Magnesium – insbesondere in der Probe KBR/KM/4 angereichert – kann sowohl aus tonigen Bestandteilen des Lehm Mörtels als auch aus früheren Reparaturen (bspw. Ausfugungen mit dolomithaltigem Mörtel) her stammen.

2.3 Bestimmung des Gesamt-SO₃-Gehaltes

Zur Verifizierung der ermittelten „fiktiven Gipsgehalte“ (s. Tabelle 9) wurden an den Materialproben, bei denen die wasserlöslichen Ionengehalte bestimmt wurden, die Gesamt-SO₃-Gehalte ermittelt. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle 11 wiedergegeben.

Die Bestimmung des Gesamt-SO₃-Gehaltes wird für die Berechnung der Gipsanteile im Mörtel genutzt. Andere Verbindungen, aus denen ebenfalls Anteile des ermittelten Gesamt-SO₃-Gehaltes stammen können, werden hier nicht berücksichtigt.

Die Bestimmung des Gesamt-SO₃-Gehaltes erfolgte nach DIN EN 196-2:2013-10 „Prüfverfahren für Zement Teil 2: Chemische Analyse von Zement“. Die Ergebnisse der Bestimmungen sind in Tabelle 11 wiedergegeben.

Tabelle 6: Gesamt-SO₃-Gehalte und daraus berechnete Gipsgehalte der untersuchten Mörtelproben

Probenbezeichnung	Material	berechneter "fiktiver Gipsgehalt" in M.-%	Gesamt-SO ₃ -Gehalt in M.-%	berechneter Gipsgehalt (Dihydrat) in M.-%
KBR/KM/1.1	Mauermörtel (Lehmmörtel)	15	6,65	14,30
KBR/KM/2.1	Mauermörtel (Lehmmörtel)	19	5,09	10,94
KBR/KM/4	Gipskrusten auf Verfügmörtel	73	26,8	57,62

Die Ergebnisse der Untersuchungen bestätigen die Hinweise, die sich aus den ermittelten „fiktiven Gipsgehalten“ ergaben: Die untersuchten Lehmmörtel weisen hohe Sulfatbelastungen auf, die aus gelöstem und umgelagertem Gips der Mauerwerkssteine her stammen. Die Gipskruste (KBR/KM/4) ist aufgrund identischer Umlagerungsvorgänge entstanden.