

Entwicklung eines Weiterqualifizierungsangebots
zur Baustoffkenntnis und Anwendung von
Heißkalkmörtel an umweltgeschädigtem Mauerwerk
historischer Bauwerke

Köberle, T.; Zötzl, M.; Siedel, H.

Abschlussbericht des DBU-geförderten Projektes

Az: 33877



Dresden 2019



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

Projektträger

Technische Universität Dresden
Institut für Geotechnik
Fachbereich Angewandte Geologie

Projektleiter

Prof. Dr. rer. nat. Heiner Siedel

Projektbearbeiter

Dipl.-Geol. Thomas Köberle
(TU Dresden)

Verfasser

Dipl.-Geol. Thomas Köberle
(TU Dresden)
Kap. 1.1, 3.1.1 – 3.2.8, 4.2, 5, 6

Dipl.-Min. Matthias Zötzl
(IDK Halle)
Kap. 3.3 – 3.4.6.2, 4.3, 4.4, 5, 6

Prof. Dr. rer. nat. Heiner Siedel
Kap. 0 – 3.1, 4.1, 5, 6

Projektpartner

Institut für Diagnostik und
Konservierung an Denkmälern in
Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.
(IDK)

Bearbeiter:

Dipl.-Min. Matthias Zötzl

Restaurator im Handwerk Alexander
Fenzke, Fa. DenkMal Fachbetrieb für
Restaurierung und Altbausanierung,
Bad Marienberg

Dipl.-Rest. Thomas Schmidt,
freiberuflicher Restaurator, Leisnig-
Minkwitz

Hochschule für Bildende Künste
(HfBK) Dresden, Fachklasse für
Kunsttechnologie, Konservierung und
Restaurierung von Wandmalerei und
Architekturfarbigkeit

Leiter der Fachklasse:

Prof. Dr. Thomas Danzl

Dresden, im September 2019

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



| | | | | | |
|----|--------------|---------|-----------|-------------|------------------|
| Az | 33877 | Referat | 45 | Fördersumme | 102.306 € |
|----|--------------|---------|-----------|-------------|------------------|

Antragstitel **Entwicklung eines Weiterqualifizierungsangebots zur Baustoffkenntnis und Anwendung von Heißkalkmörtel an umweltgeschädigtem Mauerwerk historischer Bauwerke**

Stichworte Heißkalk, Kalkmörtel, Kalklöschchen, Workshops

| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) |
|----------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 2 Jahre | 01.04.2017 | 30.06.2019 | 1 |

| | | | |
|------------------|---|---|---|
| Zwischenberichte | 1 | 2 | 3 |
|------------------|---|---|---|

| | | |
|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Bewilligungsempfänger | TU Dresden | Tel 0351 – 463 34663 |
| | Institut für Geotechnik | Fax 0351 – 463 34131 |
| | Fachbereich Angewandte Geologie | Projektleitung Prof. Dr. H. Siedel |
| | | Bearbeiter Dipl.-Geol. T. Köberle |

Kooperationspartner Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK) (Bearbeiter: Dipl.-Min. Matthias Zötzl), 06108 Halle (Saale)

Restaurator im Handwerk Alexander Fenzke, Fa. DenkMal Fachbetrieb für Restaurierung und Altbausanierung, 56470 Bad Marienberg

Dipl.-Rest. Thomas Schmidt, freiberuflicher Restaurator, 04703 Leisnig, Minkwitz

Hochschule für Bildende Künste (HfBK) Dresden, Fachklasse für Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Wandmalerei und Architekturfarbigkeit (Leiter der Fachklasse: Prof. Dr. Thomas Danzl), 01307 Dresden

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die heiße Verarbeitung von trocken gelöschtem Kalkmörtel in der Löschphase ist ein traditionelles Verfahren, welches nur noch von wenigen Handwerkern beherrscht und ausgeführt wird. Gerade im Bereich der Denkmalpflege und Restaurierung erscheint die Heißkalktechnik jedoch eine Möglichkeit zu bieten, auch ohne Zusatz von hydraulischen Bestandteilen (Zement oder Trass) anspruchsvolle Bauaufgaben lösen zu können. Es fehlte bisher jedoch an systematischen Untersuchungen zu dieser Technik, die es den Handwerkern erlauben, über ihre empirischen Erfahrungen hinaus die applizierten Kalkmörtel zu beschreiben. Ebenso fehlten Materialkennwerte, die es den Fachplanern ermöglichen Kalkmörtel in Heißkalktechnik zu bewerten und damit gezielter in die Planung mit einbeziehen zu können. Ein wichtiges Ziel des Projektes war darüber hinaus die Erstellung und Erprobung eines Weiterbildungskonzeptes um die Heißkalktechnik bekannter zu machen und Handwerker und Restauratoren in der Technik zu schulen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Weiterbildung wurde in Form von Workshops realisiert, in denen kleine Gruppen neben der Vermittlung der theoretischen Grundlagen auch in der praktischen Umsetzung angeleitet wurden; Erfahrungen aus der Durchführung flossen jeweils in die Folgeveranstaltungen ein. In Heißkalktechnik verarbeitete Mörtel und ihre Ausgangsstoffe wurden mit den in der Baustoffprüfung üblichen Untersuchungsmethoden charakterisiert. Zum Vergleich wurden auch „kalt“ verarbeitete Mörtel nach den gleichen Rezepturen wie die heiß verarbeiteten Mischungen hergestellt und den heiß verarbeiteten gegenübergestellt. An einem historischen, umweltgeschädigten Objekt (Natursteinwand in Kloster Buch, Sachsen) wurden Musterflächen mit Heißkalktechnik und mit „kalter“ Verarbeitung zur vergleichenden Bewertung unter Realbedingungen des Außenraums angelegt. Daneben wurden bereits früher mit Heißkalktechnik ausgeführte Restaurierungsmaßnahmen nach unterschiedlich langer Standzeit untersucht und bewertet.

Ergebnisse und Diskussion

Entwicklung eines Weiterqualifizierungsangebotes

Nach zwei Workshops und einem Abschlusskolloquium konnte ein erprobtes Konzept zur Weiterbildung in der Heißkalktechnik erstellt werden, dass nach Auslaufen des Projekts weiterhin angeboten werden wird (nächster Termin September 2019). Es hat sich bestätigt, dass zweitägige Workshops, die Projektergebnisse und die relevanten Sicherheitskonzepte, aber auch praktisches Üben mit Heißkalk unter fachkundiger Anleitung vermitteln, von den Teilnehmern als gute Vorbereitung für selbständiges Arbeiten mit Heißkalk empfunden werden.

Zu den für den Heißkalkmörtel bisher empirisch beschriebenen Eigenschaften lassen sich folgende Aussagen treffen:

Ein schnelleres Ansteifen im Vergleich mit kalt verarbeiteten Mörteln, das einen Antrag von dickeren Putzschichten oder einen schnelleren Fortschritt beim Mauern erlaubt, konnte bestätigt werden.

Weiterhin wurden höhere Haftzugfestigkeiten für Heißkalkmörtel festgestellt, die eine gute Anbindung an den Untergrund sicherstellen.

Ein großer Porenraum und eine höhere kapillare Wasseraufnahme wurden ermittelt. Diese Faktoren lassen die Mörtel zur Mauerwerkstrocknung und Salzeinlagerung geeignet erscheinen. Es muss jedoch eingeschränkt werden, dass es sich beispielsweise bei Putzen dann um Verschleißschichten handelt, die nach einer gewissen Zeit im Sinne eines Opferputzes wieder abgenommen werden müssen. Von besonderem Vorteil wird bei den rein auf Kalk basierenden Heißkalkmörteln gesehen, dass sie keine schädlichen Kationen eintragen, was bei trass- oder zementhaltigen Mörteln nicht ausgeschlossen werden kann.

Im Labormaßstab konnten auch höhere Druckfestigkeiten nach längerer Lagerungszeit im Vergleich mit „kalt“ verarbeiteten Mörteln nachgewiesen werden. Dies ließ sich durch Messungen an Putzproben, die unter wechselnden klimatischen Bedingungen im Außenbereich gelagert wurden, jedoch nicht bestätigen. Die höhere Druckfestigkeit im Labormaßstab könnte auf eine ebenfalls an diesen Mörteln nachgewiesene unterschiedliche Mikrostruktur zurückzuführen sein. Im Vergleich mit den „kalt“ verarbeiteten Mörteln zeichneten sich diese Heißkalkmörtel durch gröbere, besser kristalline Partikel in der Mörtelmatrix aus. An Laborproben war darüber hinaus nachweisbar, dass heiß verarbeitete Mischungen messbare Frühfestigkeiten schon nach einer kurzen Lagerungszeit aufwiesen, nach der die Laborproben „kalt“ verarbeiteter gleicher Mischungen wegen mangelnder Festigkeit noch gar nicht aus den Formen ausgeschalt werden konnten.

Den nach längerer Standzeit nachuntersuchten früheren Heißkalkanwendungen an verschiedenen Denkmalobjekten kann bisher überwiegend eine gute Dauerhaftigkeit bescheinigt werden. Mängel ergaben sich im Einzelfall durch ungeeignete Mischungsbestandteile (Ausplatzungen an Putz durch nachlöschende Kalkgranulat-Partikel) oder Verfärbungen auf eisenhaltigen oder durch Teeranstrich vorbehandelten Substraten.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Projektergebnisse wurden in zwei Publikationen und einem Abschlussbericht veröffentlicht und auf einer internationalen Fachkonferenz (HMC 2019) präsentiert. Fortlaufend wurden aktuelle Entwicklungen des Forschungsprojektes auf der Homepage des Antragstellers vorgestellt. Ein Abschlusskolloquium machte die Projektergebnisse einem größeren Fachpublikum aus dem In- und Ausland bekannt.

Fazit

Neben dem erarbeiteten Workshop-Konzept, das auch über die Projektlaufzeit hinaus der Fachöffentlichkeit angeboten wird, konnten wichtige Materialparameter für Heißkalkmörtel erfasst und der Erfolg bestehender Restaurierungen evaluiert werden. Es muss einschränkend gesagt werden, dass die erhobenen Materialkennwerte nur für die im Projekt untersuchten Mischungen gelten können. Im Laufe des Projektes hat es sich herausgestellt, dass Heißkalkmörtel sehr empfindlich auf kleinste Änderungen in der Rezeptur und in den Verarbeitungsbedingungen reagieren. Für die untersuchten Mörtel, die vergleichend heiß und „kalt“ verarbeitet wurden, kann jedoch eine höhere Frühfestigkeit und zumindest im Labormaßstab im Endeffekt höhere Festigkeit, eine bessere Haftung, ein stärkeres kapillares Saugen und eine bessere Salzbeständigkeit bei den Heißkalkmörteln festgestellt werden.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 0 | Vorwort | 4 |
| 1 | Anlass und Zielsetzung des Projekts | 4 |
| 1.1 | Anlass | 4 |
| 1.2 | Ziele des Projektes | 6 |
| 2 | Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden | 7 |
| 2.1 | Allgemeines | 7 |
| 2.2 | Entwicklung des Weiterbildungsformats (Workshops) | 7 |
| 2.3 | Materialuntersuchungen zur Ermittlung von Kennwerten | 9 |
| 2.4 | Anlage von Heißkalk-Musterflächen an historischem Mauerwerk und deren naturwissenschaftliche Untersuchung | 9 |
| 2.5 | Evaluierung bestehender Restaurierungen in Heißkalktechnik an umweltgeschädigtem Mauerwerk | 10 |
| 3 | Ergebnisse | 11 |
| 3.1 | Entwicklung des Weiterbildungsformats (Workshops) | 11 |
| 3.1.1 | Arbeitssicherheit | 15 |
| 3.2 | Materialuntersuchungen zur Ermittlung von Kennwerten | 22 |
| 3.2.1 | Untersuchungsmethoden | 22 |
| 3.2.2 | Zuschläge (Gesteinskörnungen) und Bindemittel | 30 |
| 3.2.3 | Rezepturen | 39 |
| 3.2.4 | Löschverfahren | 40 |
| 3.2.5 | Mischen der Mörtel | 42 |
| 3.2.6 | Herstellen der Prüfkörper | 43 |
| 3.2.7 | Charakterisierung der Frischmörteleigenschaften | 44 |
| 3.2.8 | Charakterisierung der Festmörteleigenschaften | 49 |
| 3.3 | Anlage von Heißkalk-Musterflächen an historischem Mauerwerk und deren naturwissenschaftliche Untersuchung | 67 |
| 3.3.1 | Untersuchungsmethoden | 67 |
| 3.3.2 | Auswahl der Musterflächen in Kloster Buch und naturwissenschaftliche Voruntersuchungen zur Feuchte-Salz-Belastung | 69 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 3.3.2.1 | Probenahme | 70 |
| 3.3.2.2 | Ergebnisse und Interpretation | 72 |
| 3.3.3 | Mörteluntersuchungen am Bestand der Langhausmauer | 76 |
| 3.3.3.1 | Probenahme | 76 |
| 3.3.3.2 | Ergebnisse und Interpretation | 77 |
| 3.3.4 | Untersuchungen an Ausgangsstoffen für die Heißkalkbereitung an Musterflächen in Kloster Buch | 80 |
| 3.3.4.1 | Probenahme | 80 |
| 3.3.4.2 | Ergebnisse und Interpretation | 81 |
| 3.3.5 | Anlage von Musterflächen und Nachuntersuchungen | 83 |
| 3.3.5.1 | Anlage und Dokumentation der Musterfläche | 83 |
| 3.3.5.2 | Nachuntersuchungen an Musterflächen | 86 |
| 3.3.5.3 | Ergebnisse und Interpretation | 88 |
| 3.3.5.4 | Herstellung und Untersuchung von Ziegel-Putz-Verbundkörpern | 94 |
| 3.4 | Evaluierung bestehender Restaurierungen in Heißkalktechnik an umweltgeschädigtem Mauerwerk | 101 |
| 3.4.1 | Untersuchungsmethoden | 101 |
| 3.4.2 | Grimma, Klosterkirche, Musterflächen in Heißkalktechnik | 101 |
| 3.4.2.1 | Voruntersuchungen zur Feuchte- und Salzbelastung | 102 |
| 3.4.2.2 | Untersuchung der historischen Bestandsmörtel | 107 |
| 3.4.2.3 | Anlage von Putzmusterflächen | 109 |
| 3.4.2.4 | Nachuntersuchungen an Musterflächen und Bewertung | 111 |
| 3.4.3 | Magdeburg, Kloster Unserer Lieben Frauen, Krypta, Heißkalkmusterflächen | 118 |
| 3.4.3.1 | Voruntersuchungen und Interpretation der Ergebnisse | 119 |
| 3.4.3.2 | Anlage und Nachuntersuchungen der Heißkalkmusterfläche | 122 |
| 3.4.3.3 | Evaluierung der Restaurierung | 126 |
| 3.4.4 | Zeitz, Michaeliskirche, Instandsetzung Strebebfeiler in Heißkalktechnik | 127 |
| 3.4.4.1 | Probenahme | 128 |
| 3.4.4.2 | Ergebnisse und Interpretation | 129 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 3.4.5 | Schlosspark Mosigkau, Chinesischer Pavillon, Nachuntersuchungen an Heißkalkflächen | 132 |
| 3.4.5.1 | Restaurierung der Fassadenputze | 133 |
| 3.4.5.2 | Visuelle Evaluierung der Restaurierung in Heißkalktechnik | 135 |
| 3.4.6 | Meißen, Dom, Südarkade, Pfeiler, „Heiße Vierungsfuge“ | 136 |
| 3.4.6.1 | Probenahme | 137 |
| 3.4.6.2 | Ergebnisse und Interpretation | 138 |
| 4 | Diskussion | 139 |
| 4.1 | Entwicklung und Verstetigung des Weiterbildungsformats (Workshops) | 139 |
| 4.2 | Materialuntersuchungen zur Ermittlung von Kennwerten | 140 |
| 4.3 | Anlage von Heißkalk-Musterflächen an historischem Mauerwerk und deren naturwissenschaftliche Untersuchung | 142 |
| 4.4 | Evaluierung bestehender Restaurierungen in Heißkalktechnik an umweltgeschädigtem Mauerwerk | 144 |
| 5 | Öffentlichkeitsarbeit | 146 |
| 6 | Fazit | 147 |
| 7 | Literatur | 148 |

0 Vorwort

Das Projekt „Entwicklung eines Weiterqualifizierungsangebots zur Baustoffkenntnis und Anwendung von Heißkalkmörtel an umweltgeschädigtem Mauerwerk historischer Bauwerke“ (im Folgenden kurz „Heißkalk“) ist von April 2017 bis Juni 2019 durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert worden. Antragsteller zur Projektförderung war die TU Dresden, Institut für Geotechnik, Fachbereich Angewandte Geologie. Als aktive Partner bzw. Auftragnehmer, die bereits in der Phase der Antragstellung Unterstützung gaben und wichtige Projektaufgaben übernommen und bearbeitet haben, wirkten mit:

- *Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK)* (Bearbeiter: Dipl.-Min. Matthias Zötzl)
- Restaurator im Handwerk *Alexander Fenzke*, Fa. DenkMal Fachbetrieb für Restaurierung und Altbausanierung, Bad Marienberg
- Dipl.-Rest. *Thomas Schmidt*, freiberuflicher Restaurator, Leisnig

Die *Hochschule für Bildende Künste (HfBK) Dresden*, Fachklasse für Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Wandmalerei und Architekturfarbigkeit (Leiter der Fachklasse: Prof. Dr. Thomas Danzl) unterstützte und flankierte das Projekt mit der Bereitstellung von Räumlichkeiten und praktischer Organisation für einen Workshop des Projekts in Dresden und schrieb während der Projektlaufzeit zwei studentische Seminararbeiten aus, deren Bearbeiterinnen in die Projektveranstaltungen aktiv mit einbezogen werden konnten.

Allen genannten Beteiligten sowie auch Herrn Kaiser und Frau Niehr vom technischen Denkmal Ziegelei Hundisburg e.V. und ihren Mitarbeitern, die sich als Gastgeber sehr engagiert der technischen Vorbereitung und logistischen Betreuung des Abschlusskolloquiums des „Heißkalk-Projekts“ im März 2019 in der Ziegelei Hundisburg gewidmet haben, gilt herzlicher Dank!

Besonderer Dank gebührt der DBU für die finanzielle Förderung der Themenbearbeitung.

1 Anlass und Zielsetzung des Projekts

1.1 Anlass

Die Verarbeitung von auf der Baustelle trocken gelöschten Kalkmörteln unmittelbar nach der Wasser-/Sandzugabe - auch Mauern bzw. Putzen „mit der heißen Kelle“ genannt - ist eine historische Arbeitstechnik, die sich in den letzten Jahren wieder zunehmender Aufmerksamkeit erfreut. Diese Möglichkeit der Verarbeitung ist wohl v.a. mündlich im Handwerk über die Zeiten tradiert worden, denn in der historischen Literatur wird darauf nur beiläufig eingegangen, wie bspw. in den HANNOVERSCHEN ANZEIGEN (1757, S. 1391 - 1392). Ein anonymes Autor beschreibt hier die Verwendung von heißem Mörtel wie folgt:

„Er (Anmerkung: der Bauherr) mache Ueberschlag wie viel Maurer er hat, und wie viel Kalkmörtel sie in einem halben Tage verarbeiten können, und lasse sodann in der Frühe

nicht mehr Kalk löschen, als sie in solchem halben Tage, nemlich bis Mittags verbrauchen. Ja man muß, wenn der gelöschte Kalk noch ganz heiß, oder noch im Löschen ist, einen Theil Kalk und zwey Theile Sand, zur erforderlichen Portion an Mörtel nehmen, wol auch beständig durcharbeiten, und so frisch und warm vermauern oder verbrauchen.“

Einige Handwerker und Restauratoren in Deutschland haben aber bereits wieder recht umfangreiche praktische Erfahrungen dazu entwickelt. Im Gegensatz zu früheren Zeiten, als im Trockenlöschvorgang wohl vorwiegend stückiger Branntkalk verarbeitet worden ist, wird heute als Branntkalk zur Heißkalkbereitung industriell gemahlener Pulverkalk eingesetzt. In anderen europäischen Ländern, vor allem in Großbritannien (z.B. SNOW 2016), wurde diese historische Technik ebenfalls wiederbelebt und an verschiedenen historischen Bauwerken bei Restaurierungs- und Instandsetzungsarbeiten genutzt. Allerdings wird hier überwiegend Branntkalk-Granulat verwendet.

Für die Heißkalkmörtelherstellung wird Branntkalk unmittelbar vor der Verarbeitung mit Sand gemischt, Wasser hinzugegeben, nochmals gemischt und noch im heißen Zustand sofort appliziert. Für die so bereiteten Mörtel werden ein großer Porenanteil sowie hohe Frühfestigkeiten und Haftungen beschrieben (KRAUS 2011). Auf Grund der geringeren Neigung zum Schwinden und der schnellen Ansteifung können gegenüber einem Sumpfkalkmörtel auch stärkere Putzschichten weitgehend schwindrissfrei angetragen werden. Über eine leichte Expansion während des Abbindens wird berichtet, die vor allem im Fugenbereich zu einer guten Flankenhaftung und einem kraftschlüssigen Verbund führen soll.

Fundierte wissenschaftliche Erkenntnisse zur Festigkeitsentwicklung, zur Dauerhaftigkeit sowie Materialkennwerte von Heißkalkmörteln liegen aber bisher nicht vor, obwohl in Deutschland bereits verschiedene Applikationen, teilweise auch an Denkmalobjekten, erfolgt sind. Einige wenige existierende Literaturbeiträge (KLOTZ-WARISLOHNER 1999, NEULING 2011, FENZKE 2011 und 2017) basieren vorwiegend auf langjährigen praktischen Erfahrungen einzelner Handwerker, die dieses Material erfolgreich in Problembereichen einsetzen. Erste wissenschaftliche Untersuchungen wurden von KRAUS (2011) und HESSE (2014) vorgestellt. Verschiedene internationale Publikationen tragen zwar den Begriff „hot lime“ im Titel (z.B. MARGALHA 2011, VALEK & MATAS 2012), beschreiben aber nur die Untersuchung trocken gelöschter Kalkmörtel und nicht solche, die sofort nach dem Anmachen verarbeitet wurden, wie bei Heißkalkmörteln im Sinne der Definition in diesem Projekt praktiziert.

Im Interesse einer fachlich fundierten und nachhaltigen Instandsetzung von historischen Bauwerken mit solchen Mörteln erschien diese Situation unbefriedigend. Die Anwendung dieser interessanten und für bestimmte Instandsetzungsprobleme offensichtlich viel versprechenden Technik gerät zudem wegen fehlender Grundkenntnisse zum Erhärtungsprozess und den sich daraus entwickelnden besonderen Eigenschaften in fachlichen Diskussionen immer wieder in den Bereich des Okkulten, insbesondere im Vergleich mit der Applikation genormter moderner Baustoffe, deren Eigenschaften gut einzuschätzen sind und für die solche Kennwerte als Richtwerte angegeben werden können. Vor allem im Bereich umweltgeschädigten, stark salzbelasteten Mauerwerks könnten die Heißkalke aber eine

sinnvolle Alternative zu den zur Verfügung stehenden industriell gefertigten Bindemittelbaustoffen sein und dabei gleichzeitig die Forderung der Denkmalpflege nach solchen Systemen erfüllen, die möglichst den historischen Mörteln nahe kommen.

1.2 Ziele des Projektes

Hauptziel des Projektes war die *Entwicklung eines Weiterqualifizierungsangebots im Format eines Workshops* zur Anwendung von Heißkalkmörteln für Handwerker, Restauratoren sowie Fachplaner (Architekten und Denkmalpfleger). Es soll sowohl theoretische Grundlagen wie auch praktische Arbeitsweisen vermitteln. Durch die Mitwirkung eines bereits über viele Jahre mit dieser Technik arbeitenden Maurermeisters und Restaurators im Mauerhandwerk (A. Fenzke) war die Möglichkeit gegeben, seine langjährigen Erfahrungen in der praktischen Ausführung einzubinden und dabei Möglichkeiten und Grenzen der Arbeitstechnik aufzuzeigen. Weil die Reaktion und Verarbeitbarkeit des Systems Mörtel (natürlich auch des als Heißkalkmörtel applizierten Systems) stark von jeweils verwendeter Kalkart sowie zugesetzten Gesteinskörnungen und Wasserzugabe abhängen, konzentrierte sich das Projekt in der Darstellung der Verarbeitung auf die durch A. Fenzke bereits über viele Jahre genutzten und praktisch bewährten Komponenten und Rezepturen.

Die flankierenden *materialkundlichen Untersuchungen*, die zur *Qualifizierung der Baustoffkenntnis* von heiß verarbeiteten Kalkmörteln dienen sollten, wurden dementsprechend ebenfalls an diesen bewährten Baustellenmischungen durchgeführt. Dabei wurden mit der Heißkalktechnik hergestellte Laborprüfkörper ebenso untersucht wie Applikationen an einer Musterwand aus umweltgeschädigtem historischem Mauerwerk in Kloster Buch bei Leisnig (Sachsen). Zum Vergleich sind weiterhin Laborprüfkörper wie auch Musterflächen mit „kalt“ verarbeiteten, d.h. trocken vorgelöschten Mörteln untersucht worden. Die Ergebnisse fließen in den theoretischen Teil des Workshops ein und fundieren praktische Erfahrungen mit entsprechenden technischen Kennwerten. Diese erlauben auch eine objektivere Bewertung der bisher ausschließlich haptisch-visuell beurteilten Ergebnisse der Applikation solcher Mörtel.

Ein *Monitoring* von bereits *in der Vergangenheit ausgeführten Instandsetzungsmaßnahmen mit Heißkalk* sollte alle in der Region (Sachsen und Sachsen-Anhalt) erreichbaren Informationen zu früher durchgeführten Heißkalk-Applikationen zusammentragen und die derzeitigen Zustände der so behandelten Objekte dokumentieren. Aus denkmalpflegerischen Gründen waren dabei naturwissenschaftliche Untersuchungen an den restaurierten Objekten nur in sehr begrenztem Umfang möglich.

Die bereits erwähnte *Musteranwendung an historischem Mauerwerk* in Kloster Buch dient neben der Demonstration der praktischen Anwendung an einem historischen Objekt mit Umweltschäden im Rahmen des ersten Projektworkshops als *Referenzfläche*, an der im Sinne eines *Monitoring* die Musterflächen heiß verarbeiteter und „kalt“ applizierter, vorher heiß abgelöschter Mörtelmischungen hinsichtlich ihrer *Dauerhaftigkeit* über längere Zeiträume auch nach Auslaufen des Projektes bewertet werden können.

Bei der Beantragung und Planung des Projekts standen Fragen der *Arbeitssicherheit* noch nicht im Fokus, stellten sich aber während der Bearbeitung und vor allem in Hinblick auf die Verantwortung bei der Durchführung von Workshops als unumgänglich heraus. Die Herstellung von Baustellenmischungen, insbesondere mit hohen Mörteltemperaturen, bergen einige Gefahren, die es zu benennen und durch Maßnahmen zu begrenzen gilt. Entsprechende Hinweise werden deshalb im Projektbericht gegeben.

2 Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

2.1 Allgemeines

Entsprechend der Zielstellung des Projekts (s. 1.2.) waren verschiedene Aufgabenstellungen zu lösen und die Ergebnisse in den Projektablauf zu integrieren. Im Mittelpunkt stand – gemäß dem Projektantrag – die Konzipierung, Entwicklung und „Einübung“ eines *Weiterbildungsformats zur Anwendung von Heißkalkmörteln* (s. 2.2.).

Der theoretische Teil dieses Workshops sollte *Ergebnisse aus den materialkundlichen Untersuchungen* (s. 2.3) übernehmen und verbreiten, die flankierend innerhalb des Projekts gewonnen wurden. Diese konnten im ersten Workshop nach ca. 6 Monaten noch nicht präsentiert werden, weil die Herstellung entsprechender Prüfkörper, Aushärtezeiten, Kennwertbestimmung und Auswertung längere Zeit brauchten. So wurde im theoretischen Teil vor allem der derzeitige Kenntnisstand (Literatur, Praxisberichte von mit der Technik erfahrenen Handwerkern) präsentiert. In den zweiten Workshop und natürlich in das Abschlusskolloquium sind diese Ergebnisse dann aber in immer stärkerem Maße mit eingeflossen.

Schließlich war geplant, durch *Monitoring von dokumentierten Heißkalkanwendungen* der Vergangenheit sowie durch *Anlage von Musterflächen* mit heiß und „kalt“ verarbeiteten Mörtelmischungen unter definierten Bedingungen an einem umweltgeschädigten Denkmalobjekt (ruinöses Mauerwerk am Kloster Buch bei Leisnig / Sachsen) fundierte Bewertungen von Objektanwendungen zu generieren, die ebenfalls in den theoretischen Teil des Workshops einfließen sollten.

2.2 Entwicklung des Weiterbildungsformats (Workshops)

Die vorgesehenen Workshops wurden innerhalb der Projektlaufzeit zeitlich so geplant, dass die Verarbeitung von Erfahrungen aus den vorangehenden in den folgenden Veranstaltungen möglich war. Ein *erster Workshop* wurde bereits im Herbst 2017 (28. - 29. 09. 2017), d.h. ca. 6 Monate nach Beginn des Projektes, in Kloster Buch durchgeführt. Die Grundidee war, zu diesem ersten Workshop möglichst erfahrene Restauratoren und Handwerkern einzuladen, die die Technik der Heißkalkverarbeitung bereits selbst praktiziert bzw. sich in ihrem beruflichen Kontext bereits mit Problemen dieser Technik befasst hatten. Dies sollte Diskussionen zunächst im geschlossenen Kreis als eventuelle Korrektive zum Praxis- und Theorieteil ermöglichen. Aus praktischen Gründen wurde der erste Workshop in

Kloster Buch durchgeführt. Dort konnten nach Vorträgen und Demonstrationen des eigentlichen Workshops im gleichen Rahmen am 30. 09. 2017 auch die Musterflächen am historischen Mauerwerk des ausgewählten umweltgeschädigten Demonstrationsobjektes durch die im Projekt beteiligten Praktiker (Fenzke / Schmidt) noch vor der Frostperiode angelegt werden. Weiterhin wurden durch die Ausführenden Verbundkörper (Ziegel / Putz bzw. Mörtel) zur späteren Kennwertbestimmung hergestellt.

Der *zweite Workshop* wurde am 19. und 20. 03. 2018 an der HfBK in Dresden geplant. Im Gegensatz zum ersten Workshop, zu dem v.a. erfahrene Praktiker gezielt eingeladen worden waren, konnten sich diesmal Teilnehmer aus den Bereichen Restaurierung, staatliche Denkmalpflege, Handwerk und Naturwissenschaft in die Heißkalktechnik einführen lassen und selbst unter Anleitung Heißkalk verarbeiten. Dabei gingen schon erste Ergebnisse der Materialprüfungen und der Evaluierung bestehender Heißkalkanwendungen in den theoretischen Teil ein. Der zweite Workshop präsentierte das Format mit Theorie- und Praxisteil bereits in der endgültig vorgesehenen Form und einem entsprechenden zeitlichen Ablauf mit der Möglichkeit, nochmals Detailkorrekturen vorzunehmen. Über Fragebögen wurde dazu das Feedback der Teilnehmer erbeten. Auf Grund der im März jahreszeitlich bedingt unsicheren Witterung war beschlossen worden, den zweiten Workshop im Innenraum durchzuführen. Damit konnte auch der logistische Umgang mit ca. 20 selbst aktiven Teilnehmern auf relativ engem Raum eingeübt und praktiziert werden, der bei guter Vorbereitung möglich ist. Die HfBK stellte dafür dankenswerterweise ihre Atelier-räumlichkeiten mit entsprechenden Musterwänden zur Applikation von Putzen und Schlämmen aus Heißkalk zur Verfügung. Die ursprüngliche Vorstellung bei Antragstellung, den zweiten Workshop ggf. in einem Freilichtmuseum oder Umfeld eines Denkmals durchzuführen konnte aus organisatorischen Gründen nicht realisiert werden.

Das *Abschlusskolloquium* am 21.-22. 03. 2019 enthielt neben Gastbeiträgen und einer methodischen Vorstellung des Projekts Beiträge von Projektbeteiligten (Köberle, Zötzl, Fenzke) wie Praxisberichte zu früher ausgeführten Anwendungen und Vorträge zur Evaluierung bestehender Restaurierungen in Heißkalktechnik, zu Ergebnissen der Materialprüfungen sowie zur Arbeitssicherheit im Umgang mit Heißkalkmörteln. In den zwischen 20 und 45 Minuten langen Vorträgen wurden die für das Workshop-Format im theoretischen Teil vorgesehenen Beiträge abgebildet. Der Praxisteil umfasste wiederum Demonstrationen der Heißkalkanwendungen in verschiedenem Kontext. Wegen der großen Teilnehmerzahl, die in zwei Zuschauergruppen geteilt werden musste, war eine aktive Beteiligung der Teilnehmenden diesmal nicht möglich. Dennoch wurden die verschiedenen praktischen Aktivitäten erneut – didaktisch verbessert – vorgestellt und eingeübt. Auf diese Weise konnten Elemente des entwickelten Workshop-Formats (mit der Einschränkung einer passiven Rezeption) beim Abschlusskolloquium einer großen interessierten Fach-öffentlichkeit vorgestellt werden. Der angekündigte nächste Workshop (nach Projektende im September 2019) mit der Möglichkeit, selbst Heißkalkmischungen herzustellen und anzuwenden, stieß auf großes Interesse der Teilnehmer.

2.3 Materialuntersuchungen zur Ermittlung von Kennwerten

Materialuntersuchungen an Heißkalkmörteln waren in verschiedenen Kontexten vorgesehen. So sollten die üblichen Kennwerte für Mörtelmischungen wie Druckfestigkeit, Haftzugfestigkeit, Salzbeständigkeit etc. an den im Projekt verarbeiteten und teilweise in Kloster Buch applizierten Heißkalkmörteln bestimmt werden, um erste Daten für die in der Praxis vom Projektteilnehmer A. Fenzke bereits angewendeten, verarbeitungstechnisch bewährten Mischungen zu erhalten. Dazu wurden die entsprechend notwendigen Prüfkörper im Labor nach den erprobten Rezepturen hergestellt, wobei die Mörtel in heißem Zustand in die Formen gebracht wurden. Im Vergleich dazu wurden „kalt“ verarbeitete Mörtelmischungen mit den gleichen Bindemitteln und Gesteinskörnungen (Zuschlagstoffen) ebenfalls untersucht. Über die technischen Kennwerte hinaus sind auch die Gefüge der Mörtel mikroskopisch und durch weitere Methoden wie Quecksilberdruckporosimetrie charakterisiert worden.

Die Musterflächen in Kloster Buch wurden vor der Applikation von Mörtelmischungen auf Schadstoffbelastung (bauschädliche Salze) untersucht. Neben der visuellen Begutachtung der angelegten Flächen nach der Frostperiode erfolgte an ausgewählten Punkten auch eine Untersuchung der Schadsalzbelastung der aufgetragenen Mörtel.

An Ziegel-Mörtel-Verbundprobekörpern, die bei der Applikation der Musterflächen in Kloster Buch als „Nebenprodukte“ mit den dort verarbeiteten Mischungen hergestellt worden sind, wurden weitere Untersuchungen ausgeführt, wie die Messung von Haftzugfestigkeiten.

Im Ergebnis sollten naturwissenschaftlich fundierte Aussagen zu den von den Verarbeitern aus der Praxis empirisch beschriebenen Eigenschaften wie Festigkeit, Haftung, Salzspeichervermögen etc. getroffen werden. Die Ergebnisse sollten schließlich in den theoretischen Teil des Workshopformats einfließen.

2.4 Anlage von Heißkalk-Musterflächen an historischem Mauerwerk und deren naturwissenschaftliche Untersuchung

Ein wichtiger Projektbestandteil war die Anlage und Bewertung von Musterflächen auf umweltgeschädigtem historischem Mauerwerk. Dazu wurden unterschiedliche Mörtelrezepturen aus dem Portfolio von A. Fenzke sowohl in Heißkalktechnik als auch zum Vergleich mit trocken gelöschten Mörteln ausgeführt. Für die Anlage von Musterflächen im Projekt wurde eine umweltgeschädigte Wandfläche an der Ruine der Langhausmauer der Klosterkirche im ehemaligen Zisterzienserkloster Buch bei Leisnig ausgewählt. Dieses war in seiner mehrhundertjährigen Geschichte regelmäßig von Hochwasser betroffen. Darüber hinaus ist es in den vergangenen 150 Jahren durch anthropogene Umwelteinflüsse geschädigt worden und zeigt eine starke Salzbelastung.

Vorab wurden an den Musterflächen umfangreiche Voruntersuchungen der Feuchte- und Salzbelastung des Mauerwerks sowie Mörtelanalysen am bauzeitlichen Bestand durchgeführt. Im Anschluss an den ersten Workshop wurden durch die Restauratoren A.

Fenzke und T. Schmidt die Putzmusterflächen angelegt und dokumentiert. In diesem Zusammenhang wurden auch Putzmörtel-Ziegel-Verbund-Probekörper für die Ermittlung von Materialkennwerten nach 360 Tagen hergestellt, in Kohren-Sahlis ausgelagert und untersucht.

2.5 Evaluierung bestehender Restaurierungen in Heißkalktechnik an umweltgeschädigtem Mauerwerk

In der ersten Phase des Projekts wurden durch Recherchen Objekte ermittelt, an denen Heißkalkanwendungen erfolgt sind. Aus solchen Objekten wurden zugängliche Bereiche für Nachuntersuchungen ausgewählt, wobei diese – je nach Denkmalsituation – von rein visueller Begutachtung bis hin zur Probenahme und Materialuntersuchung reichten. An einigen Objekten hatte das IDK bereits vor der vorgesehenen Maßnahme Voruntersuchungen zum Zustand des Mauerwerks durchgeführt, und die Anlage von Heißkalkmusterflächen empfohlen, die in die Auswertung mit einbezogen werden konnten.

Untersuchungen zum Monitoring bereits bestehender Heißkalkanwendungen wurden durch das IDK (M. Zötzl) an den folgenden Objekten durchgeführt:

- Grimma, Klosterkirche, Innenraum, Musterflächen, Applikation 2015
siehe auch Anlage ZÖTZL (2018a)
- Magdeburg, Kloster Unserer Lieben Frauen, Krypta, Musterflächen, Applikation 2015
siehe auch Anlagen ZÖTZL & KERSTEN (2016), ZÖTZL (2017a), ZÖTZL (2018b)
- Zeitz, Michaeliskirche, Strebepfeiler außen, Applikation 2015
siehe auch Anlage ZÖTZL (2018c)
- Mosigkau, Schlosspark, Chinesischer Pavillon, Fassade, Applikation 2015
siehe auch Anlage ZÖTZL (2018d)
- Meißen, Dom, Südarkade, Pfeiler, „Heiße Vierungsfuge“, Applikation 1995
siehe auch Anlage ZÖTZL (2019b)

3 Ergebnisse

3.1 Entwicklung des Weiterbildungsformats (Workshops)

Erster Workshop (28. - 29. 09. 2017) im Kloster Buch bei Leisnig / Sachsen

Zum ersten Workshop waren gezielt Fachkollegen (handwerklich-restauratorische Praktiker sowie Naturwissenschaftler) eingeladen worden, die Erfahrungen mit traditionellen Techniken des Kalklöschens und -verarbeitens haben. Der Workshop fand unter internationaler Beteiligung mit 14 Teilnehmern aus Österreich, der Schweiz, Tschechien und Deutschland statt. Zu Beginn wurden in kurzen Vorträgen und Diskussionen Ziele und Anliegen des Projekts vorgestellt und bisherige Erfahrungen mit der Heißkalkverarbeitung zusammengetragen. Von Seiten der Praktiker wurden dann Anwendungs- und Kalklöschtechniken mit verschiedenen, teilweise von ihnen mitgebrachten Kalkarten vorgeführt und gemeinsam diskutiert und bewertet. Im Mittelpunkt der Diskussion standen die Arbeiten von Projektpartner A. Fenzke, der seine an unterschiedlichen Objekten erprobte Verarbeitung von Heißkalk praktisch demonstrierte und dabei Variationsmöglichkeiten über verschiedene Mörtelmischungen sowie verschiedene Anwendungen (Mauermörtel, Verputz, Estrich) darstellte. So wurden die Qualitäten der schnell zu verarbeitenden Mischungen hinsichtlich hoher Antragsstärken in einem Arbeitsgang gezeigt (Abbildung 1), Putze angetragen sowie ein Stück Estrich gegossen (Abbildung 2) und ein Bogen aus Porphyrsteinen (Abbildung 3) gemauert und vergossen.



Abb. 1:
Angeworfener Heißkalk-Mörtel
mit hoher Schichtdicke (12 cm)



Abb. 2: Herstellung eines Estrichmörtels aus Heißkalk. a) Ausgießen des Mörtels in die Form, b) Mörtel nach Abziehen der Oberfläche (die Temperaturmessung nach Abschluss der Verarbeitung zeigt noch 46 °C Oberflächentemperatur)



Abb. 3:
Abschließendes Vergießen eines aus Porphy-Steinen mit Heißkalk gemauerten Bogens mit einer fließfähigen Heißkalkmischung. Der Bogen erreicht seine Standfestigkeit unmittelbar nach der Verarbeitung, so dass das Lehrgerüst anschließend sofort entfernt werden kann

Dabei konnten die Teilnehmer selbst mit den vorgeschlagenen Rezepturen experimentieren bzw. diese verarbeiten. Der zweitägige Workshop ermöglichte in kleinerem Kreis einen intensiven Austausch über Techniken der Kalk- und Heißkalkverarbeitung. Für die Planer des Workshops bot sich die Gelegenheit ihr Konzept zu testen. Als günstig stellte sich dabei die Möglichkeit heraus, auch nach Ende des offiziellen Tagesprogramms abends am Grill weiter Fachliches diskutieren zu können. Die Konzeption, den Workshop als zweitägige Veranstaltung mit Übernachtung und geselligem Abendprogramm zu konzipieren, ging damit auf und wurde für die Planung künftiger Workshops bestätigt. Weiterhin konnten Erfahrungen bei der praktischen Vorbereitung des „mobilen“ Workshop-Formats gesammelt werden. Hier wären vor allem die notwendigen räumlichen Voraussetzungen vor Ort, wie Platz für praktische Übungen, aber auch ein beheizbarer Raum für Referate und Einweisungen zu nennen. Ferner sollte die Lokalität über fließend Wasser und Strom in direktem Umfeld verfügen und sicher zugänglich sein. Bei diesem ersten Workshop konnte auch die notwendige Menge an Baustoffen ermittelt werden. Ebenso wurden didaktische Fragen erörtert, wie eine für die Teilnehmer gut sichtbare Demonstration der Verarbeitung,

Möglichkeiten und möglicher Umfang der aktiven Beteiligung und Zeitplanung. Nicht zuletzt wurde das notwendige Sicherheits- und Arbeitsschutzkonzept praktisch überprüft.

Der erste Workshop brachte neben konstruktiv-kritischen Anmerkungen der Teilnehmer somit die Sicherheit, nach dem erfolgreichen „Probelauf“ des praktischen Teils vor Fachkollegen im nächsten Schritt eine Veranstaltung für Interessenten aus Planung und Praxis in der baulichen Denkmalpflege durchzuführen.

Zweiter Workshop (19. und 20. 03. 2018) an der HfBK in Dresden

Der zweite Workshop stellte die erste Veranstaltung dar, mit der das Workshop-Format zum Heißkalk der Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht wurde. Darüber hinaus wurde neben dem praktisch-handwerklichen Teil der theoretische Teil strukturiert. An dieser Veranstaltung, für die Einladungen vor allem an Vertreter des Handwerks, der Restauratoren, der Fachbehörden sowie planende Architekten ergingen, nahmen neben den Projektbeteiligten 19 Personen aus den Bereichen Restaurierung (9), Denkmalbehörden (4), Handwerk (3), Architektur/Fachplanung (2) und Naturwissenschaften (1) teil. Eine Zahl der Beteiligten von etwa 20 Personen stellt nach den Erfahrungen mit den Workshops auch die maximal mögliche Teilnehmerzahl dar, bei der die Inhalte, unter mindestens teilweise aktiver Beteiligung von Teilnehmern, noch didaktisch sinnvoll vermittelt werden können. Auch aus sicherheitsrelevanten Aspekten ist diese Anzahl an Teilnehmern als absolutes Maximum zu sehen. Der Workshop war konzeptionell in einen theoretischen Einführungsteil und einen praktischen Teil gegliedert. Im theoretischen Teil erfolgten zunächst eine Vorstellung des Projekts und eine technische Einweisung zu den geplanten Abläufen durch die Projektbeteiligten (9.30 bis 10.30 Uhr, einschließlich Kaffeepause). Danach schlossen sich Fachvorträge an (10.30 bis 12 Uhr): A. Fenzke stellte sein Arbeitsblatt „Heißkalk“ und Projekte aus der eigenen Praxis vor. M. Zötzl präsentierte erste Ergebnisse der Evaluierung früher durchgeführter Maßnahmen mit Heißkalk an Denkmalobjekten. Zwei Restaurierungsstudentinnen der HfBK Dresden (Fachklasse Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Wandmalerei und Architekturfarbigkeit) stellten Ergebnisse ihrer Seminararbeiten zum Thema Heißkalk vor: „Experteninterviews zur Heißkalktechnik“ (A.-S. Laube) und „Rheologische Eigenschaften von Heißkalk-Frischmörtel“ (S. Gschlecht). Nach der Mittagspause beendeten eine halbstündige Einführung in Arbeitsschutzfragen beim Arbeiten mit Heißkalk sowie eine sicherheitstechnische Belehrung der Teilnehmer den theoretischen Teil.

Am Nachmittag (14 bis 17 Uhr) erfolgten dann in den Atelierräumen der Fachklasse Wandmalerei und Architekturfarbigkeit der HfBK Dresden die praktischen Demonstrationen (A. Fenzke, mit Unterstützung von T. Schmidt und T. Köberle) mit der Möglichkeit für Teilnehmer, selbst Heißkalk zu verarbeiten, die gern angenommen wurde. Im Mittelpunkt standen Heißkalkmischungen zur Verfüllung und zum Verputz. Außerdem wurde im Hof der Hochschule das Trockenlöschen von Stückkalk im Haufwerk mit Sand von T. Köberle demonstriert, wobei sich die Teilnehmer an Hand der von Temperaturmessfühlern

gemessenen Werte im Haufwerk und der Dampfentwicklung von den dabei entstehenden hohen Temperaturen anschaulich überzeugen konnten.

Der Arbeitstag endete mit einem Grillabend, der von Studierenden der HfBK Dresden organisiert wurde und gute Möglichkeiten zum informellen fachlichen Austausch der Teilnehmer bot.

Am zweiten Tag wurden wiederum im Atelier der Fachklasse Wandmalerei und Architekturfarbigkeit Demonstrationen zur Vermauerung von Ziegelbögen und der Herstellung von Estrichen mit Heißkalk geboten. Besonders bei der abschließenden Herstellung und Verarbeitung von Heißkalk-Tünchen war wieder die Mitarbeit der Teilnehmer gefragt (9 bis 12 Uhr). Nach der Mittagspause erfolgte noch eine abschließende gemeinsame Besichtigung und Diskussion der im Verlauf des Workshops angelegten Musterflächen. Die Teilnehmer hatten in der Diskussion und durch ausgehändigte Fragebögen hier die Möglichkeit, ihre Eindrücke vom Workshop mitzuteilen. Der Workshop endete mit gemeinsamem Kaffeetrinken, das nochmals die Gelegenheit zum fachlichen Austausch bot.

Neun Fragebögen wurden zurückgegeben, das entspricht etwa 50%. Die Auswertung ergab folgendes Bild: Die Teilnehmer schätzten die Dauer von zwei Tagen für den Workshop zu 100 % als genau richtig und das Verhältnis von Theorie und Praxis – etwa ein Drittel zu zwei Drittel - als ausgewogen ein. Nach Meinung aller Umfrageteilnehmer wurden alle relevanten Einsatzgebiete der Heißkalktechnik behandelt. Die Erwartungen der Teilnehmer wurden überwiegend erfüllt, 2 Teilnehmer hätten sich noch mehr Möglichkeiten zum selbst Üben gewünscht. Alle Teilnehmer sahen in Zukunft Optionen, die Heißkalktechnik selbst für ausgewählte Fälle einzusetzen bzw. als Planer zu empfehlen, insbesondere als Putzmörtel für höhere Schichtstärken, als Fugen- und Verfüllmörtel und zur Rissbehandlung in der Mauerwerkstechnik.

In über die vorgegebenen Fragen hinausgehenden mündlichen und schriftlichen Kommentaren wurde der Bedarf geäußert, mehr Workshops für Handwerker durchzuführen. Außerdem sollte die Forschung auf diesem Gebiet unbedingt fortgesetzt werden. Weiterhin wurden schriftlich fixierte, unverbindliche „Richtrezepturen“ zur Heißkalkbereitung gewünscht. Die Organisation des Workshops mit genug Raum für Fachgespräche in Kaffeepausen und am Grillabend wurde positiv erwähnt.

Das Gesamtbild der Bewertung war somit positiv und bestätigte im Wesentlichen die Struktur des erarbeiteten Formats. Der theoretische Teil wird zukünftig durch die Präsentation von Ergebnissen zur Materialforschung wie technische Kennwerte zu Festigkeiten, Wasseraufnahme, Porosität und Salzresistenz der Heißkalkmischungen angereichert werden. Diese lagen zum Zeitpunkt des zweiten Workshops noch nicht vollständig und in präsentationsfähiger Form vor, weil einige der im Herbst 2017 hergestellten Prüfkörper noch nicht die Anforderungen an die üblichen Lagerungsdauern bis zur Prüfung erfüllten bzw. Laboruntersuchungen noch in Arbeit waren. Mit ihrem Vorliegen wird eine naturwissenschaftliche Evaluierung der praktisch vorgestellten Heißkalkmörtel im theoretischen Teil des Workshops

das Programm ergänzen und Möglichkeiten und Grenzen der Heißkalkmörtel noch besser darstellen können.

Abschlusskolloquium am 21. und 22. 03. 2019 im Technischen Denkmal Ziegelei Hundisburg

Das Abschlusskolloquium entsprach nicht dem Workshop-Format, da eine weitaus größere Zahl an Teilnehmern angesprochen werden sollte. Es enthielt aber mit den theoretischen Fachbeiträgen und praktischen Demonstrationen Teile davon. Insbesondere der theoretische Teil konnte zum Abschlusskolloquium in Form der Vorträge der Projektteilnehmer in nochmals verbesserter und präziserer Form im Vergleich zum zweiten Workshop dargeboten werden. In den Beiträgen zur Evaluierung früherer Maßnahmen mit Heißkalk (M. Zötzl, 45 min. einschließlich Diskussion) und zu Ergebnissen der Materialuntersuchungen (T. Köberle, 45 min. einschließlich Diskussion) konnten nun vervollständigte Resultate vorgelegt und vorläufig abschließend interpretiert werden. Ergänzt durch die Praxisberichte von A. Fenzke (30 min.) und den Vortrag zur Arbeitssicherheit im Umgang mit Heißkalk (T. Köberle, 30 min.) werden diese Beiträge der Projektteilnehmer den Kern des theoretischen Teils in zukünftigen Workshops bilden. Neben den Vorträgen wurden den etwa 120 internationalen Teilnehmern aus Handwerk, Wissenschaft, Restaurierung und Fachplanung aber auch praktische Vorführungen geboten. Da die Teilnehmerzahl hoch war – mit so viel Interesse konnte bei der Planung nicht gerechnet werden – musste in zwei Gruppen geteilt werden. Während die eine Gruppe den Demonstrationen von A. Fenzke und T. Schmidt folgte, erhielt die andere Gruppe eine Führung durch die historische Ziegelei und konnte mit der Museums-Feldbahn eine Runde drehen. G. Srocke, der technische Berater der Ziegelei, führte die Verarbeitung von Hochbrandgips vor. Dieses nach historischen Vorbildern gebrannte Bindemittel aus Gips wird aktuell in Deutschland nur in Hundisburg hergestellt und vertrieben. Nicht unerwähnt bleiben soll, dass der erste Tag mit dem Entzünden eines Kalkofens abgeschlossen wurde, bevor es dann zum opulenten Büffet mit gegrilltem Wildschwein ging, bei dem der erste Tag mit Fachgesprächen ausklang.

3.1.1 Arbeitssicherheit

Im Umgang mit Kalkmörteln sind besondere Sicherheitsvorkehrungen unerlässlich. Der erste Schritt besteht darin, dass man sich die möglichen Gefahren bewusst macht und dies auch verschriftlich. Diese Gefährdungsbeurteilung muss vor jedem Arbeiten mit Branntkalk aufgestellt werden. Gesetzliche Grundlage ist §5 des Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG). Sie beinhaltet neben der Tätigkeit, nämlich dem Umgang mit Heißkalk, auch eine Auflistung der möglichen Gefahren, welche vom Arbeitsplatz und der Arbeitsplatzumgebung ausgehen. Es gibt keine verbindliche Regelung, wie die Gefährdungsbeurteilung aussehen muss, Hilfestellungen zur Formulierung können von der Homepage der Berufsgenossenschaft Bau bezogen werden. Die hier vorgestellte Gefährdungsbeurteilung, siehe Abbildung 4, wurde für den ersten Workshop in Kloster Buch unter Mithilfe der Mitarbeiter des Sachgebiets 4.6, Arbeitssicherheit der TU Dresden zusammengestellt. Sie soll lediglich als Möglichkeit

verstanden werden und ist keine rechtsverbindliche Grundlage. Außerdem muss sie an den gegebenen Einzelfall angepasst werden.



Gefährdungsbeurteilung zur Durchführung eines Workshops im Rahmen des Forschungsprojektes „Heißkalk“ mit Anlage von Musterflächen

Kurzbeschreibung:

Im Forschungsprojekt „Heißkalk“ sind zwei bis drei Workshops zur Vermittlung der historischen Heißkalktechnik geplant. Im Rahmen der Workshops werden Bauhandwerker, Restauratoren und Naturwissenschaftler in der Technik der warmen Verwendung von Kalkmörtel von zwei erfahrenen Restauratoren unterwiesen. Die Workshops dauern 2 Tage und es wird mit maximal 20 Personen gerechnet. Die Arbeiten finden im Freien statt, erste Lokalität des Workshops ist die Ruine von Kloster Buch im Muldetal.

Die am höchsten einzustufende Gefährdung:

- Verätzungen des Auges

Gefährdungsbeurteilung Arbeitsplatz / Arbeitsplatzumgebung

| | Gefahrenquelle | Gefährdungs-faktor ¹ | Risiko | Handlungsbedarf | Maßnahme |
|---|--|--|--------|-----------------|---|
| 1 | Ruine, Bruchsteinmauerwerk, herabfallende Steine | Mechanische Gefährdung – unkontrollierte bewegte Teile | hoch | ja | Sichtkontrolle der Mauerkrone, gegebenenfalls Sperrung von Mauerabschnitten oder Entfernen loser Steine |
| 2 | Unebener Untergrund, Stolpern | Mechanische Gefährdung | mittel | ja | Entfernen loser Steine, PSA |
| 3 | Zeckenbiss, FSME, Borreliose | Sonstige Gefährdung: Durch Tier | hoch | ja | PSA, Arbeitsschuhe, geschlossene Kleidung, liegt außerhalb FSME Risikogebiet ² |
| 4 | Erhöhte Sonneneinstrahlung | Gefährdung durch Arbeitsumgebung sbedingungen | mittel | ja | Schattenspende, Getränke, Hinweis zu Sonnenschutz in Einweisung |

¹ Nach: Gruber, Kittelmann, Mierdel (2008): Leitfaden für die Gefährdungsbeurteilung – Verlag Technik & Information e.k., Bochum

² http://dgk.de/fileadmin/user_upload/Gesundheit-bilder/FSME/FSME_Karte_2017_web-gr_rgb.jpg abgerufen am 08.06.2017

| | | | | | |
|---|--------------------|--|------|----|---|
| 5 | Ertrinken im Fluss | Gefährdung durch Arbeitsumgebungsbedingungen | hoch | ja | Arbeitsplatz vom Fluss entfernen, Hinweis an Kursteilnehmer |
|---|--------------------|--|------|----|---|

Gefährdungsbeurteilung Tätigkeit: Heißkalk-Verfahren

| | Gefahrenquelle | Gefährdungsfaktor ¹ | Risiko | Handlungsbedarf | Maßnahme |
|---|---|---|--------|-----------------|--|
| 1 | Löschen Brandkalk, Verarbeiten Mörtel | Gefahrstoff, Einatmen Staub | mittel | Ja | Arbeiten an frischer Luft durchführen, nur Eimerweise verarbeiten, Sicherheitsdatenblatt bereit halten |
| 2 | Löschen Brandkalk, Verarbeiten Mörtel | Gefahrstoff, Verätzen Haut | mittel | ja | PSA, Waschmöglichkeit, Hautpflegeplan |
| 3 | Löschen Brandkalk Verarbeiten Mörtel heiß | Thermische Gefährdung 60°C, Verbrühung Haut | mittel | ja | PSA, nur Eimerweise verarbeiten |
| 4 | Löschen Brandkalk, Verarbeiten Mörtel | Gefahrstoff, Verätzen Auge | Hoch | ja | PSA, nur Eimerweise verarbeiten |
| 5 | Arbeiten mit Mörtelrührer | Elektrische Gefährdung | Hoch | ja | Sichtkontrolle ob Geräte und Zuleitungen intakt sind |
| 6 | Arbeiten mit Mörtelrührer | Mechanische Gefährdung, ungeschützte bewegte Maschinenteile | mittel | ja | Bauartbedingter Schutz der Mörtelrührers, andere Teilnehmer fernhalten |
| 7 | Arbeiten mit Mörtelrührer | Gefährdung durch spezielle physikalische Einwirkungen: Lärm | gering | nein | Bauartbedingt geringe Lärmemission, kurze Laufzeit, Arbeit im Freien |
| 8 | Arbeiten Handwerkszeug | Mechanische Gefährdung | gering | nein | PSA, bereithalten Verbandskasten |

PSA: für den Workshop wird folgende Persönliche Schutzausrüstung (PSA) vorgesehen: Sicherheitsschuhe (mindestens S2), feste Arbeitskleidung (Lange Hose), Arbeitshandschuhe (Nitril), Korbbrille

Die PSA wird im Rahmen der Betriebsanweisung vorgestellt und von den Teilnehmern des Workshops eingefordert.

Mit folgenden Gefahrstoffen wird gearbeitet:

| Name | Signalwort | Piktogramme | H-Sätze | EUH-Sätze | P-Sätze |
|----------------------------------|------------|---|-------------------|-----------|--------------------------------------|
| Calciumoxid (gebrannter Kalk) | Gefahr |   | H315 H318 H335 | keine | P260_s P280 P305 351 338 |

H315 Verursacht Hautreizungen.

H318 Verursacht schwere Augenschäden.

H335 Kann die Atemwege reizen.

P260_s Staub / Rauch nicht einatmen.

P280 Schutzhandschuhe / Schutzkleidung / Augenschutz tragen.

P305+351+338 Bei Kontakt mit den Augen: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.

Bezeichnung der besonderen Gefahren (R-Sätze):

- R37: Reizt die Atemwege.
- R38: Verursacht Hautreizungen.
- R41: Verursacht schwere Augenschäden.

Sicherheitsratschläge (S-Sätze):

- S2: Darf nicht in die Hände von Kindern gelangen.
- S25: Augenkontakt vermeiden.
- S26: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser ausspülen.
- Sofort Arzt anrufen.
- S37: Schutzhandschuhe tragen.
- S39: Augenschutz/Gesichtsschutz tragen.

Sonstige Stoffe:

- Wasser
- Sand

Maßnahmen bei Verätzungen des Auges:

- Abnahme Korbbrille
- Sofortiges, langanhaltendes Spülen mit Wasser, Augenlider trotz Schmerzen öffnen, abschließendes Spülen mit NaCl-Lösung,
- Auge steril verbinden
- Aufsuchen der nächsten Klinik



Vorgehaltene Einrichtung zur ersten Hilfe:

- Verbandskasten nach DIN 13157
- Zwei Augenspülflaschen mit destilliertem Wasser (jeweils 0,6l)
- 10 l destilliertes Wasser zum Nachfüllen der Flaschen
- Liste von Augenärzten im näheren Umkreis, Anfahrtsskizze Klinik in Leisnig

Maßnahmen bei Verätzen der Atemwege:

- Aus Gefahrenbereich entfernen
- Aufsuchen der nächsten Klinik

Maßnahmen bei Verschlucken

- Sofort reichlich Flüssigkeit trinken zur Verdünnung
- Kein Erbrechen herbeiführen
- Aufsuchen der nächsten Klinik

Maßnahme bei Verätzungen der Haut:

- Entfernen der Kleidung
- Waschen der betroffenen Hautpartie mindestens 10 Minuten mit Wasser
- Aufsuchen der nächsten Klinik

Zusammengestellt am 13.06.2017 von Dipl.-Geol. T. Köberle

Dipl.-Geol. T. Köberle

Projektbearbeiter

Prof. Dr. H. Siedel

Projektleiter

Dipl.-Geol. T. Köberle thomas.koeberle@tu-dresden.de 0049 (0) 351-463 35341 4

Abb. 4: Vierseitige Gefährdungsbeurteilung die für den ersten Workshop in Kloster Buch erstellt wurde und als Vorlage für die Gefährdungsbeurteilungen der folgenden Workshops diente

Die Gefährdungsbeurteilung benennt zunächst die Gefahren, die vom Arbeitsplatz ausgehen und dann die Gefahren, die von der Tätigkeit entstehen können. Die fünf Spalten in den Tabellen benennen zunächst die Gefahrenquelle und im Detail den Gefährdungsfaktor. In der Spalte Risiko wird eine dreistufige Abschätzung des Risikos für die Ausführende Person von „Niedrig“ bis „Hoch“ vorgenommen. Im Falle von „Mittel“ und „Hoch“ ist jeweils ein Handlungsbedarf festzustellen und entsprechende Maßnahmen zur Minimierung des Risikos zu benennen.

Neben den Gefahren, welche vom Arbeitsplatz ausgehen, ist dem Umgang mit dem Gefahrstoff Calciumoxid (gebrannter Kalk) besondere Rechnung zu tragen. Branntkalk wird nach dem globalen harmonisierten System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien (GHS) mit Hinweisen zu Gefahren und Sicherheit versehen. Diese H- und P-Sätze (englisch H = hazard = Gefahr und P = precautionary = Vorsorge) sind auf jedem Sack Branntkalk abgedruckt und auch in den Sicherheitsdatenblättern des Herstellers erläutert. Sie sollen die möglichen Gefahren in kurzen Sätzen aufzeigen und direkte Vorsorgemaßnahmen benennen. Außerdem sind leichtverständliche Piktogramme auf den Gebinden angebracht, die vor Verätzung und Reizung warnen.

Nach Auswertung unterschiedlicher Sicherheitsdatenblätter von Branntkalk und eigenen Erfahrungen wurden für den Umgang mit Heißkalkmörteln folgende Empfehlungen zum Arbeitsschutz und zur Persönlichen Schutzausrüstung (PSA) zusammengestellt, siehe auch Gefährdungsbeurteilung Kloster Buch (Abbildung 4).

Die auf Baustellen übliche Arbeitskleidung mit Sicherheitsschuhen (Klasse S2) und fester Arbeitskleidung mit langer Hose und langärmeligem Hemd oder Shirt mit Bündchen wird vorausgesetzt. Zum Umgang mit Branntkalk wird im Besonderen Wert auf den Schutz der Haut durch die Verwendung von Arbeitshandschuhen aus Nitril (keine Lederhandschuhe) gelegt. Partikel filternde Halbmasken (P2), die Mund und Nase bedecken verhindern das Einatmen von Branntkalkstäuben. Zusätzlich wird empfohlen im Freien zu arbeiten oder zumindest für eine gute Belüftung zu sorgen. Als höchste Gefährdung wird eine Verletzung des Auges angesehen. Die Augen sind nur durch das Tragen einer Korbbrille ausreichend geschützt. Diese umschließt das Auge vollständig und verhindert vor allem ein Eindringen von aufstiebigem Branntkalkpulver. Das in der Heißkalktechnik verwendete Branntkalk Pulver (P1, feinsten Mahlgrad nach DIN EN 459-1) neigt gerade beim Umfüllen sehr leicht zum Aufstieben. Besonders während dieser Tätigkeit ist eine Korbbrille unerlässlich. Nachdem der Branntkalk im Mörtel gebunden ist, kann die Korbbrille gegen eine einfachere, seitlich offene Schutzbrille, die Spritzer in die Augen verhindert, ausgetauscht werden. Es hat sich in der Praxis gezeigt, dass ein längeres Tragen einer Korbbrille vor allem bei der schnellen Arbeitsweise in der Heißkalkverarbeitung sehr rasch beschlägt. Es wird empfohlen keine Kontaktlinsen zu tragen. Sollte trotz dieser Vorsichtsmaßnahme Branntkalk Pulver ins Auge gelangen, dann ist dieses sofort mit viel Flüssigkeit auszuwaschen. Dazu werden spezielle Augenwaschflaschen empfohlen und diese müssen auch bereitgehalten werden. Es ist jedoch wichtiger sofort zu handeln und mit dem Auswaschen zu beginnen, als zunächst nach der Augenwaschflasche zu suchen. Nach SCHRAGE (2016, S. 315) ist Leitungswasser, aber auch Sprudel, Cola, Bier und Milch opportun. Auf der Homepage der

Klinik für Augenheilkunde Dresden wird es folgendermaßen auf den Punkt gebracht: „*Lieber sofort mit Selterswasser, Blumenwasser oder abgekühltem Tee spülen, als später mit destilliertem sterilem Wasser*“. (<http://augen.uniklinikum-dresden.de>, abgerufen am 16.07.2019).

Für die Workshops und auch generell beim Umgang mit Branntkalk wird folgendes Set empfohlen, das in einer verschließbaren Box zu jeder Baustelleneinrichtung gehören sollte. In Abbildung 5 ist die Box mit ihrem Inhalt zu sehen. Sie ist leicht zu transportieren und mit dem Rettungszeichen „Erste Hilfe“ versehen.



Abb. 5:
Praxistaugliche Erste-Hilfe-Box die bei Arbeiten mit Heißkalk in der Nähe des Arbeitsplatzes bereitgestellt wird

Die Box wird in unmittelbarer Nähe des Arbeitsplatzes aufgestellt. Sie beinhaltet zwei Augenwaschflaschen mit jeweils 600 ml Inhalt und idealerweise auch einen Kanister mit destilliertem Wasser zum Reinigen der Hände und des Gesichts. Es wurde darauf geachtet Augenwaschflaschen auszuwählen, die mit einem Schraubverschluss versehen sind. Diese können im Notfall auch wieder befüllt werden, sind nach Gebrauch aber zu entsorgen. Daneben werden in der Box ein transportabler Verbandskasten und Seife sowie Hautschutz- und Pflegemittel bevorratet. Außerdem ein Ordner mit der Gefährdungsbeurteilung der aktuellen Baustelle, den Sicherheitsdatenblättern der verwendeten Produkte und ein Lageplan der nächsten Augenklinik mit Notfallnummern.

Die Notfallmaßnahmen sollten von den Ausführenden und den mitarbeitenden Kollegen geübt werden. Vor allem das Spülen der Augen erfordert ein starkes Überwinden des Augenreflexes. Das Auge muss gegen den Reflex mit der Hand geöffnet werden. Das

gestaltet sich unter den Bedingungen auf Baustellen, mit schmutzigen Fingern nicht einfach. Aus dem Grund wurden auch möglichst große Augenwaschflaschen gewählt, die neben dem Spülen der Augen auch ein Abspülen des Gesichtes und der Finger ermöglichen.

3.2 Materialuntersuchungen zur Ermittlung von Kennwerten

3.2.1 Untersuchungsmethoden

- **Ermittlung der Nasslöschkurve**

Die Nasslöschkurve zur Charakterisierung der Reaktionsfähigkeit von Branntkalken wurde nach dem in Abbildung 6 gezeigten Versuchsaufbau, beschrieben in DIN EN 459-2, bestimmt.

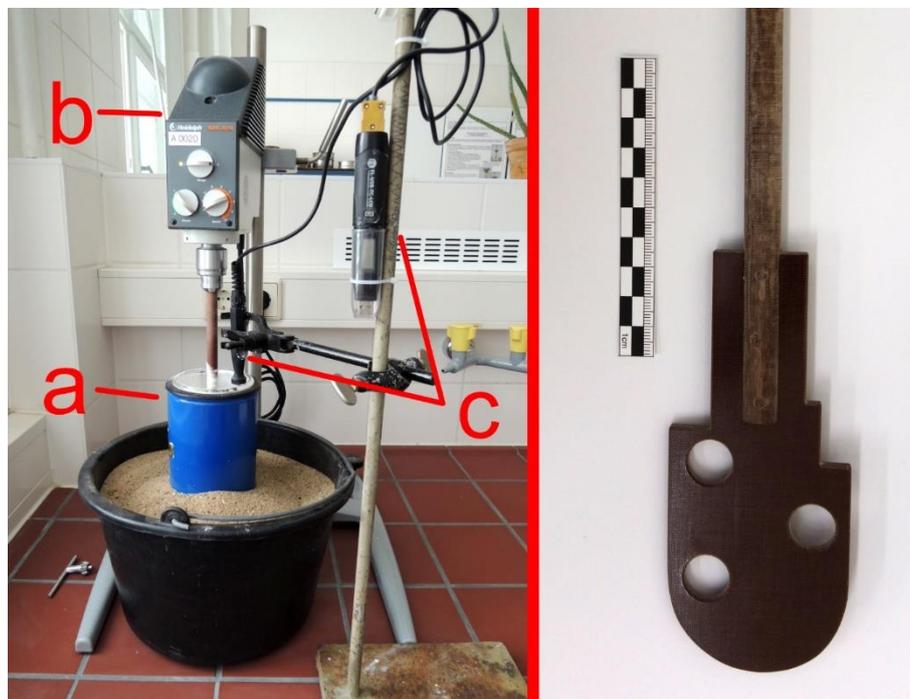


Abb. 6: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Nasslöschkurve. Links: Dewar-Gefäß (a), Rührgerät (b), und Thermologger mit Messsonde (c), rechts der genormte Blattrührer

Das Dewar-Gefäß mit einem Fassungsvermögen von 1000 ml wurde mit 600 ml demineralisiertem, 20°C warmem Wasser gefüllt. Damit das Dewar-Gefäß, welches im Verhältnis zur Höhe eine relativ geringe Grundfläche hat, nicht umkippt, wurde es in einen Eimer gestellt und mit Sand fixiert. Das Rührgerät (Heidolph RZR 2020), mit einem der Norm entsprechenden Blattrührer, wurde auf 300 U/min eingestellt. Die Temperatur ist mit einem Thermologger (EasyLog EL-USB-TC-LCD, K-Sonde) im Messintervall von einer Sekunde aufgezeichnet worden. Der Rührer wurde so eingestellt, dass sich die Spitze 7 mm über dem Boden des Dewar-Gefäßes befand, die Thermometerspitze ist 140 mm unterhalb des oberen Randes platziert worden. Nach Einschalten des Rührer und des Thermologgers wurde 150 g

des zu messenden Branntkalkes auf einmal in das Dewar-Gefäß gefüllt. Der Temperaturverlauf wurde anschließend gegen die Zeit in einem Diagramm aufgezeichnet.

- **Messen der Druckfestigkeit**

Druckfestigkeiten sind ein Maß für den Widerstand eines Stoffes gegen äußere Druckeinflüsse. Sie werden nach DIN EN 1015-11 bestimmt. Die Prüfmaschine (Zwick Z 1445, ZwickRoell GmbH & Co. KG / Ulm), mit einer 10 KN Kraftmessdose wurde aufgrund der zu erwartenden geringen Druckfestigkeiten, entgegen der Norm, nicht mit kontinuierlich steigender Belastungsgeschwindigkeit gefahren, sondern mit einer konstanten von 5 mm/min. In Abbildung 7 ist links der Messaufbau mit Prüfstempel, Kraftmessdose und eingelegter Probe zu sehen. Rechts erkennt man, dass das Bruchbild der Krafteinleitung über die quadratischen Druckplatten entspricht. Es kommt zu einem Sanduhrförmigen Bruch, die beiden Endstücke sind intakt.

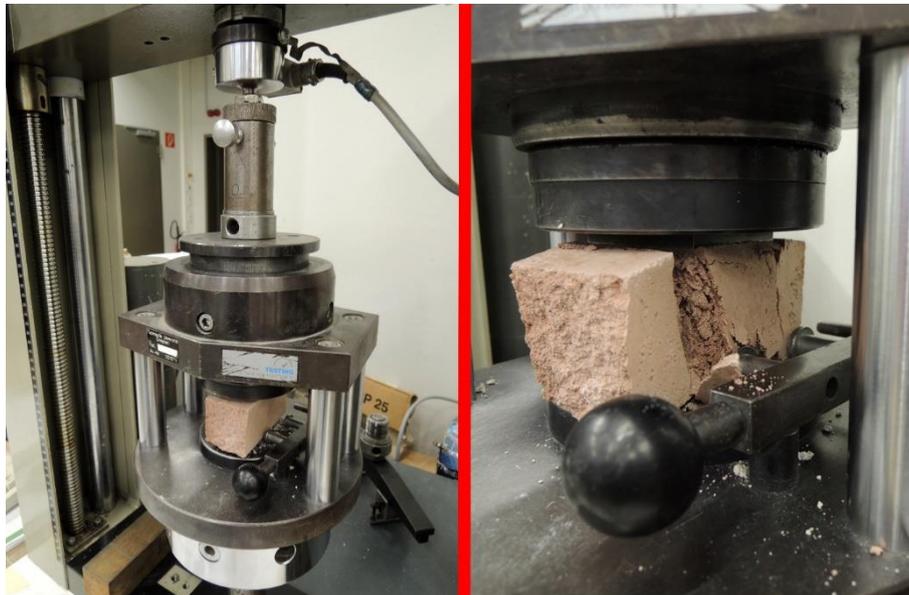


Abb. 7: Links Versuchsaufbau mit Kraftmessdose, Prüfwerkzeug und eingelegter Probe. Rechts ist die gebrochene Probe zu sehen

Die Messergebnisse in N bei Bruch der Probe wurden mit der in der Norm angegebenen Formel in N/mm^2 umgerechnet.

$$f_{dB} = \frac{F}{d1 * d2}$$

f_{dB} = Druckfestigkeit [N/mm^2]

F = gemessene Höchstlast [N]

d1 = Breite des Querschnitts [mm]

d2 = Breite des Druckstempels = 40 mm

Durchgeführt wurden die Messungen an der TU Dresden im Labor des Instituts für Baustoffe (Alfred-Hütter-Labor). Dem Institutsleiter Prof. Dr.-Ing. V. Mechtcherine sei an dieser Stelle für die Möglichkeit gedankt die Messung in seinem Institut durchführen zu können, ebenso dem Bautechniker K.-U. Mehlich für die Einrichtung der Prüfmaschine.

- **Wasserverlust durch Verdunsten**

Um den Wasserverlust durch Verdunsten zu messen, wurde eine Mischung H1, siehe Kapitel „3.2.3 Rezepturen“, mit den üblicherweise verwendeten Raumteilen angemacht und der Eimer auf einer Waage (Mineba intec GmbH, Combics 2, max. 150 Kg, Auflösung: 2 g) platziert. Die Waage erlaubt über ein Interface eine Aufzeichnung der Messwerte mit der Software labVIEW von National Instruments. Alle 10 Sekunden wurde das Gewicht aufgezeichnet. Dem Laboranten S. Gesellmann (Professur für Bodenmechanik und Grundbau, TU Dresden) sei an dieser Stelle für die Einrichtung der Mess- und Loggingeinheit gedankt. In Abbildung 8 ist der Versuchsaufbau zu sehen.

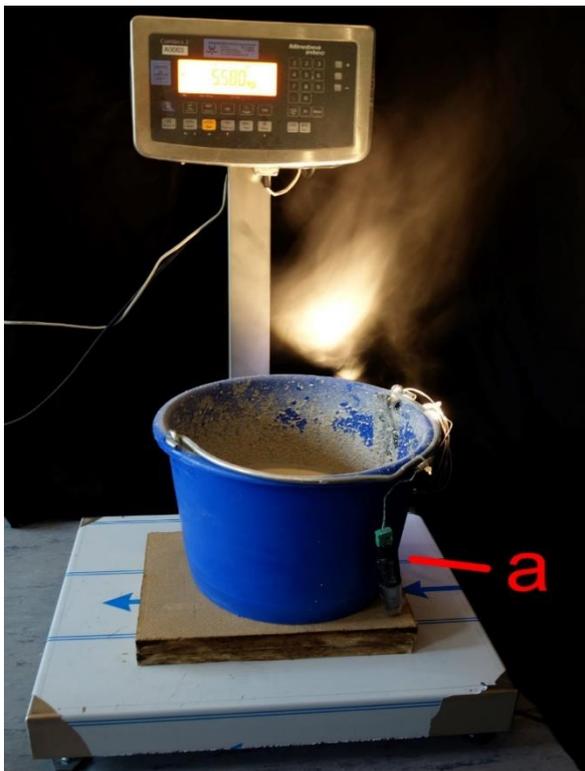


Abb. 8:
Versuchsaufbau zur Ermittlung der Wassermenge, welche durch Verdunsten verloren geht. Der Eimer mit der Mörtelmischung H1 steht zum Schutz der Waage auf einer Holzplatte. Der Thermologger hängt seitlich an dem Eimer (a)

Es wurde, gemäß der Rezeptur H1, 1160 ml Wasser zugegeben. Außerdem waren schon 136,3 ml Wasser in dem eigenfeuchten Zuschlag (5 RT eigenfeuchter Sand, mit 4,7 % Feuchtigkeit: $(580 \text{ ml} * 0,047) * 5$). Das ergibt eine Gesamtmasse von 1296,3 g. Nach dem Anmischen wurde der Mörtel im Eimer direkt auf die Waage gestellt und mit der Messung begonnen. Der Temperaturlogger (EasyLog EL-USB-TC-LCD, K-Sonde) wurde schon vor dem Mischen gestartet, der K-Fühler war mit einem Gewebekleid am Boden des Eimers fixiert. Die Gewichtsabnahme und der Temperaturverlauf wurden in Excel graphisch umgesetzt.

- **Messung von Schwinden und Quellen**

Die Verformung des Frischmörtels beim Ansteifen und Abbinden, das Schwinden oder Quellen, wurde mit einem Schwindkegel (Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH / Buchbach) gemessen. Die in Abbildung 9 dargestellte Messapparatur besteht aus einer Grundplatte mit Säule (1), einem trichterförmigen Prüfgutbehälter (2) und einem Laserdistanzmesser (3).

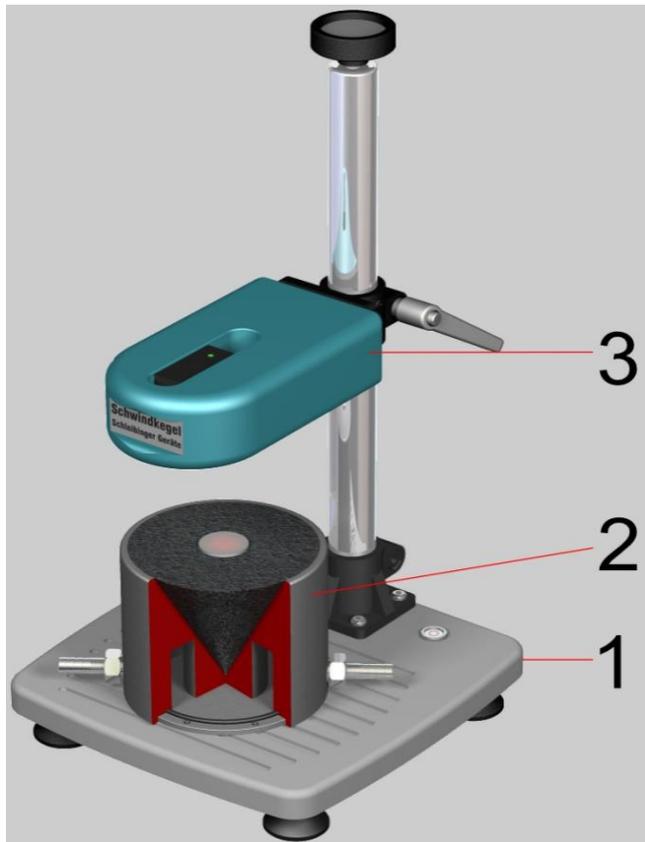


Abb. 9:
Messapparatur Schwindkegel (verändert nach:
http://www.schleibinger.com/cmsimple/images/schwindkegel_freigestellt.png,
abgerufen am 09.05.2019)

Der Prüfgutbehälter, mit einem Volumen von 349 cm^3 (bei einer Füllhöhe von 100 mm) wird mit Mörtel befüllt, schnell unter den Messarm gestellt und in den Messbereich justiert. Dieser beträgt 5 mm, vom Hersteller wird eine Auflösung von $0,3 \mu\text{m}$ angegeben. Der idealerweise angefahrte Nullpunkt liegt in der Mitte des Messbereichs, es sind demnach 2,5 mm nach oben und unten. Das Messintervall beträgt 10 Sekunden. Die Messung wurde nach 24 h abgebrochen und die vom Messgerät ausgegebenen *.txt Dateien in Excel ausgewertet. In einem ersten Schritt werden vom ersten Messwert die folgenden abgezogen. Am Vorzeichen des errechneten Wertes erkennt man ob es sich um ein Schwinden oder Quellen handelt. Ist das Vorzeichen positiv, dann war der zweite Wert kleiner als der erste und folglich expandiert der Kegel, der Abstand im Vergleich zur ersten Messung verringert sich. Die bereinigten Messwerte werden anschließend mit einem Faktor verrechnet, der die gemessenen Werte in mm/m umrechnet. Der Faktor F wird aus folgender Formel berechnet:

$$F = 1000/H_k$$

F = Umrechnungsfaktor zur Bestimmung der Längenänderung in [mm/m]

H_k = Höhe des Kegels [mm]

Die Längenänderung Δl ergibt sich aus dem Messwert multipliziert mit dem Faktor F

$$\Delta l = \text{Messwert} * F$$

Zur Auswertung wird Δl gegen die Zeit in Stunden aufgetragen.

Durchgeführt wurden die Messungen an der HTW Dresden im Labor der Fakultät Bauingenieurwesen. Prof. Dr.-Ing. S. Pfefferkorn sei an dieser Stelle für die Möglichkeit die Messung durchführen zu können gedankt, ebenso dem Leiter der VMPA-Betonprüfstelle, Dr.-Ing. T. Thiel für die Einrichtung des Prüfgeräts.

- **Untersuchungen zur Salzbeständigkeit**

Um die Salzbeständigkeit von Mörteln prüfen zu können wurden Prismen der Größe 4 x 4 x 16 cm in eine Magnesiumsulfatlösung gestellt welche aufgesaugt wurde und über die Oberfläche wieder verdunstete. Magnesiumsulfat wurde als Prüfsalz ausgewählt, weil es an Bauwerken in der Region Sachsen und auch an der historischen Musterwand für die Modellapplikation von Heißkalkmörteln in Kloster Buch neben Gips das wichtigste bauschädliche Salz darstellt. In Abbildung 10 sieht man den Versuchsaufbau mit einem Prisma in einer Kunststoffbox.

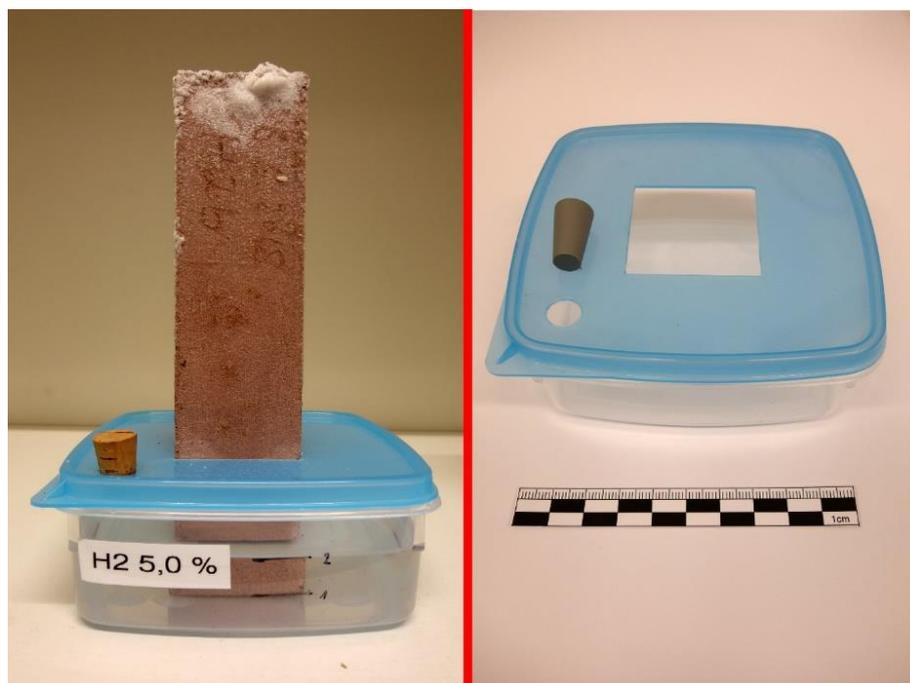


Abb. 10: Salzsprengtest durch Saugen. Links der Versuchsaufbau mit Prisma in der Salzlösung, rechts die Kunststoffbox mit ausgeschnittenem Grundriss für das Prisma und das Einfüllloch, mit Stopfen

Das Prisma steht in einer haushaltsüblichen Gefrierbox aus Polypropylen. Die Dose ist ca. 10 x 10 cm in der Grundfläche und 4 cm hoch. Das Fassungsvermögen ist mit 300 ml angegeben. In den Deckel der Dose wurde mittig eine quadratische Öffnung geschnitten, in die das Prisma passgenau eingesetzt wird. In eine Ecke wurde mit einem Loch Eisen eine Öffnung zum Einfüllen der Salzlösung ausgestanzt. Diese wird mit einem Gummistopfen

verschlossen. Die Prismen sind relativ maßhaltig, ebenso die ausgeschnittene Öffnung, es wurde aus diesem Grund darauf verzichtet, den dünnen Spalt ($\ll 1\text{mm}$) mit Silikon abzudichten. Auf der Dose wurden zwei Markierungen angebracht, die den Füllstand von 100 und 200 ml darstellen. Zu Beginn wurden die Dosen mit 200 ml Salzlösung gefüllt und dann das Prisma eingestellt. Nach einer Stunde wurde der gesunkene Flüssigkeitsstand wieder auf 200 ml aufgefüllt und die zugegebene Menge protokolliert. Im Laufe der Messung wurde immer wieder der Flüssigkeitsstand auf 200 ml ergänzt und die eingefüllte Menge protokolliert. Es wurde darauf geachtet, dass der Flüssigkeitsstand nicht unter 100 ml absank. Damit wurde gewährleistet, dass das Prisma immer zwischen einem und zwei Zentimeter in der Flüssigkeit steht. Zur Auswertung wurde die aufsummierte Flüssigkeitsmenge gegen die Zeit in Tagen graphisch dargestellt. Der Vorteil dieses Versuchsaufbaus wird darin gesehen, dass jedes Prisma in einer eigenen Box steht, die Flüssigkeitsaufnahme demnach für jedes einzelne Prisma zu ermitteln war. Außerdem können für jedes Prisma, welches vor Versuchsbeginn gewogen wurde, der Verlust durch Salzschäden leicht erkannt und evaluiert werden, da die herunterfallenden Fragmente auf dem blauen Deckel zu liegen kommen.

- **Quecksilberdruckporosimetrie**

Die Bestimmung der Porosität beziehungsweise des relativen Porenvolumens in Prozent wurde mittels Quecksilberdruckporosimetrie nach ISO 15901-1 an Bruchstücken von Prismen gemessen. Anteilig am Gesamtporenvolumen wurde das relative Porenvolumen eines jeweiligen Porengrößenbereichs ermittelt. Dafür wurden die Prismen verwendet, die nach 28 Tagen beziehungsweise 360 Tagen von den Messungen der Druckfestigkeit übrig geblieben waren. Mit einem Feinschleifgerät (Dremel 4000) mit Diamanttrennscheibe wurden Proben von der Oberfläche und vom Kern entnommen. Die Proben hatten etwa einen Durchmesser von 5-7mm. Es wurde darauf geachtet, dass die Proben nicht direkt von der Oberfläche genommen wurden um zu vermeiden, dass die verdichtete Schicht an der Schalung oder an der Oberseite des Prismas gemessen wurde. Mit der Diamanttrennscheibe konnte diese glatte Oberfläche leicht zurückgearbeitet werden. Es wurden jeweils von zwei unterschiedlichen Prismen Proben innen und außen genommen um Streuungen der Messwerte vergleichen zu können.

Die Messungen erfolgten mit einer Gerätekonfiguration bestehend aus den Quecksilberporosimetern PASCAL 140 (Druckbereich 0,013 MPa bis 0,3 MPa) und PASCAL 400 (Druckbereich 0,1 MPa bis 400 MPa. In dem sich dadurch ergebenden Gesamtdruckbereich von 0,013 MPa bis 400 MPa ist es möglich, Porengrößen (Durchmesser) im Bereich von 112 μm bis 3,5 nm zu erfassen (aus Prüfbericht Willomitzer vom 02.11.2018).

Durchgeführt wurden die Messungen an der TU Dresden im Labor des Instituts für Baustoffe (Labor für Gefügemorphologie) von Frau Dipl.-Ing. A. Willomitzer. Ihr sei an dieser Stelle für die Messung und Berichterstellung gedankt

- **Mikroskopie**

Zur Beurteilung des Mörtelgefüges wurden ausgewählte Proben mikroskopisch untersucht. Zunächst sind die Proben im Makro- und Mikromaßstab an Dünnschliffen mit dem Polarisationsmikroskop (PLM) analysiert worden und Bruchstücke der Mörtel im Rasterelektronenmikroskop (REM). Für die Untersuchungen mit dem PLM wurden polierte Dünnschliffe mit blau eingefärbtem Harz im Gießener Format hergestellt (Probenpräparation von T. Beckmann, Schwülper-Lagesbüttel). Die Proben wurden mit einem Leitz Orthoplan-Pol Mikroskop im Durchlicht Hellfeld in parallel polarisiertem Licht und unter gekreuzten Polarisatoren untersucht und die Ergebnisse mit einer Canon EOS 600D Kamera dokumentiert. Bildbearbeitung, Umwandlung in Falschfarben und Bildanalyse erfolgte mit Photoshop beziehungsweise Affinity Photo. Dabei werden einzelne Farbbereiche markiert, z.B. der blaue Farbbereich der Poren, und in eine deutlich abgrenzbare Falschfarbe konvertiert. Die Schwierigkeit der Bildauswertung liegt darin, geeignete Parameter zu finden, die das gesuchte Phänomen eingrenzen, weiterhin in der Nachbearbeitung zur Eliminierung von Artefakten. Dies wären zum Beispiel Poren in Komponenten (intra particle porosity) die nicht zum Porenraum des Mörtels zu zählen sind, und deshalb händisch abgegrenzt werden müssen (zu Grundlagen der Bildanalyse und –auswertung siehe HEILBRONNER & BERRET 2014). Zur Bildauswertung wird die Anzahl der Pixel einer Farbe in Verhältnis zur Pixelzahl der Gesamtfläche gesetzt.

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen konnten an der TU Dresden am Institut für Baustoffe an einem REM vom Typ QuantaTM FEG (FEI) mit energiedispersivem Röntgenspektroskop (EDX) durchgeführt werden. Die Untersuchungen wurden überwiegend im low-vacuum mode vorgenommen. Vor der Untersuchung wurden die Proben mit einer 5 nm dicken Goldschicht besputtert (Sputtercoater BAL-TECTM SCD005).

Dem Institutsleiter Prof. Dr.-Ing. V. Mechtcherine sei an dieser Stelle für die Möglichkeit gedankt die Analysen in seinem Institut durchführen zu können, ebenso Frau Dipl.-Ing. S. Hempel für die Einführung in die Bedienung des Rasterelektronenmikroskops und des Sputtercoaters.

- **Messung der kapillaren Wasseraufnahme**

Die Messung der kapillaren Wasseraufnahme erfolgte in Anlehnung an die DIN EN 1925. Diese ist eigentlich für die Prüfung von Naturstein aufgestellt, hat sich in der Prüfung von Mörtel aber ebenfalls bewährt. Mörtelprismen werden senkrecht in Wasser gestellt und sowohl die Gewichtsveränderung durch kapillare Wasseraufnahme als auch die Steighöhe in einem definierten Zeitraster erfasst. Die Prismen wurden vor Beginn der Messung an einer der quadratischen Kopfseiten mit einem Schleifpapier angeschliffen um die geglättete und verdichtete Oberfläche zu öffnen. Anschließend wurde die Grundfläche in mm², sowie das Anfangsgewicht in Gramm ermittelt. Der Prüfkörper wurde auf einem Kunststoffgitter in eine Box mit Wasser gestellt. Der Wasserspiegel wurde so eingestellt, dass die Probe 3±1 mm in das Wasser taucht. Der Versuch begann mit dem Einstellen der Probe ins Wasser, von

diesem Zeitpunkt an wurde die Zeit gemessen. Nach 60 Minuten wurde die Probe aus dem Wasser entnommen, vorsichtig mit einem feuchten Tuch abgetupft und zunächst die Saughöhe am Prisma gemessen und anschließend gewogen. Die Steighöhe war einigermaßen gleichmäßig, sie brauchte demnach nicht aus mehreren Messungen gemittelt werden. Sie ließ sich an der Farbvertiefung durch die Wassereinlagerung gut erkennen und wurde immer an der Oberseite des Prismas gemessen. Gemessen wurde vom Boden des Prismas in mm bis zur sichtbaren Grenze der Wasseraufnahme (Eindringfront).

In Abbildung 11 ist der Versuchsaufbau zu sehen. Es hat sich als günstig erwiesen eine größere Wanne als Tauchgefäß zu wählen, da der Wasserspiegel durch das große Volumen während der gesamten Messung innerhalb der geforderten 3 ± 1 mm bleibt.



Abb. 11: Versuchsaufbau Messung der kapillaren Wasseraufnahme

Es wurde zur Auswertung der kapillaren Wasseraufnahme nach 60 Minuten die Gewichtszunahme pro Fläche nach folgender Formel ermittelt:

$$KW_{60} = \frac{m_i - m_d}{A}$$

KW_{60} = Kapillare Wasseraufnahme nach 60 Minuten

m_i = Masse, gemessen nach definiertem Zeitintervall t [kg]

m_d = Anfangsmasse Prüfkörper [kg]

A = Fläche des Prüfprismas [m^2]

3.2.2 Zuschläge (Gesteinskörnungen) und Bindemittel

- **Vorbereitung Rohmaterialien**

- Abtrennen der Sandfraktion von Kies**

Aus Kies der Korngröße 0 – 8 mm wurde mit einer Siebmaschine (Retsch VS1000) der Sand und Feinkiesanteil mit einer Korngröße von 0 – 4 mm trocken abgesiebt. Der erdfeuchte Kies wurde zur leichteren Siebung vorher durch Ausbreiten auf einer Folie getrocknet. Nach DIN EN ISO 14688-1 setzt sich der Kornbereich von 0 – 4 mm aus Ton, Schluff, Sand und Feinkies zusammen. Der überwiegende Kornanteil liegt jedoch im Sandbereich (63 µm bis 2,0 mm), siehe „Sieblinien der Zuschläge“ in diesem Kapitel. Aus diesem Grund wird der Begriff Sand in dieser Arbeit weiter verwendet. Dies gilt analog für Ziegelsand und Bims.

- Einstellen einer homogenen Feuchte**

Alle drei Zuschläge werden mit ihrer Eigenfeuchte verarbeitet. Dies entspricht dem Vorgehen in der Praxis, wo der Sand, Bims und Ziegelsand im Freien gelagert werden. Die Eigenfeuchte besteht aus der Kernfeuchte in den Poren des Gesteins und aus der Oberflächenfeuchte auf und zwischen den einzelnen Körnern (WISCHERS & HALLAUER 1966, S. 89). Früher war hierfür auch der Begriff „erdfeucht“ oder „naturfeucht“ üblich (GRÜN 1927, S. 114; EICHLER 1955, S. 6). Die Eigenfeuchte lässt sich nicht definieren, sie ist eine Materialeigenschaft, die natürlichen Schwankungen unterworfen ist. Sie ist abhängig von der Kornzusammensetzung, den Korneigenschaften (dicht oder porös) und den Lagerungsverhältnissen der Substrate. Je nachdem wie das Klima auf sie einwirken konnte, wird sich die Eigenfeuchte verändern. Für die Versuchsmörtel sollte die Eigenfeuchte gleichbleibend eingestellt werden um konstante Mischungen zu erhalten. Für Sand und Bims war dies relativ leicht einzustellen, da diese bei Lieferung schon eine Eigenfeuchte hatten, die als Standard angenommen wurde. Der Ziegelsand wurde trocken in Säcken geliefert und musste zunächst befeuchtet werden. Dazu wurde dem trockenen Substrat in kleinen Portionen Wasser zugegeben und fortlaufend gemischt bis eine feuchte krümelige Konsistenz eingestellt war. Es wurde darauf geachtet, dass nicht zu viel Wasser beigegeben wurde, das Substrat sollte nicht nass, sondern lediglich feucht sein.

Um den Wassergehalt der Substrate zu bestimmen wurde nicht nach DIN EN 1097-5 verfahren. Nach der Norm hätten die Substrate bei $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ bis zur Massekonstanz getrocknet werden müssen. Dies erschien nicht praxistauglich, da die Substrate im großen Maßstab dann ebenfalls nach der Methode hätten getrocknet werden müssen. Aus dem Grund wurde von den Zuschlägen jeweils 1 kg auf einem Blech ausgebreitet und in der Versuchshalle bei $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$ und (55 ± 5) relative Feuchte bis zur Gewichtskonstanz (dasselbe Gewicht an zwei aufeinanderfolgenden Tagen, $\pm 0,5\text{g}$) getrocknet. Die Trocknung dauerte zwischen 3 und 5 Tage.

Für die drei Substrate ergab sich folgende Feuchtigkeit, siehe Tabelle 1

Tab. 1: Massen der Substrate vor und nach dem Trocknen und Gewichtsverlust durch Verdunsten des Wassers

| | Sand | Ziegelsand | Bims |
|---------------------------|-------|------------|-------|
| Einwaage M_1 [g] | 1000 | 1000 | 1000 |
| Auswaage M_3 [g] | 953,1 | 895,2 | 836,4 |
| Gewichtsverlust M_2 [g] | 46,9 | 104,8 | 163,6 |
| Wassergehalt [%] | 4,7 | 10,4 | 16,3 |

Der Wassergehalt wurde nach der Formel in DIN EN 1097-6 berechnet:

$$W = \frac{M_1 - M_3}{M_3} \times 100$$

W = Wassergehalt, in Prozent
 M_1 = Masse der Messprobe, in Gramm
 M_3 = die Trockenmasse der Messprobe bei Massenkonstanz, in Gramm

In Tabelle 2 ist die Wassermenge angegeben, die bei 10 kg Trockenmasse zugegeben werden muss um eine eigenfeuchte Mischung zu erhalten.

Tab. 2: Wassermenge, die zu 10 kg getrocknetem Substrat zugegeben werden muss um eine eigenfeuchte Mischung zu erhalten

| | Sand | Ziegelsand | Bims |
|--------------------|-------|------------|--------|
| Trockengewicht [g] | 10000 | 10000 | 10000 |
| Wasserzugabe [g] | 492,1 | 1170,7 | 1956,0 |

Berechnet wurde dies nach folgender Formel:

$$\text{Eigenfeuchte Mischung} = \frac{10\,000}{M_3} \times M_2$$

M_2 = Gewichtsverlust durch Trocknung, in Gramm
 M_3 = die Trockenmasse der Messprobe bei Massenkonstanz, in Gramm

Die eigenfeuchten Mischungen wurden mit Leitungswasser vorbereitet und in Kunststoff-eimern mit Deckel bis zum Gebrauch gelagert. Damit konnte eine immer gleichbleibende Feuchte der Substrate gewährleistet werden.

- **Charakterisierung der Zuschläge (Gesteinskörnungen)**

Sand

Für die Tests und Prüfkörper wurde Sand der Korngröße 0 – 4 mm verwendet, der im Labor aus 0/8 Kies mit einer Siebmaschine (Retsch VS1000) ausgesiebt wurde. Der Kies stammte aus dem KT Kieswerk Taubenheim GmbH bei Meißen und wird über die SBU Sandwerke Dresden GmbH vertrieben. Der Sand ist augenscheinlich dem historisch in Kloster Buch verwendeten Sand ähnlich. Es handelt sich um pleistozäne Ablagerungen mit überwiegend regional vorkommenden Gesteinsresten (v.a. Granit), aber auch Geschieben aus skandinavisch-baltischer Provenienz. Für die meisten Tests wurden Mörtelprismen mit den Abmessungen 4 x 4 x 16 cm verwendet. Gerade für die Messung der Druckfestigkeiten sollte das Größtkorn 4 mm nicht übersteigen, da es ansonsten durch Bildung von „Sollbruchstellen“ zu einer Verfälschung der Messergebnisse kommen könnte.

In Abbildung 12 ist ein Ausschnitt des überwiegend aus Quarzen bestehenden Sandes zu sehen.



Abb. 12:
Der im Projekt
verwendete Sand

Ziegelsand

Als Ziegelsand wurde ein industriell hergestelltes Produkt des Mahlwerks Ernst Letschert KG, verwendet. Der Ziegelsand wurde als 0-4 mm geliefert. Er wird aus Abfällen der keramischen Industrie gemahlen und vertrieben. Da die Zusammensetzung je nach Charge variieren kann, wurde eine, für alle Experimente ausreichende Menge, über A. Fenzke bezogen. Röntgenphasenanalysen (XRD) des Sandes (durchgeführt von H. Siedel) ergaben, dass der Ziegelsand einen hohen Anteil an Mullit enthält. Diese Phase ist für hoch gebrannte Ziegel typisch, es ist daher nicht mit einer hydraulischen Reaktion bei der Mörtelbereitung zu rechnen.

In Abbildung 13 ist ein Ausschnitt des Ziegelsandes zu sehen. Bemerkenswert ist der hohe Anteil an feinen Kornfraktionen



Abb. 13:
Ziegelsand mit hohem
Feinanteil

Bimssand

Der Bimssand stammt von der Firma Bisotherm aus Mühlheim-Kärlich. Das unter der Produktbezeichnung Bisorock vertriebene Granulat ist ein gewaschener und auf eine Korngröße von 0 bis 4 mm gesiebter Bims aus den tertiären Vulkanausbrüchen der Osteifel. Hier wird überwiegend Lacher See Tephra abgebaut (telefonische Auskunft von Bisotherm (14.08.2019). Diese letzte Haupteruptionsphase endete vor ca. 13 000 Jahren, ihre Zusammensetzung wird als phonolithisch beschrieben (MEYER 2013, S. 423 – 425). Umso überraschender war der hohe Quarzanteil der röntgenographisch nachgewiesen werden konnte (durchgeführt von H. Siedel). Der größte Teil des Bimses erscheint im Dünnschliff blasig-glasig, mit einer hohen offenen Intrapartikelporosität. Es kommen jedoch Quarze, Amphibole, Biotite und Sanidine vor. In Abbildung 14 ist der Bimssand zu sehen. Es fallen die gute Rundung und der hohe Anteil an größeren Partikeln auf.



Abb. 14:
Bimssand mit überwiegend
gut gerundeten Partikeln

Sieblinien der Zuschläge

Aus den eigenfeuchten Substraten wurden die für die unterschiedlichen Rezepturen benötigten Zuschläge nach Volumenanteilen gemischt und anschließend getrocknet um die Korngrößenverteilung durch Sieben ermitteln zu können. Das eigenfeuchte Mischen ist erforderlich, da die Schüttdichten von trockenem und feuchtem Substrat erheblich abweichen. Die Sieblinien des Sandes und der beiden Mischungen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

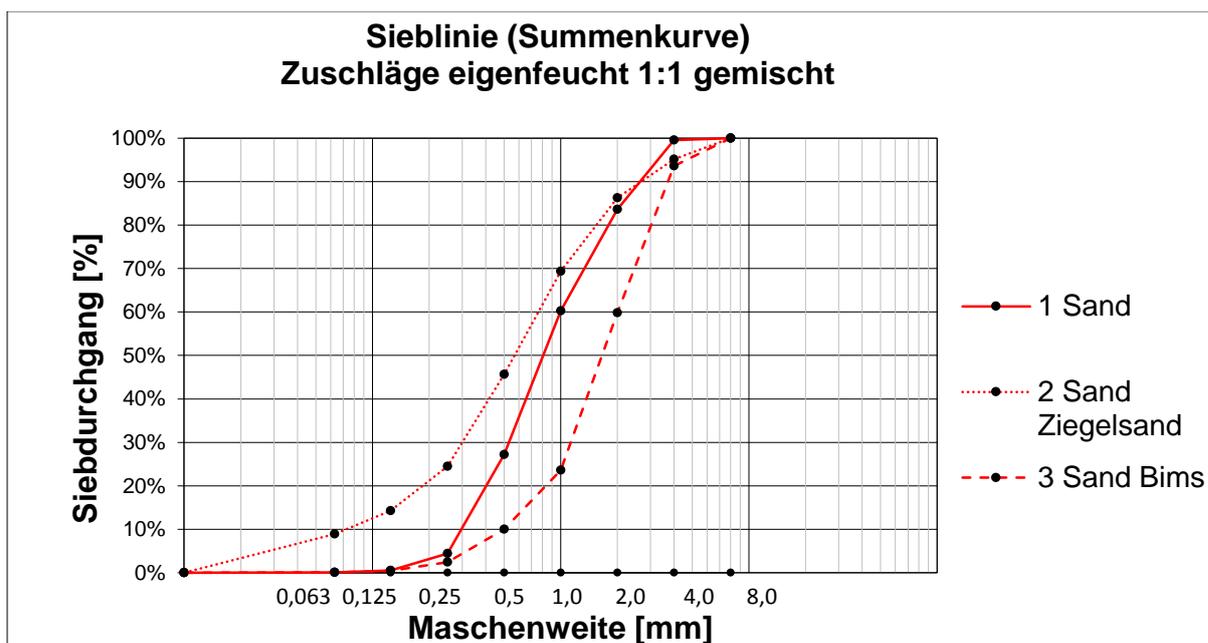


Abb 15: Sieblinien der Zuschläge Sand, sowie der Mischungen Sand-Ziegelsand und Sand-Bims

Die in der Mitte liegende Sieblinie des Sandes wird durch die Mischung mit Ziegelsand nach links in den feineren Bereich verschoben, durch Mischung mit Bims nach rechts in den gröbereren Bereich.

Schüttdichten der Zuschläge

Von den drei Zuschlägen und dem Kalk wurde die Schüttdichte bestimmt. Dazu wurde das jeweilige Substrat lose, unverdichtet, in einen Messzylinder gefüllt (Gewicht: 7322 g; Volumen: 1413,70 cm³) und eben mit einem Lineal abgezogen. Die Schüttdichten wurden aus fünf Messungen gemittelt. In der Tabelle 3 sind die Schüttdichten und die minimalen und maximalen Werte aufgeführt.

Tab. 3: Schüttdichten der Zuschläge im trockenen und feuchten Zustand

| | Substrat | Anmerkung | Durchschnittliche Dichte [g/cm ³] | ermittelter Wert minimal / maximal |
|---|------------|-----------|---|------------------------------------|
| 1 | Sand | Trocken | 1,60 | 1,60 / 1,61 |
| 2 | Sand | Feucht | 1,35 | 1,32 / 1,38 |
| 3 | Ziegelsand | Trocken | 1,50 | 1,50 / 1,51 |
| 4 | Ziegelsand | Feucht | 1,07 | 1,06 / 1,08 |
| 5 | Bims | Trocken | 0,85 | 0,84 / 0,87 |
| 6 | Bims | Feucht | 0,93 | 0,92 / 0,95 |

Auffällig sind die großen Abweichungen von trockenem zu feuchtem Substrat. Die trockenen Substrate scheinen sich beim Einfüllen von alleine dichter zu lagern. Dadurch wird eine höhere Dichte erreicht, obwohl bei den erdfeuchten Mischungen noch Wasser in den feinsten Poren enthalten ist.

- **Charakterisierung der Bindemittel**

Als Bindemittel wurde Branntkalk verwendet. Durch die Zusammenarbeit mit A. Fenzke wurde als Branntkalk ein Produkt von der SCHAEFER GmbH & Co. KG favorisiert, das von ihm bereits über viele Jahre als Bindemittel für Heißkalkmischungen in der Praxis eingesetzt worden ist. Ein Vorteil lag zudem darin, dass es von diesem Kalk unterschiedliche Körnungen gibt. Der Branntkalk konnte sowohl als Pulver, als auch als Granulat und in stückiger Form geliefert werden. Er wurde dem Projekt vom Verkaufsleiter der Firma SCHAEFER GmbH & Co. KG, Herr H.-G. Brendl kostenfrei als Muster zur Verfügung gestellt, dafür sei an dieser Stelle nochmals gedankt.

Alle drei beschriebenen Kalke stammen aus dem Werk Hahnstetten (Rhein-Lahn-Kreis, Rheinland Pfalz)

SCHAEFER-Precal 30S

Bei Precal 30S, der überwiegend eingesetzt wurde, handelt es sich um Pulverbranntkalk, der nach DIN EN 459-1:2010-12 als CL90 eingestuft wird und zu mehr als 90% aus CaO besteht. Die Reaktivität wird mit R5 charakterisiert, das bedeutet, dass beim Bestimmen der Nasslöschkurve nach DIN EN 459-2:2010-12 die 60°C Temperaturmarke nach höchstens 10 Minuten überschritten werden muss. Die Mahlfineinheit liegt bei P1 und damit sind 100% der Kalkpartikel kleiner als 2 mm, mehr als 95% kleiner als 0,2 mm und mehr als 85% kleiner als 0,09mm.

SCHAEFER-Precal 21S

Der Precal 21S ist ebenfalls als CL90Q (R5) charakterisiert, allerdings mit einer Korngröße zwischen 10 und 50 mm. Dieser stückige Branntkalk wurde für die trocken gelöschten Kalke verwendet, die kalt verarbeitet wurden (siehe Beschreibung Rezepturen und Trockenlöschen).

SCHAEFER-Precal 26N

Der Precal 26N entspricht auch der Kategorie CL90Q (R5), mit einer Korngröße von 3-13 mm. Dieser Branntkalk wird normalerweise nicht als Baukalk eingesetzt, sondern zur Düngung und Bodenverbesserung. Da Kalkgranulat jedoch in Großbritannien für Heißkalk bevorzugt wird („kibbled lime“) wurden mit dem Material auch einige Versuche unternommen. Ein Vorteil liegt darin, dass der Kalk nicht zum Aufstieben neigt. Die Staubentwicklung und damit das Risiko für Verätzungen sind mit dieser Art Kalk bedeutend geringer. Außerdem gelingt mit der granulierten Branntkalkfraktion auch die Herstellung von Kalkspatzen, wie sie für historische Mörtel typisch ist, was jedoch nicht im Umkehrschluss bedeutet, dass alle historische Kalkspatzenmörtel mit granuliertem Branntkalk in Heißkalktechnik ausgeführt wurden.

Die Schüttdichten der drei Kalke wurden genauso ermittelt wie die der Zuschläge, siehe Tabelle 4

Tab.4: Schüttdichten der drei verwendeten Kalke

| | Substrat | Anmerkung | Durchschnittliche Dichte [g/cm ³] | ermittelter Wert minimal / maximal |
|---|---------------------|----------------------|---|------------------------------------|
| 1 | SCHAEFER-Precal 30S | Pulver | 0,87 | 0,84 / 0,88 |
| 2 | SCHAEFER-Precal 26N | Granulat 3 – 13 mm | 0,90 | 0,88 / 0,92 |
| 3 | SCHAEFER-Precal 21S | Stückkalk 10 - 50 mm | 0,88 | 0,85 / 0,92 |

Die relativ großen Abweichungen der Minimal- und Maximalwerte bei dem stückigen SCHAEFER-Precal 21S sind dem kleinen Messgefäß mit nur 1,4 l Inhalt und der großen Korngrößenvarianz des Kalkes geschuldet.

Alle Kalke wurden sofort nach Lieferung in 30 l Eimer mit dicht verschließendem Deckel (AUER PACKAGING) aus Polypropylen umgefüllt. So lassen sich die Branntkalke auch längere Zeit ohne Verlust der Reaktivität lagern. Für den reaktivsten Kalk SCHAEFER-Precal 30S wurde im Abstand von über einem Jahr die Nasslöschkurve ermittelt. Es hat sich gezeigt, dass beide Kurven einen annähernd gleichen Verlauf haben, die Reaktivität demnach nicht gelitten hatte.

In Abbildung 16 erkennt man, dass der frischere Kalk etwas schneller reagiert und aus dem Grund der Temperaturanstieg steiler verläuft. Aber auch der gelagerte Kalk erreicht annähernd dieselbe Temperatur.

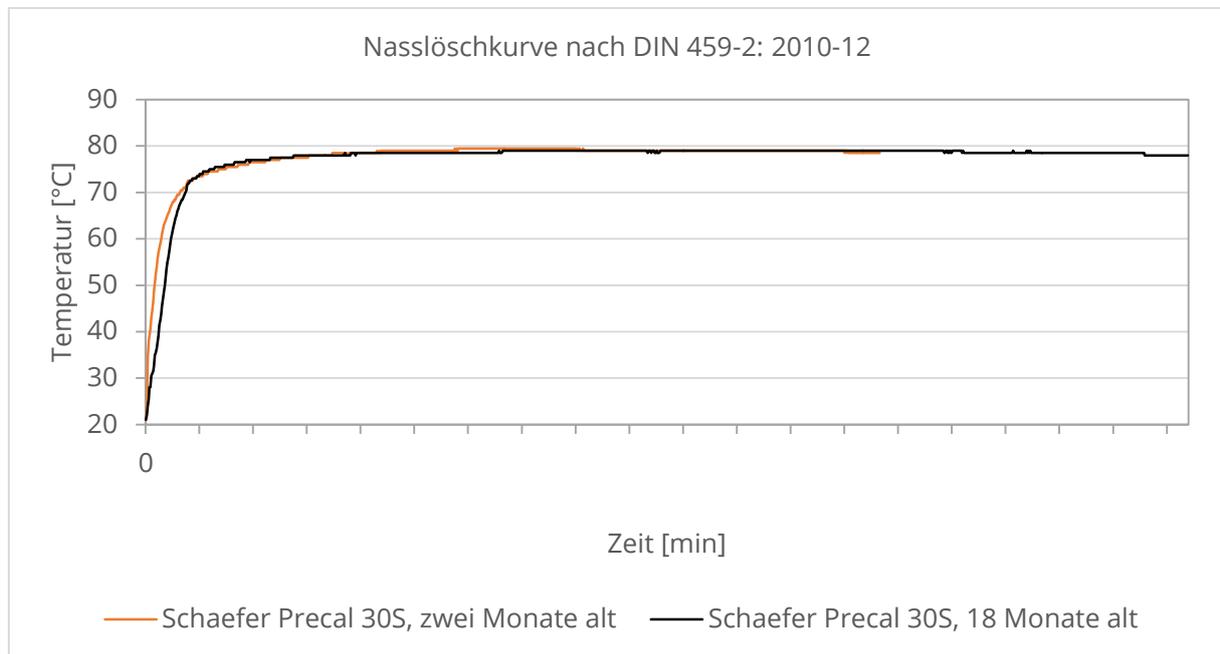


Abb. 16: Nasslöschkurven von unterschiedlich altem SCHAEFER-Precal 30S. Beide Kalke sind annähernd gleich reaktiv

Die Lagerung in verschließbaren Eimern hat sich somit bewährt und es ist von keinem Qualitäts- oder Reaktivitätsverlust des Branntkalkes durch eine Lagerung von bis zu einem Jahr auszugehen.

Bestimmung der Nasslöschkurve

Zur Charakterisierung der Reaktionsfähigkeit von Branntkalken wird nach DIN EN 459-2 die Nasslöschkurve bestimmt. Dabei wird die Temperaturerhöhung beim Löschen in Abhängigkeit von der Zeit erfasst. Je schneller die Temperatur bei konstanten Umgebungsbedingungen ansteigt, desto reaktiver ist der Kalk, desto schneller löscht er.

Die im Projekt eingesetzten Kalke entsprechen nach der DIN der Reaktivitätsklasse R5, das bedeutet, dass eine Temperatur von 60°C nach 10 Minuten erreicht ist. Dieses Zeitfenster (blau in Abbildung 17) erscheint recht groß und deckt verschiedene Kalkarten ab, die innerhalb der Reaktivitätsklasse jedoch noch erhebliche Unterschiede zeigen können. Im Vergleich mit anderen Kalken, die ebenfalls als R5 deklariert sind, ist der SCHAEFER-Kalke äußerst schnell. In Abbildung 17 ist eine Zusammenstellung von weiteren gemessenen Nasslöschkurven unterschiedlicher Kalke zu sehen.

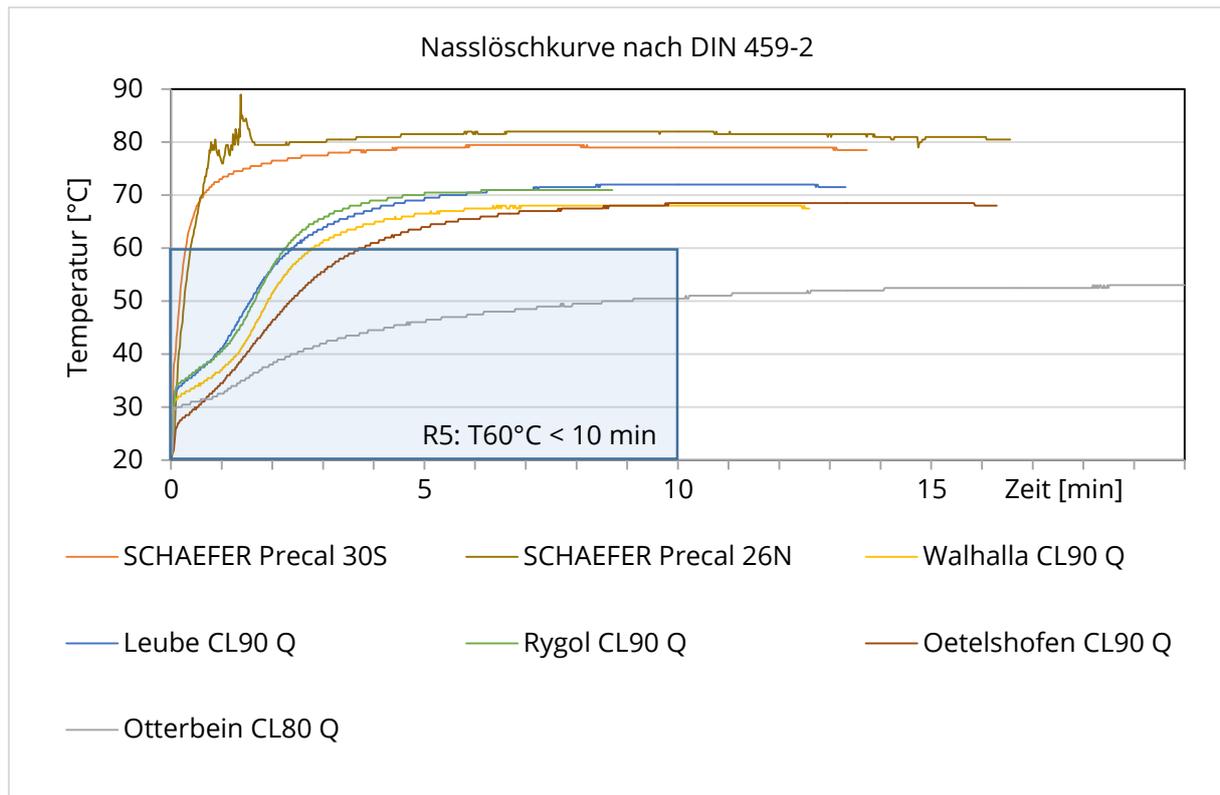


Abb. 17: Nasslöschkurven der im Projekt verwendeten SCHAEFER-Kalke. Daneben sind andere untersuchte Kalke dargestellt

Alle gemessenen Kalke liegen innerhalb dieser Anforderungen, außer der von Otterbein. Das ist nicht verwunderlich, da es sich bei diesem Produkt um einen CL80 handelt. Diese enthalten naturgemäß einen geringeren Anteil an CaO und sind somit reaktionsträger, ein Faktor, der nicht als negativ anzusehen ist. Für manche Anwendungen ist gerade diese Eigenschaft von Vorteil. Der SCHAEFER-Kalk Precal 30S zeigt mit Abstand die schnellste Reaktion. Die 60°C werden schon nach einigen Sekunden erreicht. Und nach einer Minute beginnt die Kurve schon wieder abzuflachen. Das bedeutet, dass zu der Zeit schon ein Großteil des Kalkes gelöscht ist. Im Hinblick auf ein Expandieren des Mörtels beim Übergang von CaO zu Ca(OH)₂ bedeutet das, dass beim Verarbeiten des Mörtels nach dem Anmischen kaum mehr mit Löschraktionen zu rechnen ist. Und damit kann auch ein beobachtetes Schwinden der Mischungen H1-H3 erklärt werden, siehe das Kapitel „Schwinden und Quellen“. Vergleicht man das mit Precal 26N, dem Kalkgranulat, dann erkennt man, dass hier nach einer Minute nochmals Reaktionen ablaufen. Warum es zur Ausbildung von mehreren Spitzen kommt ist bisher jedoch unklar. Eine Erklärung könnte sein, dass es beim Löschen der größeren Partikel durch Rissbildung zum Zerfallen und damit zur Freilegung wieder reaktiver Oberflächen kommt. Es muss aber auch erwähnt werden, dass nach der Norm dieser Kalk eigentlich nicht mit diesem Versuchsaufbau zu messen wäre, da er die erforderliche Voraussetzung der Feinheit (100% < 5 mm) nicht erfüllt. Beim Messen der Expansion konnte bei dieser Art von Kalk jedoch eine Volumenzunahme festgestellt werden. Das bedeutet, dass je nach Wahl des Kalkes unterschiedliche Eigenschaften des Mörtels erwartet werden können. Der SCHAEFER-Precal 30S reagiert sehr schnell, die Temperatur steigt rasch an und der Kalk wird auch in

kürzester Zeit vollständig gelöscht. Es kommt auch zu einem sehr schnellen Ansteifen des Mörtels. Wenn man jedoch ein Expandieren des Mörtels wünscht, dann wäre eine andere Sorte Kalk besser geeignet, die ein langsames Löschen zeigt und somit noch expandiert, wenn der Mörtel schon beispielsweise in einer Fuge verarbeitet ist. Es wären in Zukunft auch Mischungen unterschiedlicher Kalke denkbar, ein schnell reagierender, der zu einem raschen Temperaturanstieg beiträgt, kombiniert mit einem Kalk der auch nach einer gewissen Zeit noch zu einer Volumenzunahme führt.

- **Wasser**

Zum Anmachen der Mörtel wurde Leitungswasser verwendet. Da die Reaktivität beim Kalklösen auch sehr stark von der Wassertemperatur abhängt (SCHIELE & BERENS 1972, S. 259), wurde darauf geachtet, dass das Wasser immer eine Temperatur von $20,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ hatte. Dies ist vor allem bei der Bestimmung der Nasslöschkurve von Bedeutung. Aus dem Grund wurde sowohl Wasser im Kühlschrank mit einer niedrigeren Temperatur bevorratet, als auch in Fässern bei Raumtemperatur. Dadurch konnte die erforderliche Temperatur von $20,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ durch Mischen eingestellt werden.

Beim Bestimmen der Nasslöschkurve wurde ebenso verfahren. Allerdings wurde anstatt des in der DIN EN 459-2:2010-12 vorgeschriebenen destillierten Wassers demineralisiertes Wasser mit einer Leitfähigkeit von $\leq 2,0 \mu\text{S/cm}$ verwendet.

3.2.3 Rezepturen

Für das Projekt wurden drei Rezepturen verwendet, die nach den Vorgaben von A. Fenzke übernommen wurden. Diese haben sich in seiner handwerklichen Praxis als tauglich erwiesen, werden von ihm jedoch nach Bedarf modifiziert. Nach seinen Erfahrungen sind diese Grundmischungen für zahlreiche Aufgaben wie Mauern, Putzen, Fugenfüllen usw. einsetzbar. In Tabelle 5 sind die Mischungen zusammengefasst.

Tab. 5: Mörtelrezepturen für die Heißkalkmörtel (H) und für die trocken gelöschten Kalke (K) in Raumteilen (RT)

| Bezeichnung | | Branntkalk [RT] | Sand [RT] | Ziegel- sand [RT] | Bims- sand [RT] | Wasser [RT] |
|-------------|---------------------|--------------------|--------------|-------------------------|-----------------------|----------------|
| Heißkalk | Trocken gelöscht | | | | | |
| H1 | K1 | 1 | 5 | | | 2 |
| H2 | K2 | 1 | 2,5 | 2,5 | | 2 |
| H3 | K3 | 1 | 2,5 | | 2,5 | 2 |

Die Mischungen sind, wie auf der Baustelle üblich in Raumteilen (RT) und nicht nach Massenanteilen rezeptiert. Da für die Heißkalktechnik jeder Eimer einzeln angemacht und dieser dann sofort verarbeitet wird, hat es sich für das Projekt als praktikabel herausgestellt, die Massen mit Blechdosen von 580 ml abzumessen. Die dadurch erhaltene Mischung war ausreichend um Prüfkörper wie Mörtelprismen oder kleine Putzflächen herzustellen. Es sollten außerdem nicht zu kleine Volumen hergestellt werden um dem Vorgehen in der Praxis ähnlich zu bleiben. A. Fenzke verwendet als Maßeinheit Kunststoffbecher mit 1300 ml Inhalt.

3.2.4 Löschverfahren

Kalk zu löschen bedeutet chemisch gesehen die Überführung von Branntkalk (CaO) in Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) durch Aufnahme von Wasser (H₂O):

SCHIELE & BEHRENS (1972, S. 258): $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + 15,5 \text{ kcal}$

Dieser Vorgang ist mit einer Temperaturerhöhung verbunden, die Reaktion verläuft exotherm. Außerdem findet bei der Reaktion auch eine Volumenveränderung statt. Bei der Umsetzung von CaO zu Ca(OH)₂ kommt es ungefähr zu einer Verdopplung des Volumens (SCHIELE & BEHRENS 1972, S. 438), dies ist jedoch vom Kalk und den Brennbedingungen abhängig.

- **Heißkalktechnik**

Die Heißkalktechnik ist zunächst auch eine Variante Kalk zu löschen. Das Besondere daran ist, dass der Kalk während er löscht auch gleichzeitig schon verarbeitet wird. Sowohl die Temperatur- als auch Volumenzunahmen sind Bestandteil des Prozesses. Alle Ingredienzien werden gemischt, dann kommt das zum Löschen notwendige Wasser hinzu, es wird nochmals gemischt und der Mörtel sogleich verarbeitet. Wenn man der Definition von Heißkalktechnik nicht nur eine Zunahme der Temperatur zugrunde legt, sondern auch eine Volumenzunahme, dann muss die Verarbeitung während des Löschens und damit während der Volumenzunahme erfolgen. Es reicht dann nicht aus, dass der verarbeitete Mörtel nur warm ist, sondern dass die Temperatur nach dem Verarbeiten noch weiter steigt und somit der Kalk immer noch löscht und dadurch auch das Volumen noch zunimmt. Da es bis jetzt keine Definition gibt, die klar regelt was Heißkalk ist, bleibt der Aspekt mit der Volumenzunahme im verarbeiteten Mörtel zunächst als ein Gesichtspunkt erhalten, der im Heißkalk auch eine Rolle spielen kann, aber nicht zwangsläufig spielen muss. Wie man an den Nasslöschkurven sehen kann, ist es ohne weiteres möglich den Kalk heiß zu verarbeiten, es ist dadurch aber nicht gewährleistet, dass der Mörtel auch expandiert nachdem er schon appliziert wurde. Vielmehr kann es sein, dass der Löschprozess schon abgeschlossen war, der Mörtel aber immer noch eine große Hitze aufweist. In den Diskussionen mit den Spezialisten des ersten Workshops in Kloster Buch, konnte man sich auf eine minimale Temperatur von 40°C einigen, ab der man von Heißkalk spricht. Der Zeitpunkt des Löschens

und die damit einhergehende Volumenvergrößerung war zu dem Zeitpunkt nicht Gegenstand der Diskussion.

- **Trockenlöschen**

Zum Vergleich mit den Heißkalkmörteln wurden trocken gelöschte Kalkmörtel mit denselben Rezepturen verwendet. In Abbildung 18 sieht man den zerlegbaren Löschkasten aus Multiplexplatten (Buche, siebdruckbeschichtet, 20 mm), in dem der Branntkalk gelöscht wurde.



Abb. 18: Löschkasten mit drei Kammern, in dem der Vergleichsmörtel trocken gelöscht wurde

Der Kasten wird mit Spanngurten zusammengehalten und hat die inneren Maße von 60 x 30 x 40 cm (L x B x H). Der Löschkasten wurde mit zwei Multiplexplatten in drei gleich große Kammern getrennt (Birke, 10 mm). Zunächst wurde in den Kasten in jedes Fach 1,5 RT Sand eingefüllt. Dann kam 1 RT Branntkalk darauf und dieser wurde mit 1 RT Sand bedeckt. Gelöscht wurden die drei Fächer im Löschkasten durch langsames Zugeben von jeweils 2 RT Wasser. Bei der Löschreaktion kam es zu Spitzentemperaturen über 500°C. Der ursprünglich braune Sand hat sich im Kontakt mit dem löschenden Branntkalk deutlich rot verfärbt. Nach Abklingen der Reaktion wurde der Löschkasten mit einer Folie abgedeckt und für 4 Wochen stehen lassen. Damit sollte einem Verdunsten der Flüssigkeit entgegen gewirkt werden und es sollte sichergestellt werden, dass die Mischung erkalte und der Branntkalk vollständig gelöscht wurde.

Die in den drei Fächern gelöschten Kalk-Sandmischungen bildeten die Grundlage für die Mischungen K1-3. Für K1 wurden noch 2,5 RT Sand beigemischt, für K2 2,5 RT Ziegelsand und für K3 2,5 RT Bimssand. Die jeweiligen Mischungen wurden, wie die Heißkalkmischungen, mit dem Mörtelquirl an der Bohrmaschine gemischt. Es wurde kein Wasser

mehr zugegeben. Es hat sich gezeigt, dass mit dem Wassergehalt eine gut zu verarbeitende Masse entstanden war.

Für die Musterflächen in Kloster Buch wurde vor Ort ebenfalls eine größere Menge dieser Grundmischung trocken gelöscht. In Abbildung 19 ist der zweigeteilte Löschkasten zu sehen, in dem trocken gelöscht wurde. Es wurden hier ebenfalls 2,5 RT Sand, 1 RT Branntkalk und 2 RT Wasser verarbeitet und 6 Wochen unter Folie gelagert. Für die Musterflächen wurde jedoch ein anderer Sand verwendet, siehe Kapitel 3.3.5.1.



Abb. 19: Vorbereitung der trockengelöschten Grundmischung. Im hinteren Teil des Kastens ist das Haufwerk schon mit Sand bedeckt, im vorderen ist der stückige Branntkalk zu sehen

Nach dem Abdecken werden die beiden Haufwerke mit der notwendigen Menge Wasser übergossen und mit Folie abgedeckt.

3.2.5 Mischen der Mörtel

Zunächst wird die Zubereitung der Heißkalkmörtel beschrieben. In einen hitzebeständigen Eimer (Jopa®, 12 l) wurde die Hälfte der Gesteinskörnung eingefüllt und eine Mulde eingedrückt. In diese wurde Branntkalk gegeben und mit der zweiten Hälfte der Gesteinskörnung bedeckt und mit einem handelsüblichen Rührer für Bohrmaschinen trocken vorgerührt. Trocken bedeutet in diesem Fall, dass noch kein zusätzliches Anmachwasser hinzukam. Trotzdem kam es durch die erdfeuchten Zuschläge schon zu einer ersten Löschreaktion. Dieses trockene Vormischen bewirkte eine Homogenisierung von Gesteinskörnung und Branntkalk. Würde dies unterlassen, dann bestünde die Gefahr, dass sich bei Zugabe des Anmachwassers Klumpen von Bindemittel bildeten. Nach dem Vormischen

wurde das abgemessene Anmachwasser hinzugegeben und nochmals etwa 10 Sekunden mit hoher Drehzahl gerührt (2000 U/min). Da auf ein Raumteil Branntkalk 2 Raumteile Wasser verwendet wurden, entstand eine sehr flüssige Mischung, die sich leicht auch mit einem handelsüblichen Rührer in einer Bohrmaschine homogenisieren ließ. Auf die Verwendung von Labormischern (z.B. Hobart) wurde bewusst verzichtet, da sich die Herstellung von Prüfkörpern an der Baustellenpraxis orientieren sollte. Mit der relativ schnell drehenden Bohrmaschine ließ sich die Masse zudem sehr gefühlvoll und kontrolliert und vor allem schnell homogenisieren.

Die trocken gelöschten Mischungen wurden in analoger Weise, ebenfalls mit Bohrmaschine und Quirl, gemischt.

3.2.6 Herstellen der Prüfkörper

Nach dem Anmischen wurden die Mörtel für die entsprechenden Versuche eingesetzt. Beim Herstellen von Prüfprismen (4 x 4 x 16 cm, nach DIN EN 1015-11: 2007-05) wurden entweder Stahlprismenformen oder Formen aus Styropor verwendet. Erstere auf jeden Fall für die Heißkalkmörtel, die Styroporformen optional für die kalt verarbeiteten Mischungen. Beide Formtypen wurden mit einem Schaltrennmittel vorbehandelt. Das Trennmittel (MasterFinish RL310 von BASF) ist extra auch für beheizte Fertigung gedacht. Es hat sich jedoch gezeigt, dass trotz sorgfältigem Einstreichen der Schalung die Mörtelmasse immer wieder an der Wandung festhängt, ein Umstand, der auch mit anderen Schaltrennmitteln (Pieri® Cire LM 52, BASF RL 237) nicht behoben werden konnte. Dies deutet auf die von den Praktikern immer wieder erwähnte, gute Haftung der Heißkalkmörtel hin.

In den Prismenformen wurde zunächst versucht die Oberfläche offen, d.h. ohne Bindemittelanreicherung an der Oberfläche, zu gestalten. Dazu wurde der Mörtel mit einer kleinen Kelle portionsweise mit Schwung in die Form geworfen. Durch die teilweise sehr kurze Verarbeitungszeit hat sich dieses Verfahren als am praktikabelsten heraus gestellt. Rütteltische oder Verdichten durch Aufschlagen haben sich als nicht zweckdienlich herausgestellt. Der Mörtel sollte dann mit einem Überstand belassen werden, bis er so weit angesteift ist, dass er sich auf die richtige Höhe zurückkratzen lässt. Durch das Größtkorn von bis zu 4 mm wäre die Oberfläche durch eingedrückte Kratzer und Riefen aber nicht eben genug geworden. Aus dem Grund wurde entschieden die Oberfläche glatt mit einem geraden Stuckeisen abzuziehen. Die dabei entstehende Bindemittelanreicherung wurde in Kauf genommen.

Der Heißkalkmörtel ist die ersten vier Tage in der Schalung verblieben. Nach vier Tagen konnte die Schalung geöffnet werden und die Prismen verblieben anschließend bis zu den Tests in einem klimatisierten Raum (Klima: 20°C ± 2°C, 65% rel. Luftfeuchte, ± 5% nach DIN EN 1015-11: 2007-05). Ebenso wurde bei den kalt verarbeiteten Mörteln verfahren, allerdings konnten diese erst nach 7 Tagen aus der Form genommen werden, vorher war der Mörtel noch nicht fest genug. Wie in Abbildung 20 zu sehen ist, wurden die Prüfkörper auf Kunststoffgittern gelagert um einen allseitigen Zutritt von feuchter Luft zu gewährleisten.

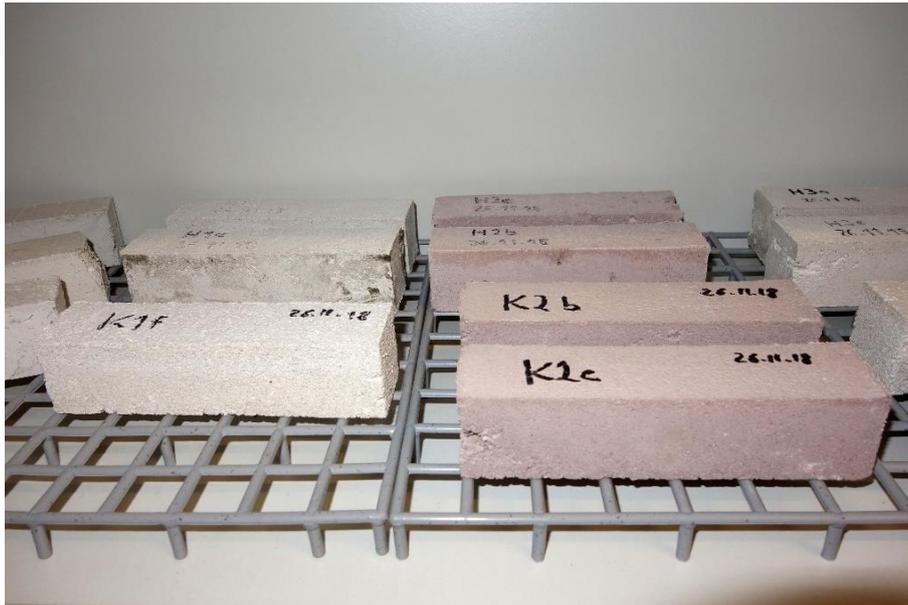


Abb. 20: Probenlagerung im Normklima auf Kunststoffgittern

3.2.7 Charakterisierung der Frischmörteleigenschaften

- **Wasserverlust durch Verdunsten**

Die heiße Verwendung von Mörtel führt dazu, dass ein Teil des Anmachwassers verdunstet, d.h. unterhalb der Siedegrenze in gasförmigen Zustand übergeht. Teilweise ist dieser Vorgang auch an einer Dampfbildung zu sehen. Bei dem hier umgangssprachlich verwendeten Begriff Dampf handelt es sich eigentlich um Nebel, einem parallelen Vorkommen von unsichtbarem Wasserdampf und Luft. Durch Abkühlen des Wasserdampfes kommt es zur Kondensation und Tröpfchenbildung, die dann als Nebel oder umgangssprachlich Dampf wahrgenommen werden. (WINDISCH 2017, S. 144 + 153). Die Menge des verdunsteten Wassers wurde gravimetrisch an einer Mischung H1 gemessen. In Abbildung 21 wurde die verdunstete Wassermenge in Gramm und die Temperaturentwicklung gegen die Zeit in Stunden aufgetragen.

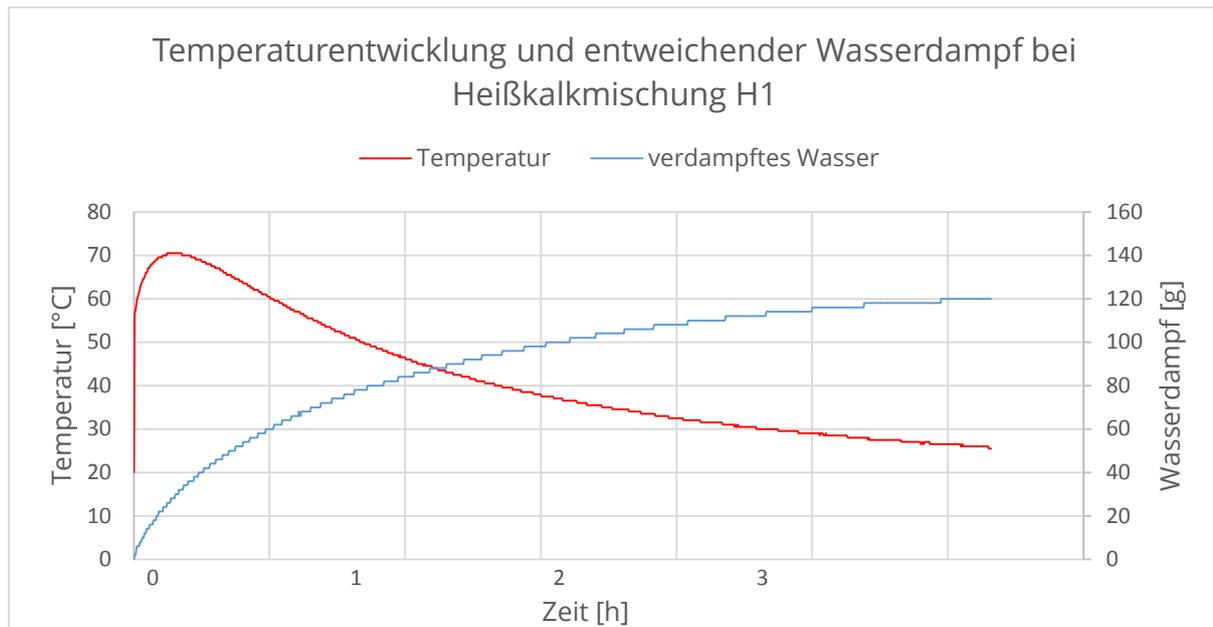


Abb. 21: Gewichtsverlust durch entweichender Wasserdampf [g] und Temperaturentwicklung [°C] im Verlauf der Zeit [h]

Erwartungsgemäß ist das Verdunsten zu Beginn des Versuchs, wenn die Temperatur sehr schnell ein Maximum von etwa 70°C erreicht, sehr hoch. Dies wird aus der Steigung der Kurve ersichtlich. In dem Maße wie die Temperatur fällt, geht auch der Gewichtsverlust durch Verdunsten wieder zurück. Nach etwa drei Stunden, die Temperatur ist auf unter 30°C gesunken, ist eine Nebelentwicklung nicht mehr zu beobachten.

Dieser Versuch zeigt, dass Verdunsten von Anmachwasser eine deutlich messbare Größe annimmt. 120 Gramm Wasserverlust nach 3 Stunden entsprechen in etwa 9,2 % der in Mischung H1 eingesetzten Wassermenge (1296,3 g). Dieser Wert ist jedoch nicht generell übertragbar, er gilt nur für diesen Versuchsaufbau. Hier wurde eine übliche Menge angemacht und sich selbst im Eimer überlassen. Normalerweise würde der Mörtel als beispielsweise Putz oder Fugenmörtel verarbeitet und dadurch dünner aufgebracht und durch die kühlere Umgebungstemperatur des Untergrunds auch schneller abgekühlt. In dem Eimer, bei einer Füllmenge von etwa 3 Liter bleibt die Temperatur über eine längere Zeit hoch. Trotzdem ist mit einem Wasserverlust durch Verdunsten auch in Fugen und Putzflächen zu rechnen. Dies kann bei der Verarbeitung auch immer wieder am entstehenden Nebel beobachtet werden, natürlich auch in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Nachdem die Temperatur des Mörtels die Umgebungstemperatur angenommen hat, geht das Austrocknen langsamer weiter.

Der Kurvenverlauf der Temperatur kann als charakteristisch für Heißkalkmörtel der im Projekt verwendeten Rezepturen angesehen werden. Alle drei Rezepturen, von H1 bis H3, zeigen einen vergleichbaren Kurvenverlauf mit einem schnell erreichten Maximum bei etwa 70°C und danach mit einem langsamen Abkühlen. Dies wurde in mehreren Versuchen bestätigt, da die Temperatur bei der Herstellung der Prüfkörper meist in der hier gezeigten Form mit aufgenommen wurde.

- **Schwinden und Quellen**

Das Schwinden oder Quellen eines Frischmörtels wird üblicherweise nach OENORM B 3329 in einer U-förmigen Schwindrinne gemessen. Diese 1000 mm lange Rinne ist an einem Ende geschlossen und am anderen Ende mit einem Wegaufnehmer versehen. Beim Quellen oder Schwinden des Mörtels während der Erstarrungsphase wird die Längenänderung in μm erfasst und aufgezeichnet. Aufgrund der schnellen Reaktionszeiten der Heißkalkmörtel war es jedoch nicht möglich, die Rinne normgerecht zu füllen.

Aus diesem Grund wurden als alternative Messungen mit einem Schwindkegel durchgeführt. Eingeführt wurde der Schwindkegel von EPPERS 2010 zur Messung des Schwindens von besonders leistungsfähigen Betonen. Der Schwindkegel erlaubt durch seine konische Form den direkten Vergleich von Längenänderung zu Volumenänderung. Nach EPPERS 2010 (S. 42) ist das Verhältnis von Kegelhöhe zu Kegelradius über den gesamten Schwindprozess gleich. Für die Messung von Dehnung oder Schwinden war im Falle des Heißkalks das einfache und schnelle Befüllen und sofortigen Messens ausschlaggebend für die Wahl dieser Methode.

In Abbildung 22 ist die Kurve der Längenänderung der Mischungen H1 bis H3 zu sehen.

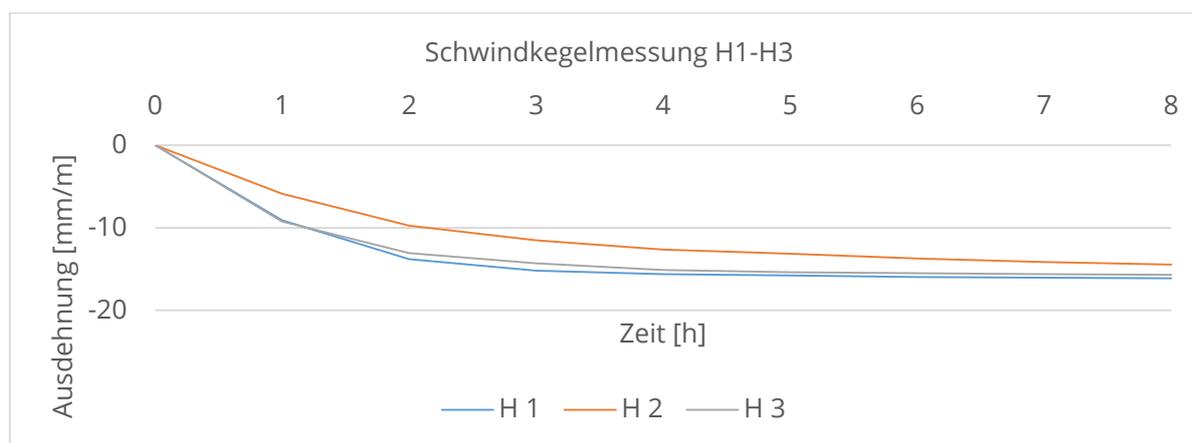


Abb. 22: Schwindkegelmessung an Mischung H1-3

Bei allen drei Mischungen kommt es, entgegen den Erwartungen, nicht zu einem Ausdehnen, sondern zu einem Schwinden. Dieses Schwinden war auch in anderen Anwendungen deutlich zu sehen, beispielsweise nach dem Aushärten der Mörtel in den Prismenformen. In Abbildung 23 erkennt man, dass es, vor allem an der linken Seite zu einem deutlichen Schwinden der Mischung H1 gekommen ist. Mit dem Risslineal wurde ein Wert von 1,6 mm ermittelt. Das würde einem Schwinden von 10 mm/m entsprechen.

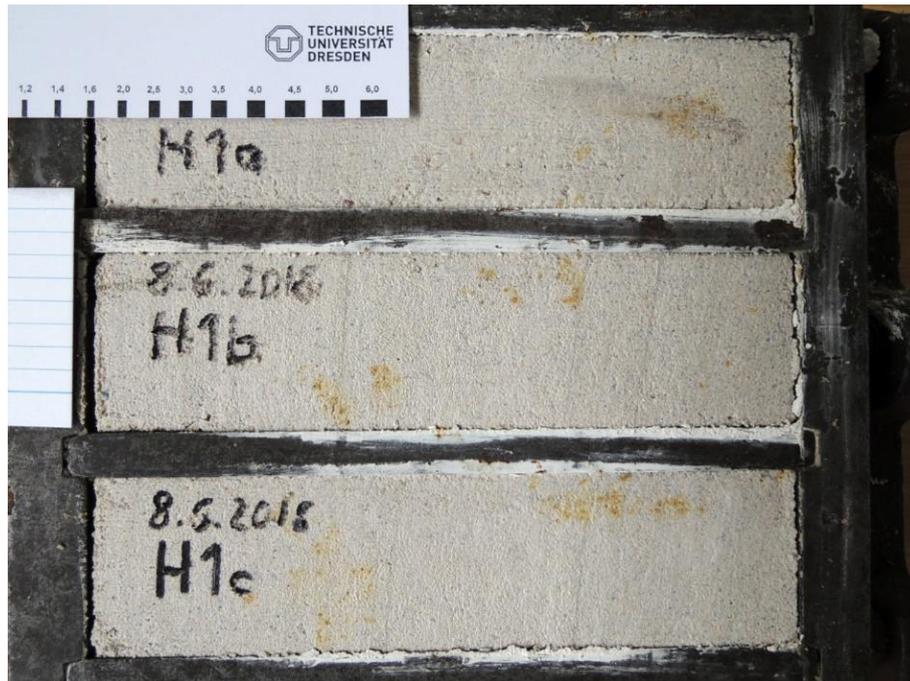


Abb. 23: Deutliches Schwinden der Mischung H1 beim Aushärten in einer Prismenform

Dieses Phänomen lässt sich anhand der Nasslöschkurve erklären. Vergleicht man die Nasslöschkurven der unterschiedlichen Kalke, dann fällt auf, dass der im Projekt verwendete SCHAEFER-Kalk-Precal 30S extrem schnell reagiert. Es ist demnach davon auszugehen, dass der Kalk schon gelöscht war, als der Mörtel in die Form eingebracht wurde. Außerdem muss in Erwägung gezogen werden, dass die Mischung mit etwa 2 RT $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nach der Volumenverdopplung beim Löschen von 1 RT CaO in Kombination mit 5 RT Zuschlag, relativ bindemittelreich ist. Diese beiden Faktoren könnten eine Erklärung für das Schwinden sein. Wenn man die Schwindkegelmessung von einem Mörtel, ausgeführt mit SCHAEFER-Precal 26N in Abbildung 24 betrachtet, dann erkennt man, dass hier eine Expansion stattgefunden hat. Der Löschvorgang ging demnach zumindest 15 Minuten lang kontinuierlich in der Kegelform weiter.

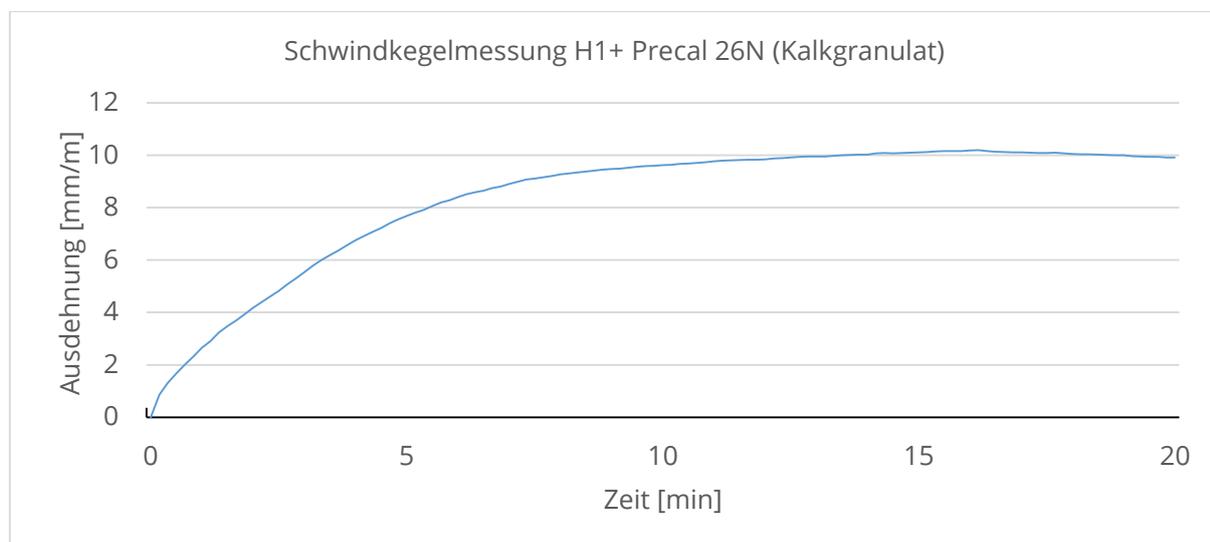


Abb. 24: Schwindkegelmessung von H1+. Hergestellt mit Precal 26N, einem Kalkgranulat

Aus diesen zwei Messungen lässt sich folgern, dass ein Expandieren des Mörtels möglich ist. Dies hängt sehr stark von der Reaktivität des Kalkes ab und ist vor Verwendung des Mörtels an Testmischungen zu prüfen. Als Formen für ein Testen in der Praxis haben sich kleine Kunststoffeimer mit einem Inhalt von etwa einem Liter als günstig erwiesen. Diese lassen sich nach dem Einfüllen oben glatt abziehen und ein Schwinden oder Expandieren kann ohne Hilfsmittel beobachtet werden. In Abbildung 25 ist das Beispiel eines Mörtels zu sehen, der mit einem Kalkgranulat der Kalkwerke H. Oetelshofen GmbH & Co. KG angefertigt wurde. Hier kam es zu einem extremen Expandieren.



Abb. 25:
Feldtest zur Beurteilung des
Expansionsverhaltens von
Heißkalkmörtel, hier an einem extremen
Beispiel bei der Verwendung eines
Kalkgranulats

Allerdings muss hier erwähnt werden, dass der Mörtel zwar mit derselben Menge Branntkalk angemacht wurde wie die Mischungen H1 bis H3, nämlich einem Raumteil, dass der Kalk aber zunächst so langsam reagierte, dass es nicht dazu gekommen ist, dass sich ein richtiger Mörtel ausbilden konnte. Das Kalkgranulat hat erst im kleinen Formeimer richtig zu löschen begonnen, vorher war es nur eine wässrige Sand-Granulat Mischung. Es wurde durch die Reaktion mehr oder weniger nur Sand verpresst. Dennoch zeigt dieser Versuch einerseits, dass man eventuell durch Kombination von schnellen und langsamen Branntkalken einen Mörtel einstellen kann, der nach der Applikation durch Nachreagieren expandiert. Außerdem kann man sehen, dass es durch die starke Expansion durchaus auch zur Schädigung von Mauerwerk oder Fugen kommen könnte. Branntkalk kann bei der Reaktion mit Wasser einen nicht zu unterschätzenden Druck aufbauen, vor allem wenn er allseitig umschlossen ist. Deswegen wird er auch als leises Sprengmittel zum Felslösen

eingesetzt (DACHROTH 1992, S. 56). Auch aus diesem Grund muss nochmals betont werden, dass Vorversuche mit den geplanten Mörtelmischungen unerlässlich sind.

3.2.8 Charakterisierung der Festmörtel Eigenschaften

- **Druckfestigkeit**

Die Druckfestigkeit wurde an Mörtelprismen der Abmessung 4 x 4 x 16 cm gemessen. Vorgesehen waren Messungen nach 7, 28, 90 und 360 Tagen. Es wurden von jeder Mörtelmischung drei Prismen gemessen und die Werte gemittelt. In Abbildung 26 erkennt man die zu einer Kurve verbundenen Messwerte.

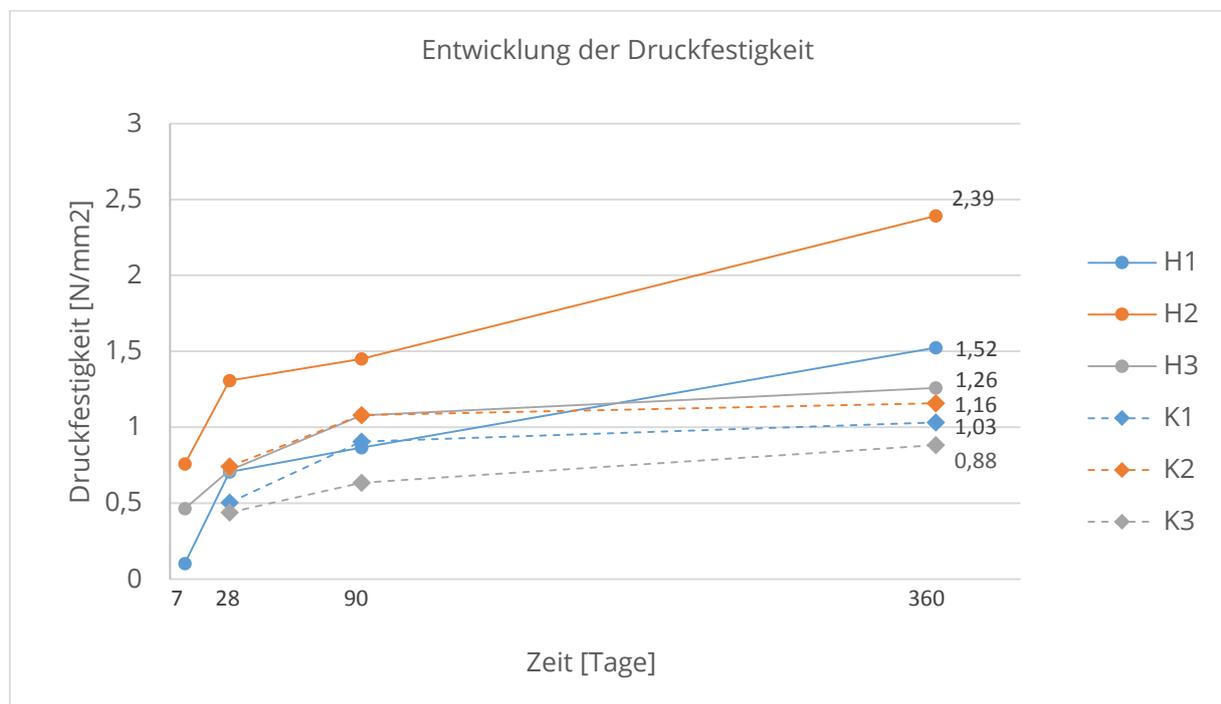


Abb. 26: Druckfestigkeitswerte der Mörtelmischungen H1 bis H3 und K1 bis K3

Zunächst fällt auf, dass die Messung der 7- Tage Festigkeit nur an den Heißkalkmischungen H1 bis H3 gemessen wurde. Der Grund liegt darin, dass die kalt verarbeiteten Mischungen K1 bis K3 erst nach 7 Tagen so fest waren, dass sie aus der Schalung genommen werden konnten. Die Mischungen H1 bis K3 wurden bereits nach vier Tagen aus der Schalung genommen und konnten am 7. Tag gemessen werden. Die erste Messung der kalt verarbeiteten Mörtel war demnach erst nach 28 Tagen möglich. Generell kann gesagt werden, dass die heiß verarbeiteten Mischungen immer eine höhere Druckfestigkeit aufwiesen als die entsprechenden kalt verarbeiteten. Damit lässt sich anhand dieser Messungen die von den Praktikern postulierte höhere Festigkeit der Heißkalkmörtel belegen. Ein Vergleich untereinander, also beispielsweise zwischen den Mischungen H1 bis H3 ist schwierig, da die Sieblinien der Zuschläge nicht gleich sind. Die größte Festigkeit nach 360 Tagen wird von der Mischung H2 mit 2,4 N/mm² erreicht. Mit fast 0,9 N/mm² hat die Mischung K3 im selben Zeitraum die geringste Festigkeit.

• **Untersuchungen zur Salzbeständigkeit**

Um die die Widerstandsfähigkeit der Mörtel gegen Salze zu prüfen wurden Mörtelprismen unterschiedlichen Rezepturen in einem Salzsprengtest geprüft. Die Prismen wurden 90 Tage nach ihrer Herstellung und anschließenden Lagerung im Normklima ($20\pm 1^\circ\text{C}$ / $65\pm 5\%$ relative Feuchte) geprüft. Als Salzlösung wurde eine 5,0 % Lösung (bezogen auf eine gesättigte Magnesiumsulfatlösung) gewählt. Magnesiumsalze sind in Sachsen häufig vorkommende Schadsalze, die in Verbindung mit Dolomitmörteln entstehen können (SIEDEL 2013). So lassen sich in Kloster Buch und der Klosterkirche Grimma erhöhte Gehalte an Magnesiumsulfat nachweisen (ZÖTZL 2018). Bei 20°C lösen sich 300 g/l MgSO_4 in Wasser (GESTIS Stoffdatenbank, abgerufen am 01.08.2019). 5,0 % bedeutet ein MgSO_4 -Gehalt von $15,0\text{ g/l}$. In Vorversuchen mit verschiedenen Salzkonzentrationen hatte sich dieser Gehalt als angemessen für einen auswertbaren Salzsprengtest an Mörtelprismen herausgestellt. In Abbildung 27 ist die Menge der über die Prüfkörperoberfläche verdunsteten Salzlösung über einen Zeitraum von 120 Tagen, etwas mehr als drei Monate, dargestellt.

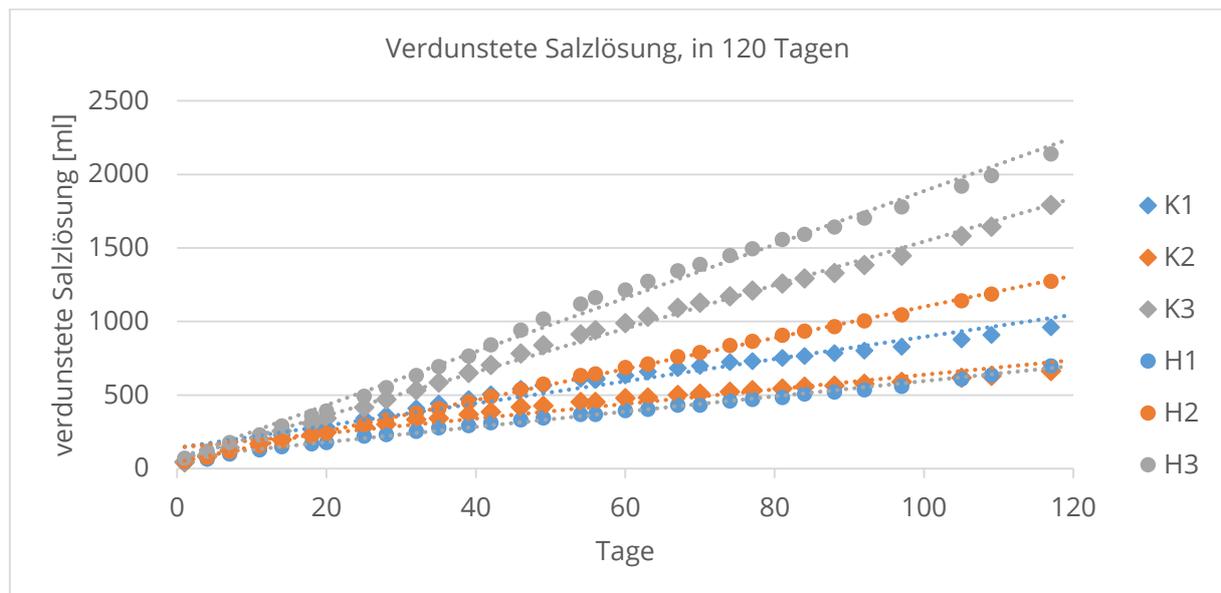


Abb. 27: Verdunstete Salzlösung in Gramm im Verlauf von 120 Tagen

In dem Diagramm erkennt man, dass die Verdunstung über 120 Tage bei allen sechs Prüfkörpern relativ linear verläuft. Es gibt Schwankungen um die Regressionsgerade (linear, gepunktete Linie), diese liegen aber im Rahmen der Messgenauigkeit. In dem konstanten Klima (20°C / 65%) ist die Verdunstungsrate demnach sehr gleichmäßig. Ein erwartetes Verstopfen von Poren durch Salzausfällungen kann nicht gesehen werden. Wenn man jeweils Heißkalkmörtel mit trockenem gelöschtem Mörtel derselben Rezeptur vergleicht, dann fällt auf, dass bei den Heißkalkmörteln im Laufe der Zeit mehr Lösung verdunstet ist als bei den kalt verarbeiteten, außer bei dem Mörtelpaar H1 und K1. Hier ist es genau umgekehrt. Der kalt verarbeitete Mörtel der Sandmischung verdunstet nach 120 Tagen ein Drittel mehr Lösung als der heiß verarbeitete (961 ml zu 700 ml). Dieses Phänomen ist momentan noch nicht zu erklären. Dass der heiß verarbeitete Mörtel H3 am meisten Wasser verdunstet

bestätigen die Vorversuche (KÖBERLE et al. 2019). In Tabelle 6 sind die durch die Verdunstung akkumulierten Mengen an Magnesiumsulfat zusammengefasst. Diese wurden aus den nachgefüllten Mengen an Magnesiumsulfatlösung berechnet.

Tab. 6: Summe der im Mörtel nach 120 Tagen angereicherten Mengen an Magnesiumsulfat durch das Verdunsten von Wasser

| Mörtelmischung | H1 | H2 | H3 | K1 | K2 | K3 |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Menge an MgSO ₄ [g] | 13,5 | 22,1 | 35,1 | 17,4 | 13,0 | 29,9 |

Auffällig ist die große Diskrepanz in der Mischung 2 mit Ziegelmehl. Es wurde erwartet, dass die heiß verarbeitete Mischung H2 mehr verdunstet, darum auch mehr Magnesiumsulfat zurück bleibt. Dass der Unterschied aber so groß ist, ist nicht zu erklären.

In der folgenden Abbildung 28 sind die 6 Prismen dokumentiert und man erkennt, wo es zur Salzausblühung und / oder zur Schädigung der Mörtel gekommen ist.

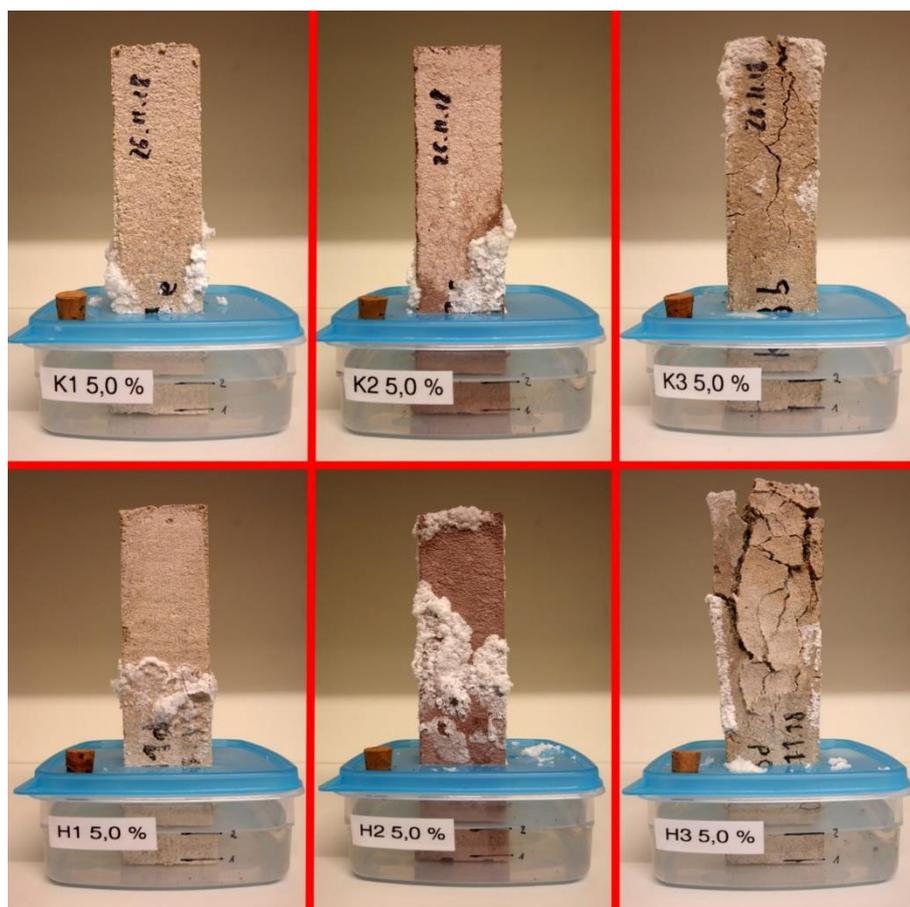


Abb. 28: Dokumentation der 6 Mörtelprismen nach 120 Tagen in der Magnesiumsulfatlösung

Nach 120 Tagen ist es an allen Prismen zu mehr oder minder deutlichen Salzausblühungen gekommen. Zur Schädigung des Mörtels kam es nur bei den Mischungen mit Bims, bei H3 und K3. Hier ist die Schädigung, vor allem bei H3, jedoch sehr gravierend. Die Prismen sind regelrecht zerrissen. Es ist nicht im Detail klar was zu dieser starken Rissbildung führt. Es

sind zwar Salzausfällungen an der Oberfläche des Prismas zu sehen, jedoch kaum in den Rissen. Ein hydrisches Quellen der Bimspartikel ist kaum vorstellbar, da in einem anderen Versuch, bei dem die Prismen jeden Tag in eine Salzlösung getaucht und dann wieder getrocknet werden, diese Schädigung nicht auftritt. Denkbar wäre eine bevorzugte Anreicherung der Salze in den porösen Bimspartikeln im Mörtel, die dann als „Treibkerne“ im gesamten Gefüge wirken, was auch das durchgehende Rissbild erklären würde. Dazu kommt eine geringere mechanische Festigkeit der Mischungen H3 und K3 im Vergleich zu den jeweiligen anderen untersuchten H- und K-Mischungen (vgl. Abbildung 26)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die untersuchten Heißkalkmörtel mit Ziegelsand oder Bims ein wenig mehr Wasser aufnehmen und abgeben als dieselben Rezepturen kalt verarbeitet. Damit einhergehend ist auch ein größerer „Entsalzungserfolg“, d.h. eine vermehrte Aufnahme von Schadsalz im Mörtel. Bei den Bimsmischungen muss man jedoch in Kauf nehmen, dass es zu einer extremen Schädigung des Mörtels kommt. Dieser wäre dann nur in Form eines immer wieder zu erneuernden Opfermaterials akzeptabel. Allerdings ist der Trocknungs- und damit einhergehend Entsalzungseffekt hier auch am höchsten.

- **Kapillare Wasseraufnahme**

Die kapillare Wasseraufnahme wurde an Prismenprüfkörpern sowohl nach 90 Tagen als auch nach 250 Tagen gemessen. Es wurden jeweils an Prismen der Mischungen H1 bis H3 und K1 bis K3 Messungen vorgenommen. Die Werte zwischen 90 und 250 Tagen haben sich nicht signifikant geändert beziehungsweise liegen die Änderungen innerhalb der Abweichungen der einzelnen Messungen. Aus diesem Grund wurden die Messungen zusammengefasst und der Mittelwert gebildet.

In Abbildung 29 sind die Werte der kapillaren Wasseraufnahme nach 60 Minuten zusammengefasst und gemittelt.

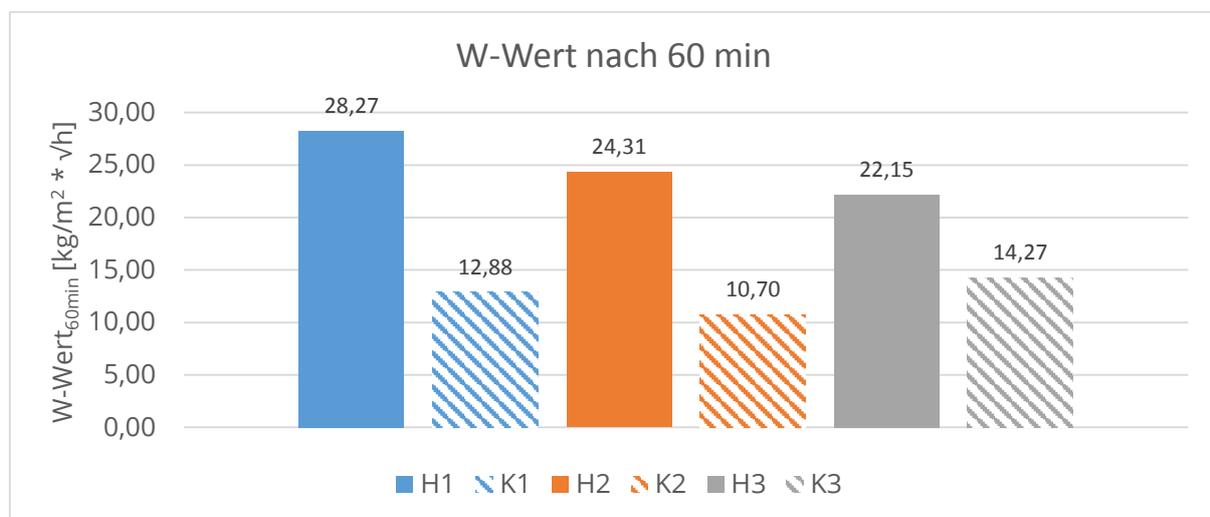


Abb. 29: Darstellung der Kapillaren Wasseraufnahme nach 60 Minuten

Es ist zu erkennen, dass die Heißkalke im Vergleich mit denselben kalt verarbeiteten Mischungen eine deutlich höhere Wasseraufnahme aufweisen. So zeigt beispielsweise die Mischung H1 nach 60 Minuten eine kapillare Wasseraufnahme von 28,27 Kg/m² im Gegensatz zu K1 mit 12,88 Kg/m². Dies zeigt sich auch an den Steighöhen des kapillar aufgenommenen Wassers, die in Tabelle 7 ebenfalls für 60 Minuten angegeben sind.

Tab. 7: Steighöhen des kapillar aufgenommenen Wassers an den Mörtelprismen nach 60 Minuten

| Rezeptur | H1 | K1 | H2 | K2 | H3 | K3 |
|----------------------------|-----|----|----|----|----|----|
| Steighöhe nach 60 min [mm] | 133 | 66 | 81 | 57 | 78 | 68 |

Vergleicht man die Mischungen untereinander, dann ist festzustellen, dass bei den heiß verarbeiteten Mischungen die Sandmischung H1 deutlich die höchste kapillare Wasseraufnahme aufweist, gefolgt von der Ziegelsand-Sandmischung H2 und abschließend die Bims-Sandmischung H3. Diese Reihenfolge ist bei den kalt verarbeiteten Mischungen nicht analog. Hier weist die Bims-Sandmischung K3 die höchste Wasseraufnahme auf, gefolgt von der Sandmischung und am Ende die Ziegelsand-Sandmischung. Diese unterschiedlichen Verhalten lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt nicht erklären, es kann aber festgestellt werden, dass die Heißkalke in allen drei Mischungen deutlich größere Wasseraufnahmewerte haben.

- **Charakterisierungen des Gefüges**

Vorbereitung der Proben

Untersuchungen am Gefüge der Mörtel sollten an Bruchstücken von Prismen erfolgen. Diese wurden angefertigt, siehe Kapitel 3.2.6, und dann im Normklima gelagert. Nach 7, 28, 90 und 360 Tagen wurden die Prismen auf ihre Druckfestigkeit hin geprüft und dadurch Bruchstücke erzeugt. Eine Gefügestörung durch das Prüfverfahren ist nicht zu erwarten, da die Kraft vom Prüfstempel aus zum Zentrum der Probe eingeleitet wird, der Bruch erfolgt auch dementsprechend in Form einer Sanduhr. Die vorderen und hinteren Enden der Probe sind für die Gefügeuntersuchungen ausreichend und geeignet.

Um ein weiteres Carbonatisieren und damit Veränderungen in der Mikrostruktur zu unterbinden wurde ein Teil der Proben 15 Minuten in Isopropanol gegeben um das Wasser zu entziehen. Danach wurden die Proben im Abzug für 12 h belassen um das Isopropanol durch Verdunsten zu entfernen. Abschließend kamen die Proben für 6 h bei 60°C in den Trockenschrank um ein vollständiges Entfeuchten zu gewährleisten. Die Proben wurden bis zu weiteren Messungen im Exsikkator über trockenem Silikagel gelagert (freundliche Mitteilung von Prof. K. Bayer, Litomysl 25.10.2017). Dieses Vorgehen wird nach einem Vergleich unterschiedlicher Methoden zum Stoppen der Hydratation von Zementmörtel auch von ZHANG & SCHERER (2011) empfohlen: „*Isopropanol exchange followed by ambient drying*“

is the best known method for preserving the microstructure with minimal effect on the composition of cement“.

Aus diesen Proben wurden Bruchstücke für die Untersuchungen mit Quecksilberdruckporosimetrie und dem Rasterelektronenmikroskop entnommen. Außerdem wurden daraus Dünnschliffe angefertigt.

Verteilung der Porendurchmesser mittels Quecksilberdruckporosimetrie

Die Messungen des relativen Porenvolumens mit der Quecksilberporosimetrie wurde an Proben der Mischung H1 und im Vergleich dazu an Mischungen K1 durchgeführt. Die Mischungen H2 und H3 bzw. K2 und K3 erschienen aufgrund der Zuschläge, Ziegelsand und Bims, die einen hohen Feinanteil, bzw. eine eigene Porosität mitbringen nicht geeignet um Vergleiche anstellen zu können. Die Proben wurden aus Mörtelprismen nach 28 bzw. nach 360 Tagen entnommen und die weitere Reaktion durch Behandlung mit Isopropanol gestoppt, siehe vorheriger Abschnitt: „Vorbereitung der Proben“.

Es wurden von den Mörtelprismen jeweils 2 Proben sowohl aus der Mitte als auch vom Rand entnommen. In Tabelle 8 sind die Probenbezeichnungen, die Entnahmestelle und die Gesamtporositäten [%] dargestellt.

Tab. 8: Proben der Quecksilberdruckporosimetrie nach ISO 15901-1 mit Probenbezeichnung, Lokalität und Alter der Proben

| Heißkalkmörtel H1 | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|
| Probenbezeichnung | 1 + 2 | 3 + 4 | 5 + 6 | 7 + 8 |
| Alter [d] | 360 | 360 | 28 | 28 |
| Lokalität | außen | innen | außen | innen |
| Gesamtporosität, Mittelwert aus beiden Messungen [%] | 25,85 | 26,48 | 27,06 | 29,59 |
| Trocken gelöschte Mörtel K1 | | | | |
| Probenbezeichnung | 11 + 12 | 13 + 14 | 15 + 16 | 17 + 18 |
| Alter [d] | 360 | 360 | 28 | 28 |
| Lokalität | außen | innen | außen | innen |
| Gesamtporosität, Mittelwert aus beiden Messungen [%] | 25,52 | 25,39 | 25,85 | 25,44 |

In der Abbildung 30 sind die Verteilungskurven der Porendurchmesser der Heißkalkmörtel, sowie die der trocken gelöschten und kalt verarbeiteten Mörtel zu sehen.

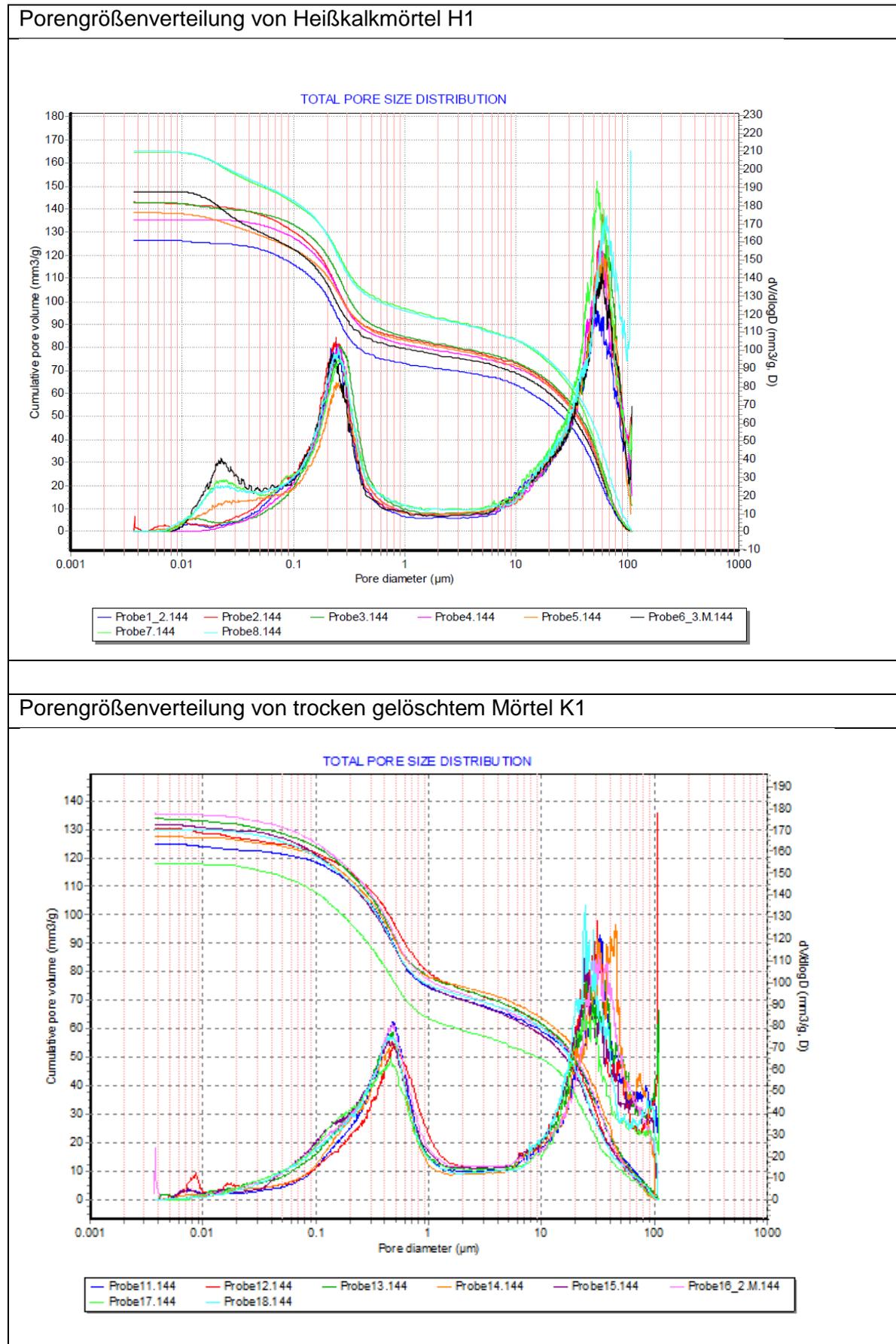


Abb. 30: Diagramme der Porengrößenverteilung, oben Heißkalkmörtel H1, unten trocken gelöschter Mörtel K1

Im Vergleich der beiden Diagramme fällt auf, dass beide Mörtel ausgeprägte Maxima in der Porengrößenverteilung aufweisen. Bei den Heißkalkmörteln sind es drei Maxima, bei den trocken gelöschten zwei. In der Tabelle 9 sind die Porengrößen der Maxima zusammengefasst.

Tab. 9: Maxima der Porengrößen (peaks) bei Heißkalkmörtel H1 und trocken gelöschtem Mörtel K1

| Maximum der Porengrößen (peaks) | 1 | 2 | 3 |
|---------------------------------|-------------|-----------|---------|
| Heißkalk H1 [µm] | 0,02 – 0,03 | 0,2 – 0,3 | 60 - 80 |
| Trocken gelöscht K1 [µm] | --- | 0,4 – 0,5 | 20 - 50 |

Bei den großen Poren (zwischen 10 und 100 µm) zeigen die Heißkalke eine auffällige Verteilung im Bereich von 60 – 80 µm, wohingegen in den trocken gelöschten eher kleinere Werte von 20 bis 50 µm vorkommen. Im Bereich zwischen 0,1 und 1 µm liegt das Maximum der Heißkalke zwischen 0,2 und 0,3 und das der trocken gelöschten zwischen 0,4 und 0,5 µm. Auffällig ist das erste Maximum, welches nur bei den Heißkalcken ausgeprägt erscheint zwischen 0,02 und 0,03 µm. Wenn man sich dieses Maximum genauer anschaut, dann stellt man fest, dass es bei den 28 Tage alten Proben stärker ausgeprägt ist als bei den Proben mit einem Alter von 360 Tagen. Ein Teil der Mikroporen verschwinden demnach im Zuge der Carbonatisierung. Generell kann festgestellt werden, dass sich die Porosität der Heißkalkmörtel im Zuge der Carbonatisierung stärker verändert als die der trocken gelöschten. Die Gesamtporositäten gehen bei den Proben sowohl außen als auch im Innern im Zuge der Carbonatisierung zurück, wohingegen sie bei den trocken gelöschten Mörteln annähernd konstant bleiben.

Mikroskopie

Polarisationsmikroskopie

An Dünnschliffen sollte das makroskopische Gefüge beurteilt werden. In Abbildung 31 und 32 ist jeweils eine Übersichtsaufnahme von einem Dünnschliff eines Heißkalkmörtels (Mischung H1) und eines kalt verarbeiteten, trocken gelöschten Kalkmörtels (Mischung K1) zu sehen.

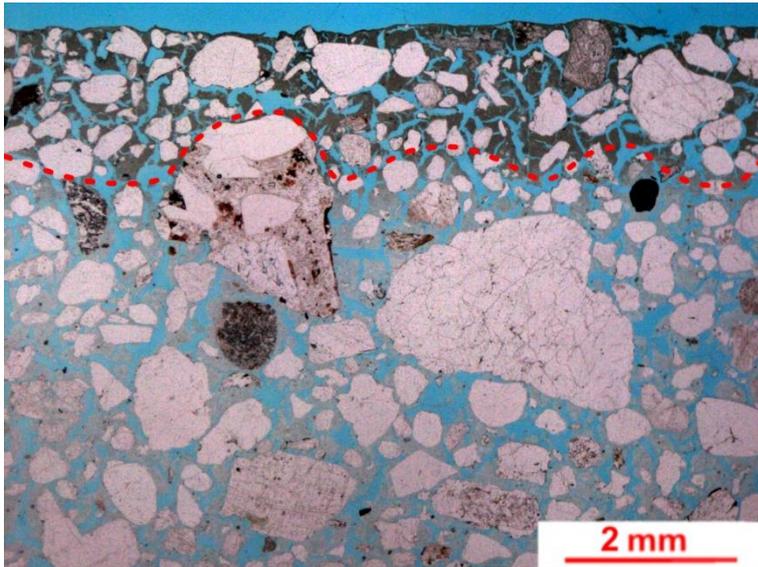


Abb. 31:
Ausschnitt aus einem Dünnschliff.
Mischung H1, die rote gestrichelte
Linie grenzt den carbonatisierten
Bereich (oben) vom nicht
carbonatisierten ab. Alter des
Prüfkörpers: 28 d

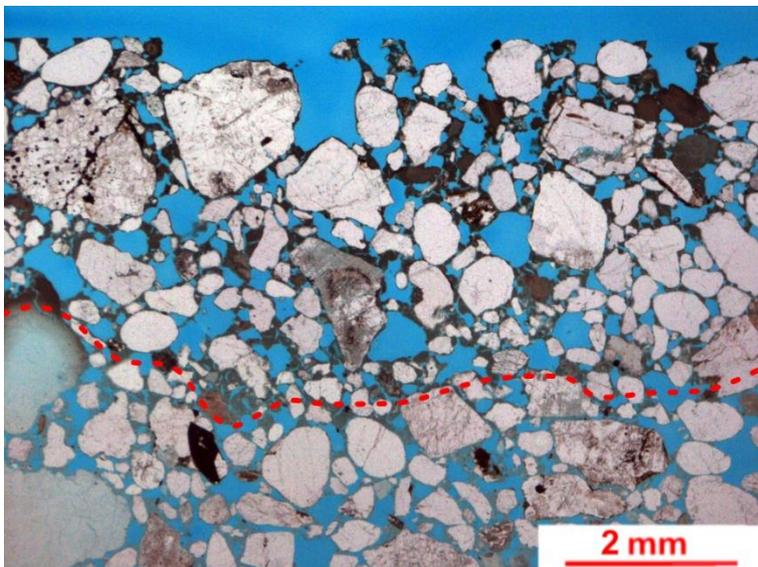


Abb. 32:
Ausschnitt aus einem Dünnschliff.
Mischung K1, die rote gestrichelte
Linie grenzt den carbonatisierten
Bereich (oben) vom nicht
carbonatisierten ab. Alter des
Prüfkörpers: 28 d

Die Oberseite des Prismas ist in den Abbildungen jeweils nach oben gerichtet. Die Proben waren 28 Tage alt, bevor die weitere Carbonatisierung gestoppt und der Dünnschliff angefertigt wurde. An der Färbung der Matrix erkennt man deutlich wie weit die Carbonatisierung fortgeschritten ist. Besonders in H1 sieht man an der braunen Färbung, dass der Mörtel nur etwa 2 mm von der Oberfläche in die Tiefe carbonatisiert ist. In K1 erscheint die Carbonatisierung im selben Zeitraum deutlich tiefer in das Innere des Prismas vorgedrungen zu sein. Die Grenze der Carbonatisierung wurde mit einer roten gestrichelten Linie markiert.

In Abbildung 33 ist ein Detail aus der Übersichtsaufnahme Abbildung 32 zu sehen.

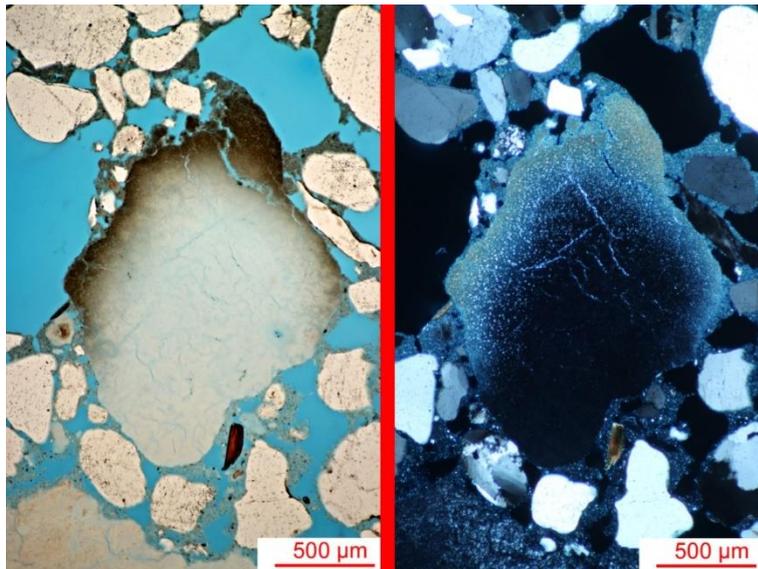


Abb. 33:
Detail aus Abb. 32. Die Bindemittelanreicherung im linear polarisierten Licht links und rechts unter gekreuzten Polarisatoren. Man erkennt rechts die höhere Doppelbrechung der gebildeten Calcite im Vergleich zu der niedrigeren Doppelbrechung der Calciumhydroxide

Die Bindemittelanreicherung erscheint in linear polarisiertem Licht im oberen Bereich braun und im unteren hell. Unter gekreuzten Polarisatoren ist der Unterschied noch deutlicher zu sehen. Das Calciumhydroxid hat eine moderate Doppelbrechung von 0,029 (TRÖGER 1967, S. 69), erscheint durch die geringe Korngröße jedoch annähernd isotrop bis maximal zum Grau der ersten Ordnung. Im Gegensatz dazu hat Calcit mit 0,1719 (TRÖGER 1959, S. 23) eine deutlich höhere Doppelbrechung, die im Dünnschliff hell erscheint. Je nach Kristallgröße erscheinen die Calcite als homogen hellbraune Bereiche als Summe der unterschiedlich orientierten Calcitkristalle (feinstkristallin) oder sie funkeln als helle Pünktchen einzeln erkennbar auf (gröberkristallin).

Zur besseren Hervorhebung des Gefüges wurden die beiden Übersichtsdarstellungen in Falschfarbenbilder umgewandelt. Der Porenraum ist nach wie vor blau, das Bindemittel wurde in Gelb umgesetzt und die Zuschläge in Rot. In Abbildung 34 ist wiederum H1 zu sehen, in Abbildung 35 K1. Beide Mörtel sind matrixgestützt, d.h. es kommt selten zu direkten Korndkontakten. Der Mörtel K1 erscheint etwas dichter aber auch hier sind direkte Kontakte von Körnern, die sich gegenseitig abstützen selten.

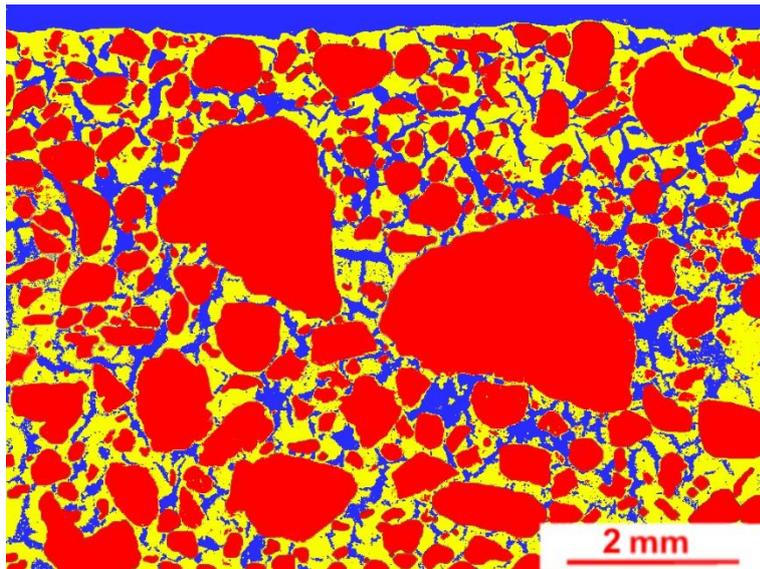


Abb. 34:
Die Übersichtsdarstellung aus
Abb. 31 in Falschfarben-
darstellung zur besseren
Sichtbarmachung des Gefüges

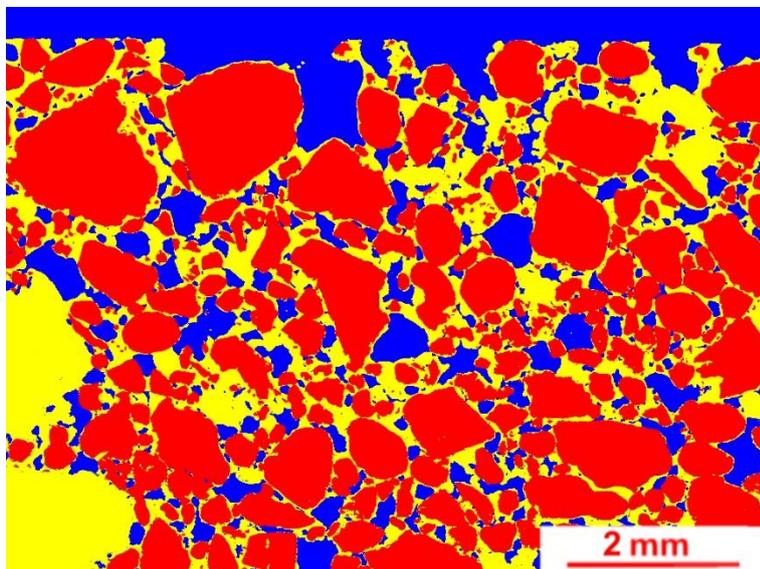


Abb. 35:
Die Übersichtsdarstellung aus Abb.
32 in Falschfarbendarstellung zur
besseren Sichtbarmachung des
Gefüges

Man erkennt, dass beide Mörtel ein unterschiedliches Gefüge haben. Der Mörtel K1 hat überwiegend eckige Poren, die kompakt zusammenhängen und ein paar klumpige Bindemittelanreicherungen (siehe die beiden gelben, größeren Flächen unten links). Der Mörtel H1 hingegen ist charakterisiert durch zahlreiche längliche und verzweigte Schwundrisse in der Matrix. Für Schwundrisse, sowohl in der Natur bei trocknendem Schlamm als auch in der Technik bei beispielsweise Keramikglasuren, sind „triple junctions“ typisch (SHORLIN et al. 2000). Bei diesen stoßen drei Risse in einem Punkt zusammen und bilden idealerweise einen Winkel von 120° . Dieses Phänomen, das durch Schwinden infolge von Wasserverlust entsteht, ist typisch für die im Forschungsprojekt untersuchten Heißkalkmörtel. Die von WACHA & PINTÉR (2019) untersuchten warm verarbeiteten Mörtel (WAM,- für warm applied mortar) zeigen ein ähnliches Rissbild, allerdings nicht ganz so ausgeprägt. Es steht damit im Gegensatz zu den von KRAUS (2011) untersuchten Heißkalken, die ein sehr dichtes Gefüge ohne Schwundrisse zeigten. Allerdings muss erwähnt werden, dass solche Schwundrisse nicht als ausschließliches Merkmal von Heißkalken angesehen werden

können. Sehr ähnliche Bilder werden beispielsweise von Mörteln aus Sumpfkalk beschrieben (ALISON 2018, S. 33). Es kann demnach nicht vom polarisationsmikroskopisch beurteilbaren Gefüge darauf geschlossen werden, ob es sich um Heißkalkmörtel handelt oder nicht. Trotz der Risse sind die Komponenten sehr gut in die Matrix eingebunden. Es sind kaum Saumporen zu sehen, wo sich die Bindemittelmatrix von den Komponenten direkt abgelöst hätte. Diese gute Anhaftung des Mörtels an die Oberflächen der Zuschläge gilt auch für die trocken gelöschten Kalke.

Wenn man die Flächen der drei Komponenten (Zuschlag, Bindemittel und Poren) auswertet und gegen die Gesamtfläche verrechnet, dann bekommt man die in Tabelle 10 dargestellte Verteilung. In die Auswertung wurden nur die Poren einbezogen, welche von Mörtel und Zuschlägen umschlossenen sind, nicht die Poren, die nach der Oberfläche hin offen sind.

Tab. 10: Verteilung von Poren, Matrix und Zuschlägen der Proben H1 und K1

| Probe | Anteil in [%] der Gesamtfläche | | |
|-------|--------------------------------|-------------|-----------|
| | Porenraum | Bindemittel | Zuschläge |
| H1 | 14,3 | 29,4 | 56,3 |
| K1 | 13,0 | 28,3 | 58,7 |

Im Vergleich der Bildauswertungen erkennt man, dass das Verhältnis Bindemittel zu Zuschlag sehr ähnlich ist, was durch die Rezeptierung auch so gewollt war. Der Anteil der mikroskopisch sichtbaren Poren ist ebenfalls vergleichbar, auch wenn sich die Poren deutlich durch ihre Form unterscheiden.

In den folgenden Abbildungen sind Ausschnitte aus Dünnschliffen von Mörteln dargestellt, die 360 Tage im Normklima gelagert wurden. Es sind jeweils Heißkalkmörtel und kalt verarbeitete Mörtel der drei unterschiedlichen Rezepturen kombiniert. Eine Abbildung wurde von der Oberfläche gemacht, eine vom Innern des Prismas, das bedeutet von einem Bereich, der jeweils etwa zwei Zentimeter Überdeckung in alle Richtungen hatte.

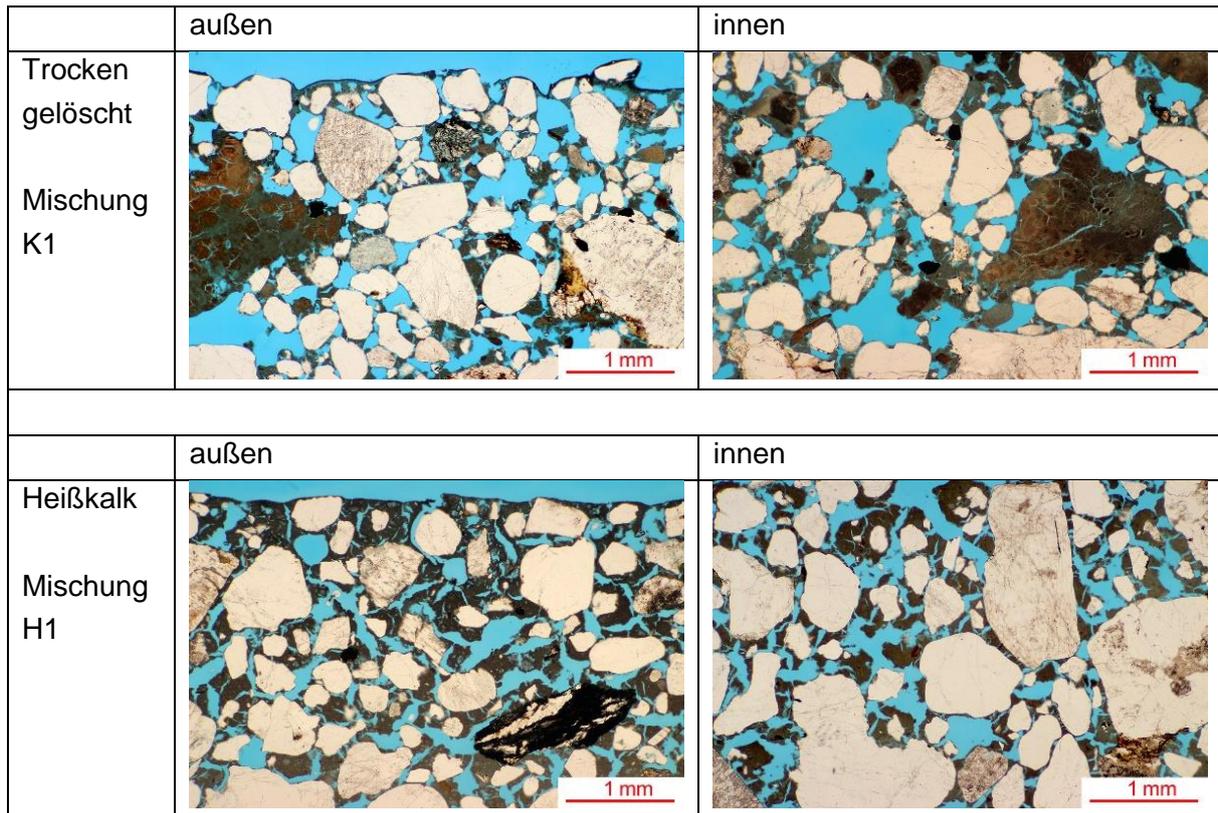


Abb. 36: Zusammenstellung der Dünnschliffbilder von Heißkalkmörtel und trocken gelöschten, kalt verarbeiteten. Mischung 1: 1RT Bindemittel (CaO, Precal 30S), 5 RT Sand

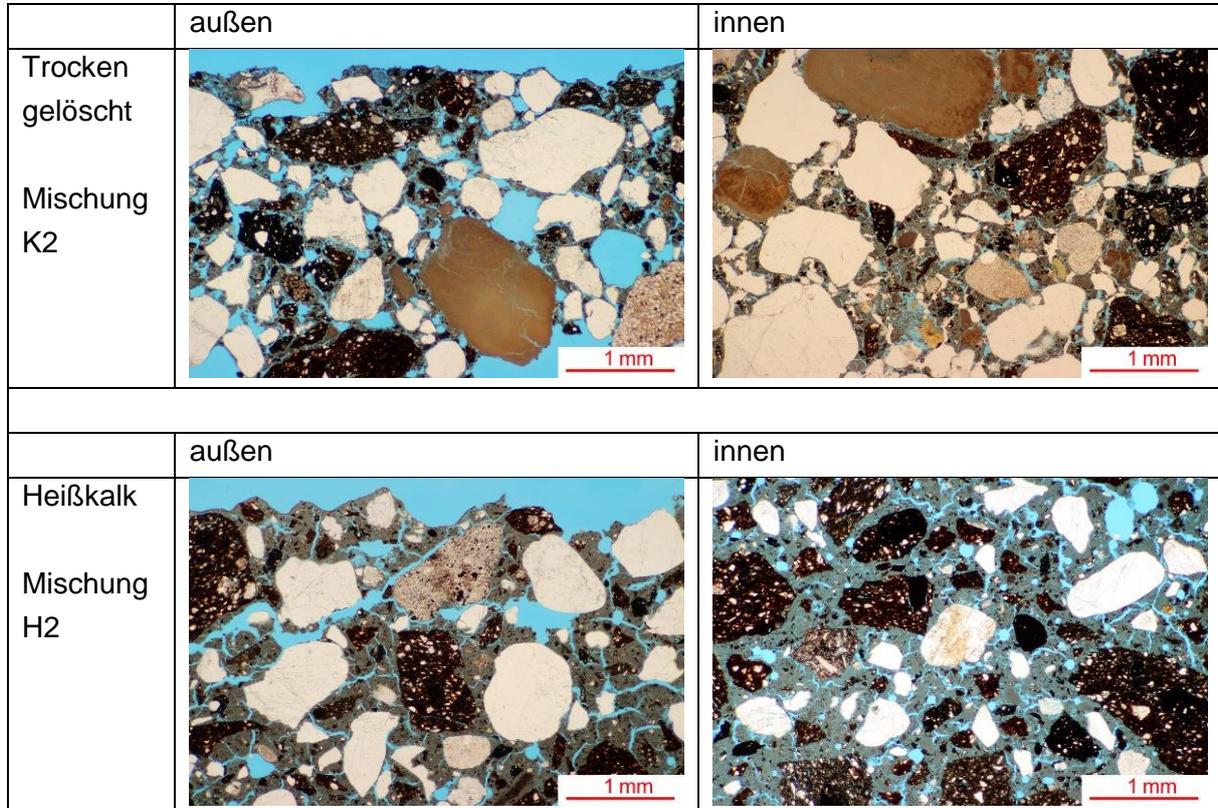


Abb. 37: Zusammenstellung der Dünnschliffbilder von Heißkalkmörtel und trocken gelöschten, kalt verarbeiteten. Mischung 2: 1RT Bindemittel (CaO, Precal 30S), 2,5 RT Sand, 2,5 RT Ziegelsand

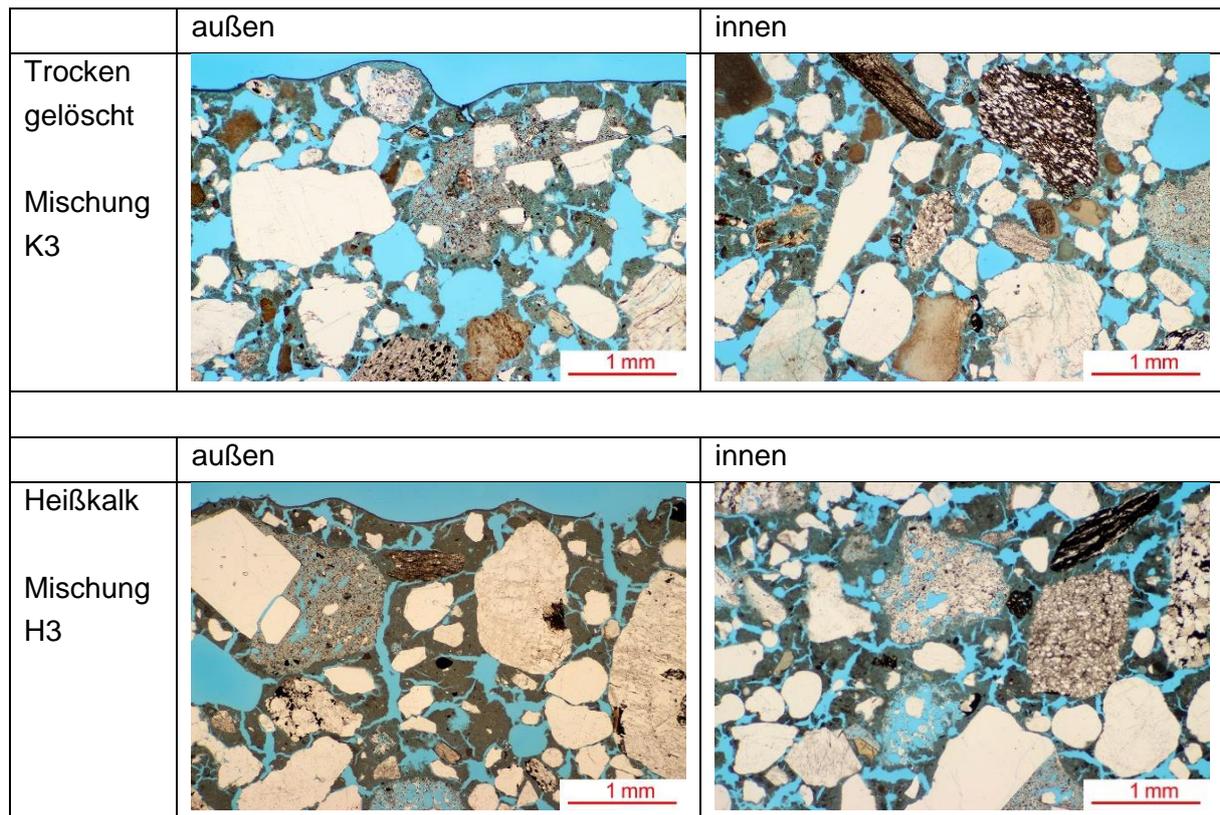


Abb. 38: Zusammenstellung der Dünnschliffbilder von Heißkalkmörtel und trocken gelöschten, kalt verarbeiteten. Mischung 3: 1RT Bindemittel (CaO, Precal 30S), 2,5 RT Sand, 2,5 RT Bims

In allen drei Mörtelmischungen ist das vorher beschriebene typische Gefüge für Heißkalk und trocken gelöschten Kalk zu sehen, und zwar sowohl an der Oberfläche als auch im Innern des Prismas. Es kommt demnach nicht an der Oberfläche durch entweichenden Dampf zu einer im Polarisationsmikroskop sichtbaren Gefügeänderung. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die Mörtel nach 360 Tagen sowohl an der Oberfläche, aber auch in der Tiefe durchgehend carbonatisiert sind.

Rasterelektronenmikroskopie

Die Mikrostruktur der Mörtel wurde mit einem Rasterelektronenmikroskop an Bruchstücken untersucht. Die Proben stammen alle von Mörtelprismen, welche im Normklima bei $20\pm 1^\circ\text{C}$ und $65\pm 5\%$ relativer Luftfeuchte gelagert wurden. In Abbildung 39 erkennt man an einer 28 Tage alten Probe der Mörtelmischung H1 in der Übersichtsaufnahme das Schwundrissbild, das auch in den Dünnschliffen gut zu sehen ist. Im Detail der Oberfläche ist eine dünne verdichtete Zone mit 3-5 μm Dicke, die Kalksinterhaut (WEYER et al. 2015, S. 358) zu sehen und große gut verzahnte Calcitkristalle direkt darunter. Die Zone der spindelförmigen Calcitkristalle ist bis zu 3-4 mm stark.

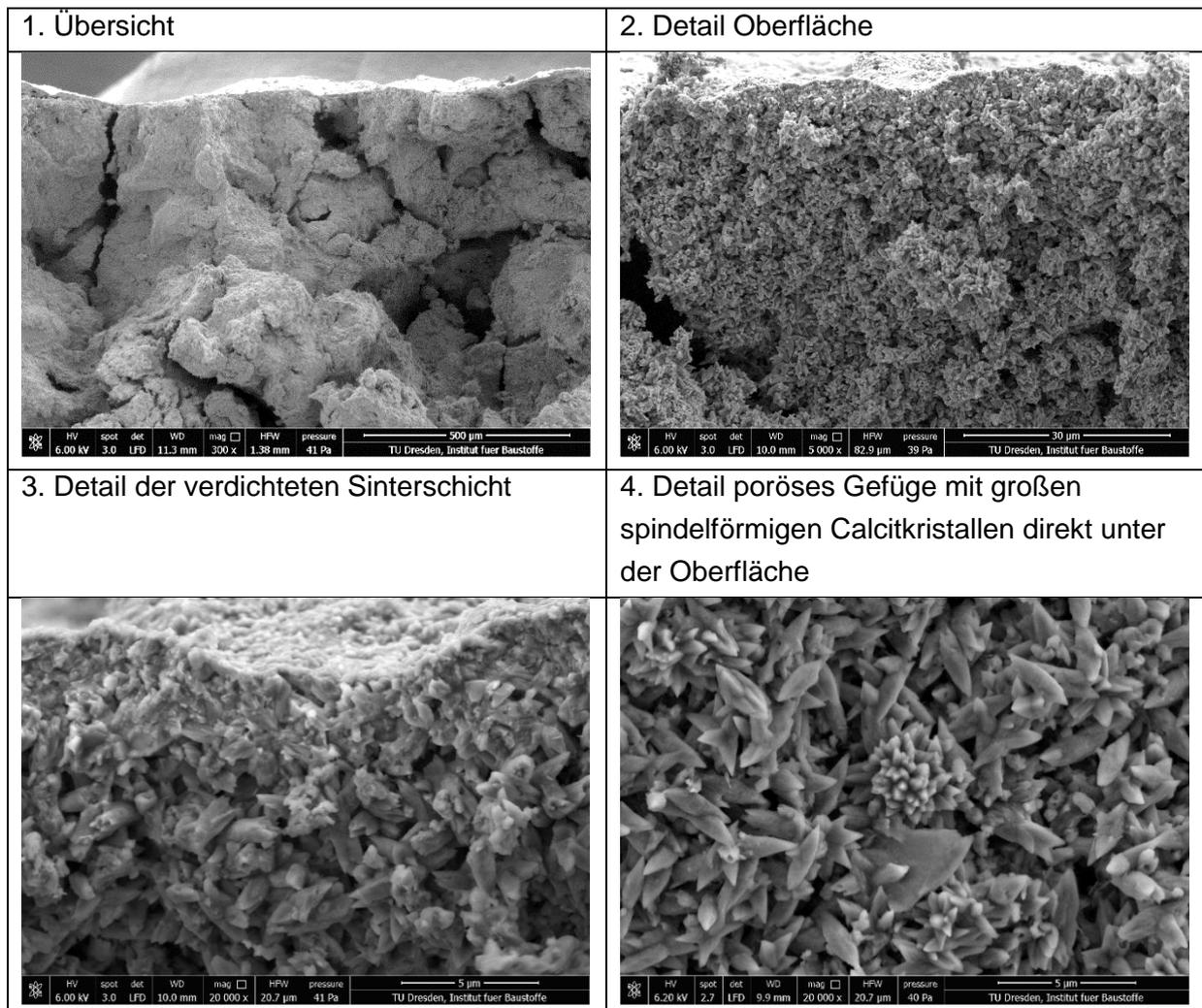


Abb. 39: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer 28 Tage alten Probe der Mörtelmischung H1, Aufnahme der Oberfläche und des Bereichs direkt darunter

Im Innern der Probe ist in der Übersicht in Abbildung 40 ebenfalls das feine Rissbild zu sehen, in der Detailaufnahme ein dichteres Gefüge mit kleinen runden Porenkanälen. Das Gefüge ist im Vergleich mit dem direkt unterhalb des Randes (Vergleiche Bild 4 der vorigen Abbildung in derselben Vergrößerung) deutlich unterscheidbar. Hier kommen vereinzelt Calcitkristalle vor, die keine Spindelform, sondern eine eher blockige Form haben. Diese Kristalle sind in eine wolzig diffuse Matrix aus vermutlich Portlandit eingebettet. Die grobe Verzahnung der spindelförmigen Kristalle im Randbereich scheint für eine größere Festigkeit der oberflächennahen Zone zu sorgen. Im makroskopisch sichtbaren Bruchbild ist der Bereich unterhalb der Oberfläche meist als stabilere „Scholle“ zu sehen, wohingegen der innere Bereich mürbe erscheint.

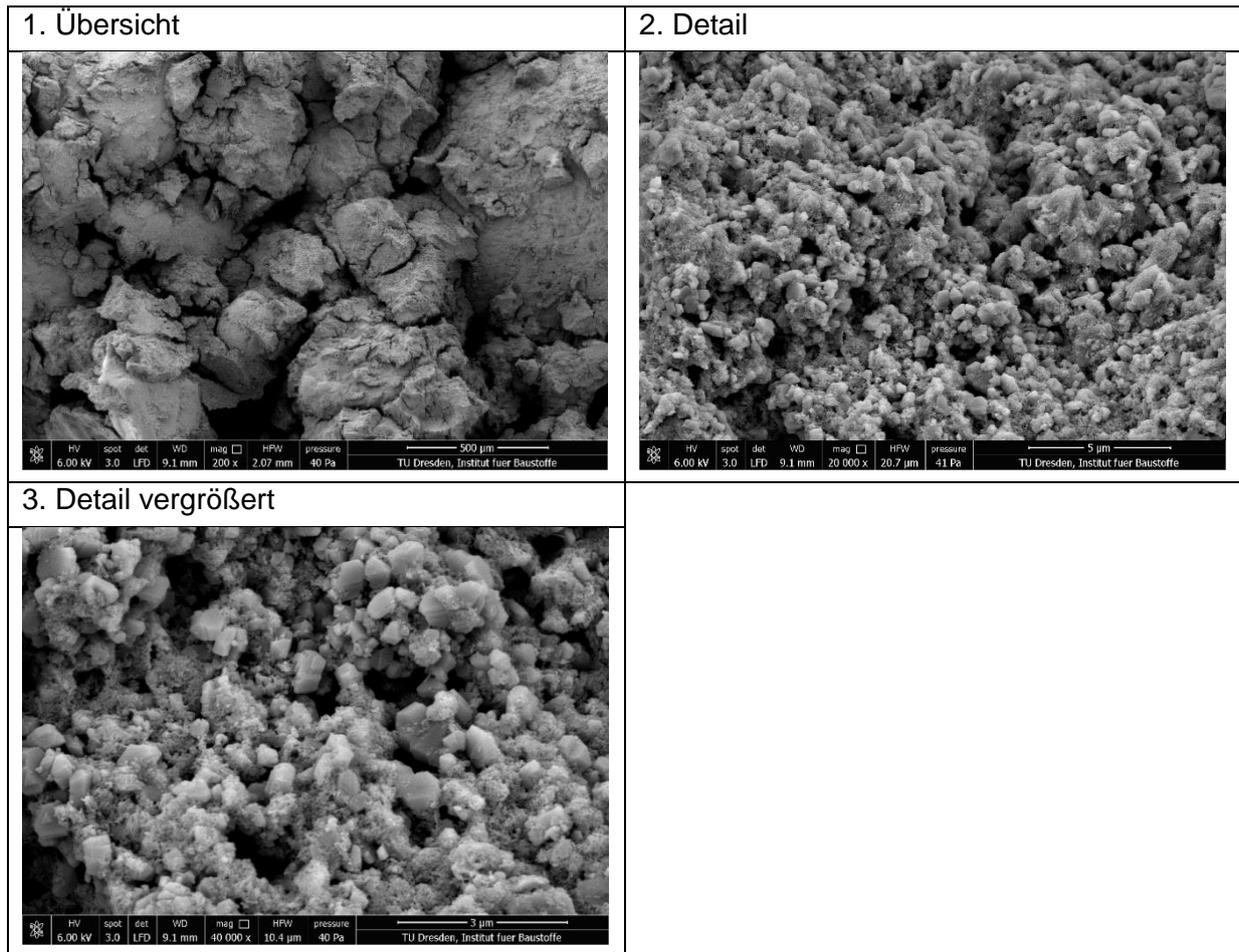


Abb. 40: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer 28 Tage alten Probe der Mörtelmischung H1, Aufnahmen aus dem Innern des Prismas

Bei den trocken gelöschten, kalt verarbeiteten Mörteln sieht das Gefüge im Vergleich mit den vorhergegangenen Heißkalkmörteln unterschiedlich aus. In Abbildung 41 erkennt man in Bild 1, dass es ebenfalls eine Kalksinterhaut an der Oberfläche gibt. Ansonsten ist das Gefüge jedoch nicht mit dem des Heißkalks im oberflächennahen Bereich zu vergleichen. Die Poren erscheinen eher oval oder länglich und die Mikrostruktur ist kaum differenziert und kristallin. Obwohl der Bereich nach dem Phenolphthalein-Test und in den Dünnschliffen carbonatisiert erscheint.

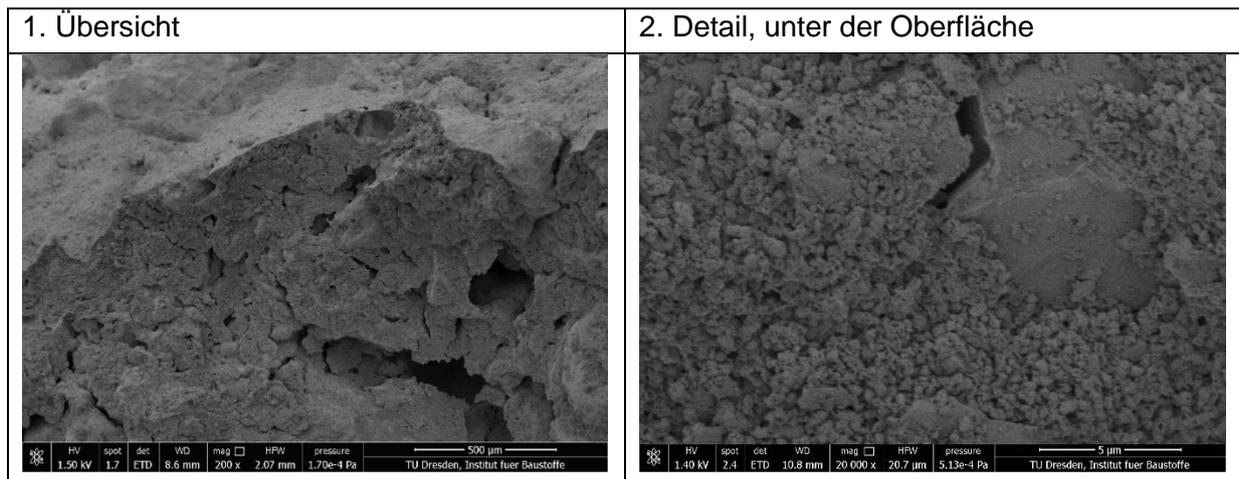


Abb. 41: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer 28 Tage alten Probe der Mörtelmischung K1, Aufnahme der Oberfläche und des Bereichs direkt darunter

Im Innern der Probe sieht es sehr ähnlich aus. Auch hier sind wenige Calcitkristalle feststellbar, die in ein feinkörnig wolkiges Gefüge aus vermutlich Portlandit eingebettet sind.

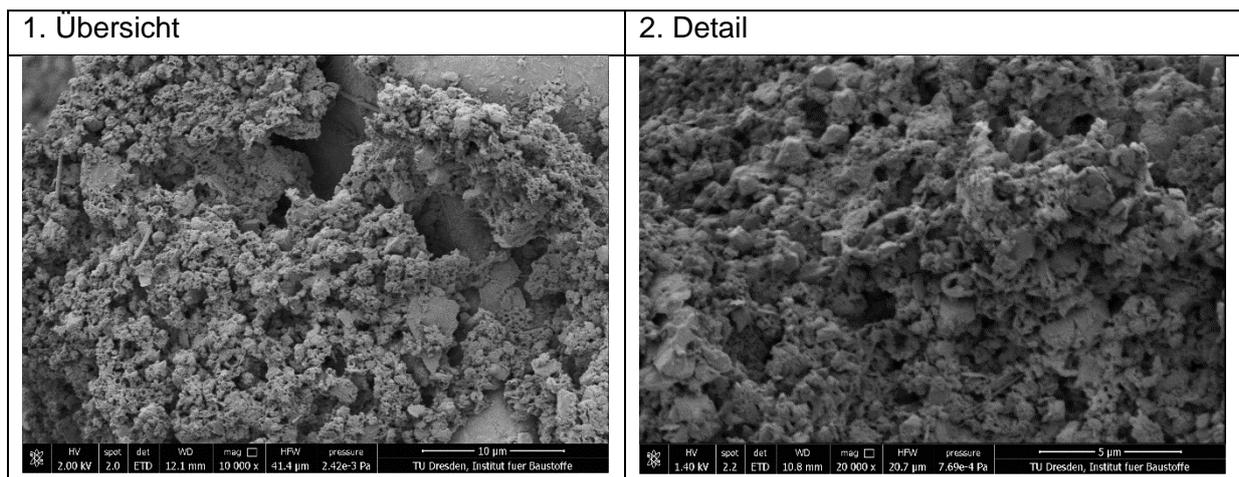


Abb. 42: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer 28 Tage alten Probe der Mörtelmischung K1, Aufnahmen aus dem Innern des Prismas

Vergleicht man das Mikrogefüge der untersuchten Heißkalkmörtel mit dem der trocken gelöschten, kalt verarbeiteten, dann stellt man fest, dass dieses bei Heißkalkmörteln unterhalb der Oberfläche, zum Teil bis in eine Tiefe von mehreren Millimetern, sehr deutlich kristallin erscheint. Es kommen relativ große spindelförmige Calcitkristalle vor, die innig verzahnt sind. In den trocken gelöschten Mörteln kommen sowohl an der Oberfläche als auch im Innern eher undifferenzierte Formen vor, die nicht als Kristalle aufzulösen sind. Diese Beobachtung nach 28 Tagen lässt sich auch nach 360 Tagen nachvollziehen. Die Struktur der Heißkalkmörtel verändert sich kaum. Zum Teil sind die großen spindelförmigen Kristalle angelöst, siehe Abbildung 43. Auch im Innern der Proben erscheinen die kristallinen Phasen angelöst, die scharfen Kanten wirken runder und die glatten Oberflächen zeigen Lösungsspuren.

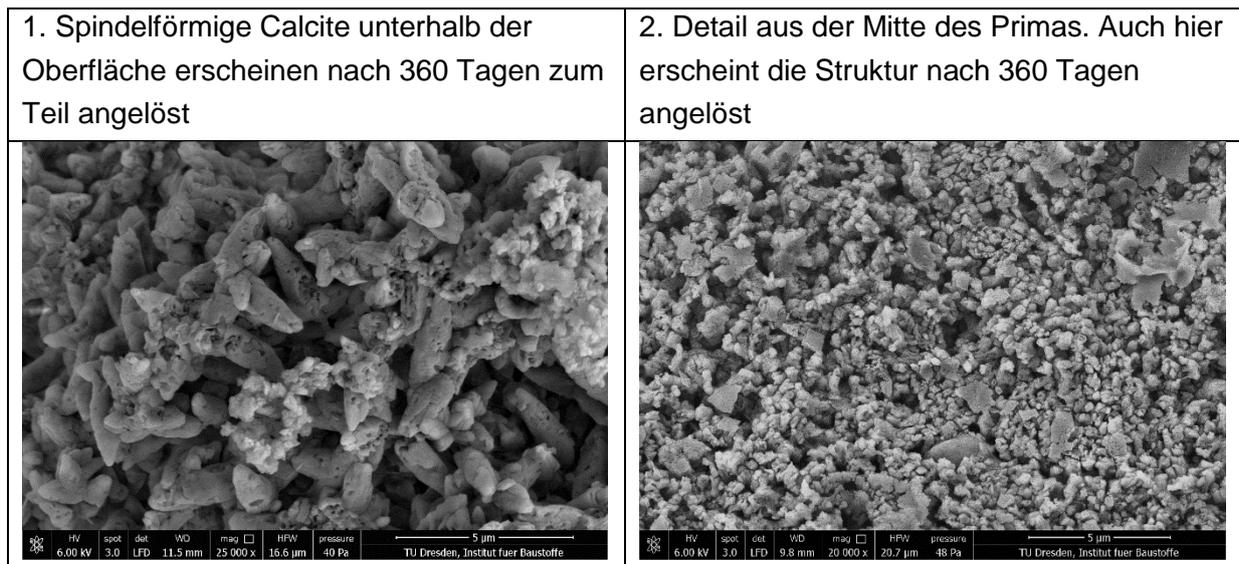


Abb. 43: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer 360 Tage alten Probe der Mörtelmischung H1, Aufnahmen von unterhalb der Oberfläche (links) und aus dem Innern des Prismas (rechts)

Die heiße Verarbeitung der Mörtel hat nach den hier gezeigten Untersuchungen sowohl Einfluss auf die Ausbildung der Makro- als auch Mikrostruktur. Makroskopisch erscheinen die Heißkalke der hier verwendeten Probeserie von zahlreichen Schwundrissen durchzogen. Es soll aber nochmals darauf hingewiesen werden, dass dieses Schwundrissensystem kein Alleinstellungsmerkmal von Heißkalkmörteln ist, es wurde auch an Sumpfkalkmörteln beobachtet. Die Makrostruktur der trocken gelöschten Mörtel zeigt dieses Schwundrissensystem nicht, es kommen eher ovale oder röhrenförmige Poren vor. In beiden Mörteltypen sind die Komponenten gut in die Matrix eingebunden.

Die Mikrostruktur unterscheidet sich ebenfalls. Es scheint, dass es bei der heißen Verarbeitung von Kalkmörtel zu einem deutlich größeren und ausgeprägterem Kristallwachstum kommt. Die sich entwickelnden Calcitkristalle sind direkt unter der Oberfläche, in einer bis zu 4 mm starken Zone, spindelförmig und bis zu 1 μm lang. Im Innern der Mörtel kommen ebenfalls größere, bis zu 1 μm große Calcitkristalle vor, diese sind jedoch eher blockig oder auch tafelig. Im Innern der Prüfkörper sind diese gut entwickelten Kristalle auch nicht so häufig, sie erscheinen in eine diffus wolkige feinkörnige Matrix aus zunächst vermutlich Portlandit eingebettet zu sein. Nach 360 Tagen sind an den Heißkalkmörteln Lösungserscheinungen an den zuerst gebildeten spindelförmigen Kristallen im Außenbereich festzustellen. Auch die im Innern liegenden vereinzelt, eher blockig tafeligen Kristalle sind davon betroffen. Im Innern hat sich die wolkig diffuse Struktur durch die Bildung von Calcit in eine feinkristalline Matrix umgewandelt.

3.3 Anlage von Heißkalk Musterflächen an historischem Mauerwerk und deren naturwissenschaftliche Untersuchung

3.3.1 Untersuchungsmethoden

- **Feuchtebestimmung nach der Darmmethode**

Für die Feuchtebestimmung wurden Probenahmen vor Ort durch das IDK durchgeführt. Das Vorgehen bei der Probenahme orientiert sich an DIN EN 16085. Mit einem Spiralbohrer (\varnothing 12 mm) wurde aus definierten Tiefenstufen Bohrmehl entnommen und in luftdichten Behältern aufgefangen. Die Feuchtebestimmung erfolgt mittels Darmmethode (WTA-MERKBLATT "FEUCHTEMESSUNG" (1999); DIN EN 16682) im Labor des IDK.

- **Quantitative Salzuntersuchung**

Aus den Bohrmehlproben wurden für die quantitative Salzanalyse durch ein standardisiertes Elutionsverfahren wässrige Auszüge (in Anlehnung an DIN 38414) im Labor des IDK erstellt. Es erfolgte eine Bestimmung des Anteils der löslichen Bestandteile vom Probematerial (DIN EN 16455), sowie der Leitfähigkeit (in Anlehnung an DIN EN 27888) und des pH-Werts des Extraktes. Der pH-Wert wurde über Behrotest pH81 und die Leitfähigkeit über WTW Cond 315i/Set bestimmt. Von den Extrakten wurden mittels ionenselektiver Methode von Natrium (Na^+) und mittels Photometrie von den Kationen (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) und den Anionen (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) die jeweiligen Konzentrationen bestimmt. Die quantitative Ionenbestimmung erfolgte mittels HACH DR/2800 Direct Reading Spectrometer; Natrium HACH Sension 2.

Die Analysenergebnisse der Salzuntersuchungen werden angegeben und bewertet in Ma.-%. Bei der Korrelation von Kationen und Anionen in Schadsalzuntersuchungen ist in der Regel ein kleiner Kationenüberschuss zu verzeichnen, der u. a. damit erklärt wird, dass etwaige OH^- - und CO_3^{2-} -Ionen in der Analyse nicht erfasst werden können (STEIGER et al. 1998). Tabelle 11 gibt Bewertungsgrenzwerte für bauschädliche Salze nach WTA-MERKBLATT "MAUERWERKSDIAGNOSTIK" (1999) an.

Tab. 11: Bewertungsgrenzwerte für bauschädliche Salze nach WTA-MERKBLATT "MAUERWERKSDIAGNOSTIK" (1999)

| Bewertung in Ma.-% | WTA-Merkblatt4-5-99/D "Mauerwerksdiagnostik" | | |
|-----------------------|--|---------------|-----------------|
| | SO_4^{2-} | Cl^- | NO_3^- |
| "gering" | <0,5 | <0,2 | <0,1 |
| "mittel" | 1,5-0,5 | 0,5-0,2 | 0,3-0,1 |
| "hoch" | >1,5 | >0,5 | >0,3 |

- **Mörtelanalyse**

An den Mörtelproben wurden nasschemische Mörtelanalysen (MEHLMANN 1993) durchgeführt. Durch den Aufschluss mit HCl wurde der salzsäurelösliche Bindemittelanteil bestimmt. Nach anschließendem Versetzen mit Na_2CO_3 erhält man den löslichen SiO_2 -Anteil. Mit Hilfe von Fällungsreaktionen und Titration werden aus dem salzsäurelöslichen Filtrat die Gehalte an SO_3 , Me_2O_3 (Metalloxide wie z.B. Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Mn_3O_4 oder TiO_2), CaO und MgO ermittelt. Die Vergleichbarkeit der Bindemittelanteile kann nach der chemischen Analyse wesentlich verbessert werden, indem die Absolutwerte prozentual auf den bestimmten Bindemittelgehalt bezogen werden. Weiterhin erfolgte eine Bestimmung des Trocken- und Glühverlustes in vorgegebenen Temperaturschritten bezogen auf die Gesamteinwaage. Die jeweiligen Temperaturdifferenzen sind auf die Zersetzungstemperaturen von Gips- und Zementhydraten sowie auf die Zersetzung von Karbonatverbindungen abgestimmt. Die Siebanalyse dient der Charakterisierung der Korngrößenverteilung des Zuschlags. Eine wichtige Voraussetzung für diese Analyse ist die weitgehende Salzsäureunlöslichkeit aller Zuschlagstoffbestandteile, da das Bindemittel durch einen Säureaufschluss vor der Bestimmung abgetrennt wird. Eine Überprüfung dieser Voraussetzung erfolgt durch mikroskopische Voruntersuchungen. Die Einteilung der Siebschritte orientiert sich an der Fragestellung und Probemenge. Im Regelfall wird mit der Verdopplung der Maschenweite ab 0,1 mm gearbeitet.

- **Röntgenpulverdiffraktometrie**

Mit Hilfe der Röntgenpulverdiffraktometrie lassen sich kristalline Bestandteile in einer Probe nachweisen. Die Proben wurden an der TU Dresden, Institut für Geotechnik von H. Siedel mit einem Röntgendiffraktometer (Siemens, D5000) untersucht und mit Hilfe der Software DIFFRAC plus EVA ausgewertet.

- **Abriebtest mit Pinsel**

Um die Mörteloberflächen zu vergleichen, wurde der Abriebtest mittels Pinsel (KICHNER & ZALMANZIG 2011) durchgeführt, ein einfacher Feldtest aus dem Bereich der Steinkonservierung, mit dem die Intensität der körnigen Zersetzung vertikaler Steinoberflächen bewertet wird (BLÄUER et al. 2012). An den Musterflächen wurden in zwei Höhen vergleichende Untersuchungen zum Absanden der Putzoberflächen in den Höhenstufen 20 cm bis 30 cm (UNTEN) und 160 cm bis 170 cm (OBEN) durch Abpinseln mit einem Rundpinsel (10 x horizontal, 10 x vertikal) einer Fläche von 10 x 10 cm durchgeführt. Das aufgefangene Material wurde gravimetrisch bestimmt und vergleichend ausgewertet.

- **Bestimmung der Carbonatisierungstiefe**

Die Bestimmung der Carbonatisierungstiefe erfolgte mittels Phenolphthaleinindikator an Bohrmehl vor Ort oder frisch angeschlagenen Mörtelprismen.

- **Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten**

Die Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme mit dem Karstensen Prüfröhrchen (D´HAM et al. 2010) an unterschiedlich ausgebildeten Putzoberflächen erfolgte an Putz-Ziegel-Verbundkörpern in der Ziegelmitte.

- **Haftzugmessungen**

Haftzugmessungen erfolgten in Anlehnung an DIN EN 1015-12 mit einem Haftzugmessgerät der Firma Freundl, Easy M, mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 50 N/s und einem Prüfstempeldurchmesser von 50 mm. Die Prüfstempel wurden mit einem schnell härtender 2-Komponenten-Kleber auf Methacrylatbasis aufgeklebt.

- **Bestimmung der Druckfestigkeit**

Für die Prüfung der Druckfestigkeit der Putzschicht wurde das Verfahren der Prüfung der Fugendruckfestigkeit nach DIN 18555-9:2010-04, Verfahren III genutzt. Die Messungen erfolgten an von der Ziegeloberfläche abgetrennten und formatierten Mörtelproben im Labor des Bereichs Bauingenieurwesen der HTW in Dresden.

- **REM-Untersuchungen**

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM) erfolgten an einem REM vom Typ Quanta TM FEG (FEI), ausgerüstet mit einem energiedispersiven Röntgenspektroskop (EDX), an der TU Dresden, Institut für Baustoffe. Operatorin am Gerät war Frau Dipl.-Ing. S. Hempel.

3.3.2 Auswahl der Musterflächen in Kloster Buch und naturwissenschaftliche Voruntersuchungen zur Feuchte-Salz-Belastung

Beispiel für ein Bauwerk, das Umweltschäden in modellhafter Weise zeigt, ist das nahe der sächsischen Stadt Leisnig gelegene ehemalige Zisterzienserklöster Buch. Es handelt sich um eine „in der Niederung eines Flussarms der Mulde gelegene, weitläufige Anlage, die durch Größe und Gestaltung zu den bedeutendsten Klosterbauten Sachsens zählte“ (DEHIO 1998, S. 621 ff). Die Klostergründung erfolgte vor 1192 durch den Burggrafen Heinrich I. von Leisnig. Später wurde das zunächst nur als Hauskloster und Begräbnisstätte der Burggrafen von Leisnig konzipierte Kloster durch die deutschen Könige unterstützt und im Laufe des 14. Jahrhunderts in den Herrschaftsbereich der Wettiner eingegliedert. Die 1525 säkularisierte Klosteranlage ist nur teilweise erhalten, jedoch ist durch Ausgrabungen bereits im 19. Jahrhundert bis ins 20. Jahrhundert eine umfassende Rekonstruktion der Anlage möglich. Erhalten sind Teile der ehemaligen Klosterkirche und des Kapitelhauses sowie von Wirtschaftsgebäuden, das Abtshaus und große Teile der Klostermauer. Die zur Vermauerung der Porphybruchsteine verwendeten historischen Dolomitmörtel sind durch die viele Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts andauernde Luftverschmutzung im Ballungsraum Leipzig stark geschädigt und zu Magnesiumsulfat und Gips umgewandelt worden (SIEDEL 2013). Die im Gebiet der Mulde verheerende „Jahrhundertflut“ 2002 und

neuerliche Flutereignisse 2011 und 2013 haben in den letzten Jahren immer wieder Salze in Mauerwerk und Putz auch bereits instand gesetzter Gebäudebereiche der Anlage aktiviert. Das Bauwerk bietet damit günstige Voraussetzungen für die versuchsweise Applikation von Heißkalkmörtel in feuchte- und salzbelasteten Bereichen. Im Vorfeld des Projekts waren, unterstützt durch die Objektkennntnis von Dipl.-Rest. T. Schmidt, Begehungen der Anlage Kloster Buch erfolgt, um eine sowohl repräsentative als auch für die Applikation von Putzmustern geeignete Fläche des historischen Porphyrmauerwerks zu identifizieren. So sollte am betreffenden Mauerabschnitt eine hinreichende Stabilität gewährleistet sein, keine historischen Putze mehr vorhanden sein (jüngere Zementputzreste wurden entfernt), und die Störung von ggf. in tiefen Fugen nistenden Fledermäusen sollte ausgeschlossen werden. Die Wahl fiel auf einen Abschnitt der noch bestehenden südlichen Außenmauer des ehemaligen Langhauses (Südseite) (Abbildung 44).



Abb. 44: Kloster Buch, Probenahme im Vorfeld der Anlage von Musterflächen an der noch bestehenden Außenmauer des ehemaligen Langhauses (Langhausmauer) am 18.09.2017

3.3.2.1 Probenahme

An den ausgewählten Mauerwerksflächen wurden augenscheinlich folgende Schäden wahrgenommen: ausgebrochene Mauersteine, Putz- und Fugen- bzw. Setzmörtelverluste bis in große Tiefen, mürbe, rückgewitterte Natursteinoberflächen, Salzausblühungen sowie Vergrünung und Bewuchs.

Vor der Applikation der Putzmuster wurde der Mauerwerksbestand auf Feuchte- und Salzbelastung untersucht (ZÖTZL 2017b). Dafür sind entlang von vier Musterachsen im Bereich der späteren Putzmuster Höhen- und Tiefenprofile durch die abschnittsweise Entnahme von Bohrmehlproben beprobt worden (Abbildung. 45).

Die Probenahme erfolgte am 18. 09. 2017 vor Ort. An der Langhausmauer wurden in verschiedenen Bereichen Bohrmehlhöhen- und -tiefenprofile im Fugenbereich angelegt

(Tabelle 12). In jeder in Tabelle 12 angegebenen Höhe über Geländeoberkante (GOK) wurden Bohrmehlproben aus den Tiefenabschnitten 1 (0-2 cm), 2 (2-4 cm), 3 (4-15 cm), 4 (15-30 cm) und 5 (30-45 cm) entnommen (vgl. Abbildung 45). Sie sind im Labor anschließend auf Feuchte- bzw. Salzgehalte untersucht wurden. Dabei wurde an allen Proben die Materialfeuchte bestimmt. Salzanalysen wurden in unterschiedlicher Genauigkeit (als löslicher Gesamtsalzgehalt bzw. als Analyse von Kationen und Anionen) nur an ausgewählten oberflächennahen Proben (Tiefenstufe 0-2 und 2-4 cm) durchgeführt. Weiterhin wurde im rechten Teil der Musterfläche zwei weitere Probe in 110 cm Höhe über GOK und 0-2 cm Tiefe von Mauersteinen aus Porphyry entnommen (KB_R1, wenig verwittert und KB_R/grus – vergrust; Abbildung 46). Darüberhinaus sind zwei Proben von Salzausblühungen in 55 cm (KB_ES1) und 175 cm (KB_ES2) über GOK zur Röntgenphasenanalyse der Salze (XRD) entnommen worden



Abb. 45: Kloster Buch, Lage der Musterachsen zur Probenahme im Vorfeld der Anlage von Putzmusterflächen an der Außenmauer des ehemaligen Langhauses (Langhausmauer). Die Angabe der Tiefenstufen (rot) beschreibt die Abstufung der jeweils in verschiedenen Höhen entnommenen Tiefenprofile

Tab. 12: Höhenprofile im Bereich der beprobten Musterachsen. In jeder Höhe wurden Bohrmehlproben in 5 Tiefenstufen entsprechend den Angaben in Abb. 2 entnommen

| | Achse 1 KB_TP1 | Achse 2 KB_TP2 | Achse 3 KB_TP3 | Achse 4 KB_TP4 |
|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Höhe | 45 cm (KB_TP1_1) | 55 cm (KB_TP2_1) | 45 cm (KB_TP3_1) | 30 cm (KB_TP4_1) |
| Höhe | 135 cm (KB_TP1_2) | 140 cm (KB_TP2_2) | 130 cm (KB_TP3_2) | 125 cm (KB_TP4_2) |
| Höhe | 200 cm (KB_TP1_3) | 200 cm (KB_TP2_3) | - | - |



Abb. 46: Kloster Buch, Langhausmauer, Südseite, Probenahmepunkte für Voruntersuchungen in einem stark verwitterten (mit vergruster Oberfläche, R_Grus) und einem weniger verwitterten Porphyr-Gestein (h=110 cm)

3.3.2.2 Ergebnisse und Interpretation

Die ermittelten Feuchteverteilungen von der Oberfläche (1) bis in eine Tiefe von maximal 45 cm (5) werden für die jeweiligen Entnahmehöhen der Proben in den Abbildung 47 und 48 grafisch dargestellt.

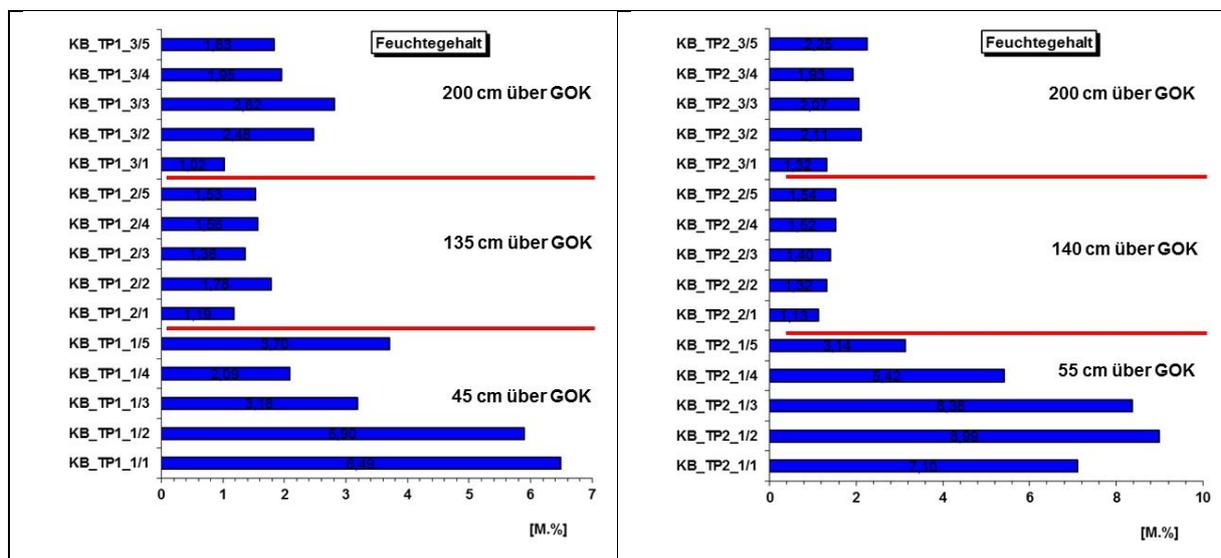


Abb. 47: Feuchteverteilung in den Höhen- und Tiefenprofilen TP1 und TP2 (Tiefenstufen: 0-2 cm, 2-4 cm, 4-15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm)

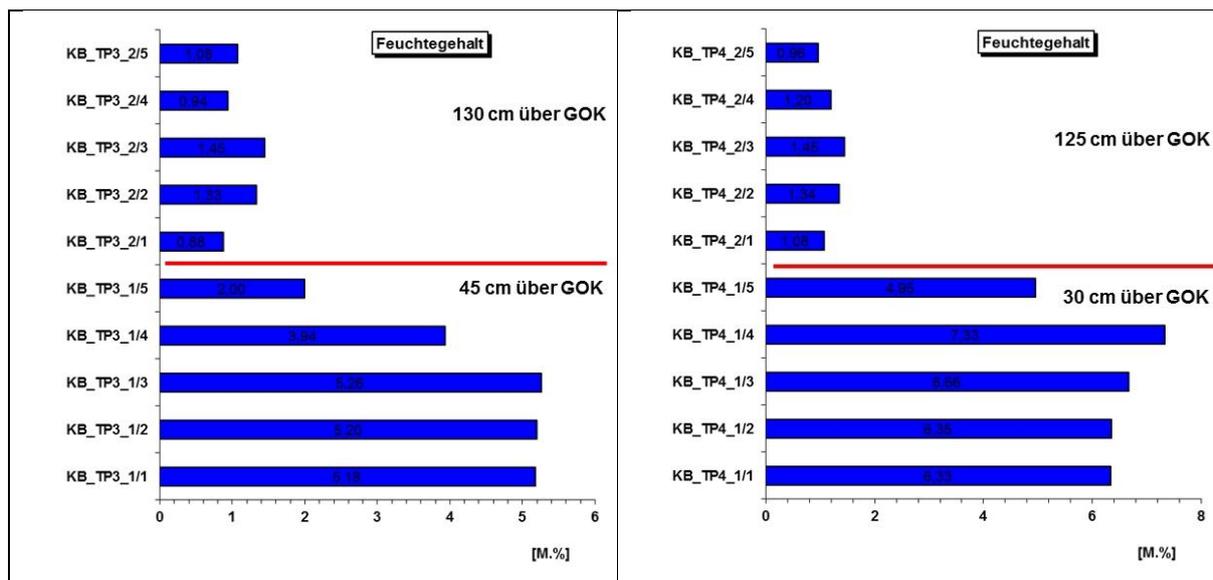


Abb. 48: Feuchteverteilung in den Höhen- und Tiefenprofilen TP3 und TP4 (Tiefenstufen: 0-2 cm, 2-4 cm, 4-15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm)

Alle Tiefenprofile zeigen in der ersten Höhenstufe im bodennahen Sockelbereich (30 cm bis 55 cm) eine relativ gleichmäßige, bis mit der Tiefe zunehmende Durchfeuchtung des Mauerquerschnitts mit erhöhten bis hohen Feuchten. Hier kommt es zu aufsteigender Feuchte, aber auch direkt zu einer Beaufschlagung durch über die Fassade ablaufendes Niederschlagswasser. Im erweiterten Sockelbereich in einer Höhe von ca. 130 cm fallen die Feuchten auf geringe bis sehr geringe Werte ab. Die in einer Höhe von 200 cm eingebrachten Profile zeigen wieder geringfügig ansteigende, jedoch noch geringe Feuchten. Hier deutet sich der Einfluss der Exposition an. Auffällig sind bei einigen Profilen oberflächennah leicht erhöhte Feuchten, die auf Belastungen mit hygroskopischen Salzen zurückzuführen sind.

Die Ergebnisse der Gesamtanalysen löslicher Salzbestandteile an den untersuchten Bohrmehlproben sowie Leitfähigkeitsmessungen an den wässrigen Eluaten werden in der Tabelle 13 gezeigt.

Tab. 13: Ergebnisse der Feuchte-, Salz-, pH-Wert und Leitfähigkeitsuntersuchungen

| Probe | Tiefenstufe | Lf ₂₅₀ [μS/cm] | pH [-] | ∑ wasserlös. Bestandteile [Ma.-%] | Feuchte [Ma.-%] |
|--|-------------|------------------------------|-----------|--|--------------------|
| Langhausmauer, Musterfläche links, ca. 45 cm über GOK | | | | | |
| KB_TP1_1/1 | 0-2 cm | 123 | 8,83 | 0,77 | 6,49 |
| KB_TP1_1/2 | 2-4 cm | 83 | 8,99 | 0,59 | 5,90 |
| Langhausmauer, Musterfläche links, ca. 135 cm über GOK | | | | | |
| KB_TP1_2/1 | 0-2 cm | 573 | 8,43 | 3,00 | 1,19 |
| KB_TP1_2/2 | 2-4 cm | 260 | 8,44 | 1,68 | 1,78 |
| Langhausmauer, Musterfläche links, ca. 200 cm über GOK | | | | | |
| KB_TP1_3/1 | 0-2 cm | 490 | 8,47 | 2,25 | 1,02 |
| KB_TP1_3/2 | 2-4 cm | 259 | 8,44 | 1,55 | 2,48 |
| Langhausmauer, Musterfläche Mitte, links, ca. 55 cm über GOK | | | | | |
| KB_TP2_1/1 | 0-2 cm | 62 | 8,65 | 0,27 | 7,10 |
| KB_TP2_1/2 | 2-4 cm | 56 | 8,57 | 0,17 | 8,99 |
| Langhausmauer, Musterfläche Mitte, links, ca. 140 cm über GOK | | | | | |
| KB_TP2_2/1 | 0-2 cm | 522 | 8,20 | 2,29 | 1,13 |
| KB_TP2_2/2 | 2-4 cm | 259 | 8,30 | 1,37 | 1,32 |
| Langhausmauer, Musterfläche Mitte, links, ca. 200 cm über GOK | | | | | |
| KB_TP2_3/1 | 0-2 cm | 260 | 8,30 | 1,51 | 1,32 |
| KB_TP2_3/2 | 2-4 cm | 197 | 8,36 | 0,79 | 2,11 |
| Langhausmauer, Musterfläche Mitte, rechts, ca. 45 cm über GOK | | | | | |
| KB_TP3_1/1 | 0-2 cm | 178 | 7,99 | 0,69 | 5,18 |
| KB_TP3_1/2 | 2-4 cm | 97 | 8,02 | 0,39 | 5,20 |
| Langhausmauer, Musterfläche Mitte, rechts ca. 130 cm über GOK | | | | | |
| KB_TP3_2/1 | 0-2 cm | 751 | 7,72 | 3,71 | 0,88 |
| KB_TP3_2/2 | 2-4 cm | 687 | 7,59 | 3,35 | 1,33 |
| Langhausmauer, Musterfläche rechts, ca. 30 cm über GOK | | | | | |
| KB_TP4_1/1 | 0-2 cm | 272 | 7,65 | 2,03 | 6,33 |
| KB_TP4_1/2 | 2-4 cm | 164 | 7,92 | 1,27 | 6,35 |
| Langhausmauer, Musterfläche rechts, ca. 125 cm über GOK | | | | | |
| KB_TP4_2/1 | 0-2 cm | 767 | 7,63 | 3,85 | 1,08 |
| KB_TP4_2/2 | 2-4 cm | 688 | 7,66 | 3,23 | 1,34 |
| Langhausmauer, Musterfläche rechts, ca. 110 cm über GOK | | | | | |
| KB_R1 | 0-2 cm | 228 | 7,78 | 0,85 | 0,34 |
| KB_R/grus | 0-2 cm | 248 | 7,69 | 1,09 | 0,53 |

An Bohrmehlproben der ersten beiden Tiefenstufen aller Profile wurden die Leitfähigkeit, die Summe der wasserlöslichen Bestandteile und der pH-Wert bestimmt. Bei Betrachtung der Leitfähigkeit und der Summe der wasserlöslichen Bestandteile (Gesamtsalz) werden

allgemein sehr hohe bis geringe Werte gemessen. Erwartungsgemäß zeigt die erste Tiefenstufe die höchste Anreicherung mit Werten bis zu 3,9 Ma.-% Gesamtsalz. In Bohrmehlproben der mittleren Höhenstufe, bei ca. 130 cm, werden die höchsten Werte gemessen, bei 200 cm Höhe nehmen diese tendenziell wieder ab. Proben der unteren Höhenstufe zeigen nur geringe Werte. Dies kann mit einer Abreicherung durch starke Schädigung mit Materialverlusten in Folge der starken Durchfeuchtung im Sockelbereich sowie guten Löslichkeiten von Nitraten (und Aufstieg in größere Höhen) in Verbindung gebracht werden.

Die Ergebnisse der qualitativen und quantitativen An- und Kationenanalysen an ausgewählten Bohrmehlproben aus der Oberflächennzone (0-2 cm Tiefe) werden in der Tabelle 14 dargestellt.

Tab. 14: Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Salzanalysen an Bohrmehlproben aus oberflächennahen Bereichen und Bewertung der Anionengehalte nach WTA-MERKBLATT "MAUERWERKSDIAGNOSTIK" (1999) (rot: hoch, gelb: mittel, schwarz: gering)

| Probe | Anteile an löslichen Ionen in Ma.-% | | | | | | |
|------------|-------------------------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ |
| KB_TP1_2/1 | 0,25 | 0,092 | 0,297 | 0,064 | 0,46 | 0,12 | 1,78 |
| KB_TP1_3/1 | 0,08 | 0,129 | 0,036 | 0,023 | 0,46 | 0,06 | 1,14 |
| KB_TP2_2/1 | <0,01 | 0,230 | 0,145 | 0,039 | 0,40 | 0,12 | 1,48 |
| KB_TP2_3/1 | 0,03 | 0,125 | 0,055 | 0,010 | 0,43 | 0,04 | 0,60 |
| KB_TP3_2/1 | 0,14 | 0,225 | 0,313 | 0,041 | 0,65 | 0,11 | 0,92 |
| KB_TP4_1/1 | <0,01 | 0,195 | 0,413 | 0,057 | 0,53 | 0,03 | 0,40 |
| KB_TP4_2/1 | <0,01 | 0,352 | 0,345 | 0,054 | 0,64 | 0,11 | 1,28 |
| KB_R/grus | 0,05 | 0,050 | 0,275 | 0,017 | 0,35 | 0,02 | 0,15 |

Die Analysen der An- und Kationen ausgesuchter Bohrmehlproben (aus dem Fugenbereich) der ersten Tiefenstufe zeigen oberflächennah (0-2 cm) Salzbelastungen mit Sulfaten, die nach WTA-MERKBLATT "MAUERWERKSDIAGNOSTIK" (1999) mit „mittel“ bis „gering“ zu bewerten sind. Mit „hoch“ zu bewertende Nitratbelastungen werden in allen dem Fugenbereich entnommenen Proben analysiert. Auch mit „gering“ zu bewertende Chloridbelastungen liegen vor. In Korrelation mit den analysierten Kationen sind Bildungen der Schadsalze Kaliumnitrat, Magnesiumsulfat und untergeordnet Natriumchlorid sowie Mischsalze möglich.

Die oberflächlich entnommenen Salzausblühungen wurden mittels Röntgenpulverdiffraktometrie untersucht, die Ergebnisse zeigt Tabelle 15.

Tab. 15: Ermittelter Phasenbestand des mittels XRD untersuchten Probematerials

| Probennummer | Phasenbestand/Zuordnung | Bauschädigende Salze |
|---|---|--|
| KB_ES1 Ausblühsalzprobe, 55 cm ü. GOK | Niter (Kaliumnitrat) KNO_3 : Ausblühsalz Hexahydrat $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$: Hauptphase Epsomit $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ Calcit: Mörtel Quarz: Mörtel | Hexahydrat $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Epsomit $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ Kaliumnitrat KNO_3 |
| KB_ES2 Ausblühsalzprobe, 175 cm ü. GOK | Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Gipskruste Hexahydrat $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Epsomit $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: Hauptphase Calcit: Mörtel | Epsomit $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ Hexahydrat $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ |

XRD-Analysen, die an zwei Ausblühsalzproben (aus unterschiedlichen Höhen entnommen) durchgeführt wurden, zeigen sowohl Gips als auch das stark hygroskopische Kaliumnitrat sowie die Magnesiumsulfat-Hydrate Hexahydrat ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) und Epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Diese Magnesiumsulfat-Hydrate sind als besonders bauschädigende Salze einzustufen. Eine Schädigung der Oberflächen erfolgt in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte, infolge eines Hydratstufenwechsels bzw. durch wechselnde Lösungs- und Kristallisationsvorgänge. Die Herkunft des Magnesiums liegt erfahrungsgemäß im dolomitischen Setzmörtel (SIEDEL 2013). Der Eintrag von Sulfat kann über die Umwelt, aber auch später durch den zementhaltigen Ergänzungsmörtel erfolgt sein. Der Magnesiumsulfathydrat-Hauptphasenbestand in beiden Ausblühsalzproben unterscheidet sich. In der unteren Höhenstufe (55 cm über GOK) überwiegt Hexahydrat ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) und in der oberen Höhenstufe (175 cm über GOK) Epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), was, bei Vernachlässigung anderer beeinflussender Faktoren, für zwei zum Zeitpunkt der Probenahme unterschiedliche Mikroklimabereiche an der Langhausmauer sprechen könnte und natürlich für die stark schädigende Wirkung des Salzes steht.

Die ausgewählte Mustermauer ist auf Grund der erhöhten bis hohen Feuchtebelastung im Sockelbereich und der hohen Belastung mit stark bauschädigenden Salzen wie Kaliumnitrat und Magnesiumsulfat hervorragend für die Anlage der unterschiedlichen Heißkalkmörtelmuster geeignet. Sie stellt eine typische Belastung eines historischen Gebäudes in Sachsen, im Verbreitungsgebiet der Dolomitmörtel dar.

3.3.3 Mörteluntersuchungen am Bestand der Langhausmauer

3.3.3.1 Probenahme

Zur Bewertung der historischen Bestandsmörtel wurden chemische Mörtelanalysen (MEHLMANN 1993) und Bestimmungen der Sieblinien der Zuschlagstoffe (Gesteinskörnungen) durchgeführt. Dazu wurden am 18.09.2017 zwei Proben aus dem historischen Mauerwerk entnommen (Tabelle 16, Abbildung 49 und 50).

Tab. 16: Untersuchte historische Mörtel aus der südlichen Langhauswand der ehem. Klosterkirche

| Probennummer | Entnahmeort und Material | Farbe | Analysen |
|--------------|--|--------------------|---|
| KB_M1 | Kloster Buch, historischer Putz- und Fugenmörtel, Langhauswand Südseite | weiß bis hellbeige | chemische Mörtelanalyse, Erstellung einer Sieblinie |
| KB_M2 | Kloster Buch, historischer, roter Setzmörtel, westliche Flanke des Durchbruchs in der Langhauswand | rötlich-beige | chemische Mörtelanalyse, Erstellung einer Sieblinie |



Abb. 49: Kloster Buch, südliche Langhauswand, Südseite: Probenahmepunkt M1 (historischen Putz- und Fugenmörtel)



Abb. 50: Kloster Buch, südliche Langhauswand, Durchbruch an der Ostseite: Probenahmepunkt M1 (historischen Putz- und Fugenmörtel)

3.3.3.2 Ergebnisse und Interpretation

Die Ergebnisse der chemischen Mörtelanalyse und der thermischen Zersetzungsanalyse werden in den Tab. 17 und 18 angegeben. Die thermische Zersetzung der Proben veranschaulicht die Abbildung 51. Die Ergebnisse der Siebanalyse der jeweiligen Gesteinskörnungen (Zuschlagstoffe) sind in der Abbildung 52 bis 55 grafisch dargestellt.

Tab. 17: Ergebnisse der chemischen Mörtelanalyse in Ma.-%

| Probe | Glühverlust bei 1100°C | HCl-unlöslich + -löslich SiO ₂ | HCl-unlöslich | HCl-löslich SiO ₂ | Me ₂ O ₃ | CaO | MgO | CO ₂ | SO ₃ |
|-------|------------------------|---|---------------|------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|-----------------|
| KB_M1 | 20,50 | 52,15 | 48,53 | 3,62 | 2,06 | 12,88 | 8,16 | 13,36 | 3,07 |
| KB_M2 | 8,52 | 80,66 | 78,57 | 2,10 | 2,34 | 4,35 | 2,72 | 3,38 | 0,38 |

Tab. 18: Prozentuale Berechnung der salzsäurelöslichen Bestandteile und des Glühverlustes auf die Summe aller salzsäurelöslichen Probenbestandteile in Ma.-%

| Probe | Glühverlust bei 1100°C | HCl-löslich SiO ₂ | Me ₂ O ₃ | CaO | MgO | CO ₂ | SO ₃ | CaO/SiO ₂ | CaO freies |
|-------|------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-----------------|-----------------|----------------------|------------|
| KB_M1 | 39,83 | 7,03 | 4,00 | 25,02 | 15,85 | 25,96 | 5,96 | 3,56 | 10,00 |
| KB_M2 | 39,76 | 9,80 | 10,92 | 20,30 | 12,69 | 15,77 | 1,77 | 2,07 | 16,76 |

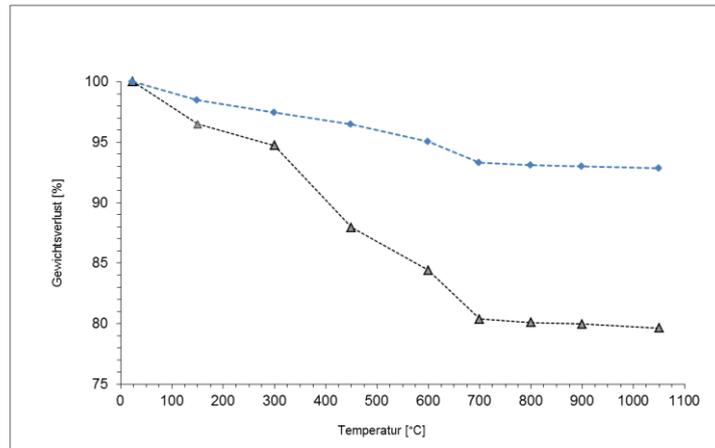


Abb. 51: Gewichtsverlust der Proben KB_M1 (schwarze Kurve) und KB_M2 (blaue Kurve) durchthermische Zersetzung, bezogen auf den Bindemittelgehalt der Probe, in Ma.-%

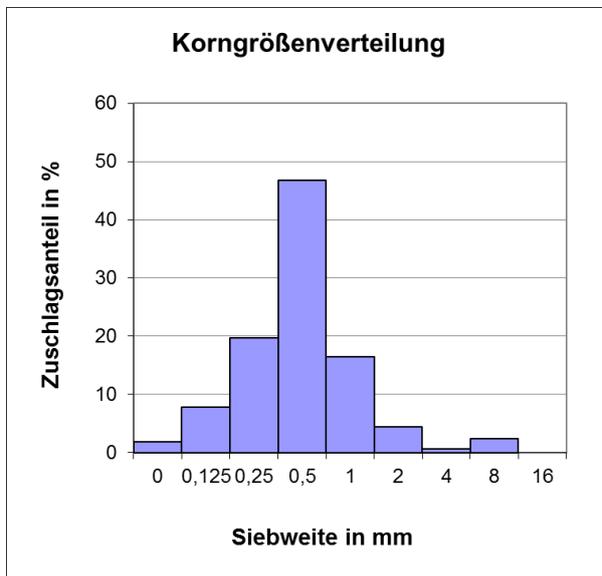


Abb. 52: KB_M1-Korngrößenverteilung

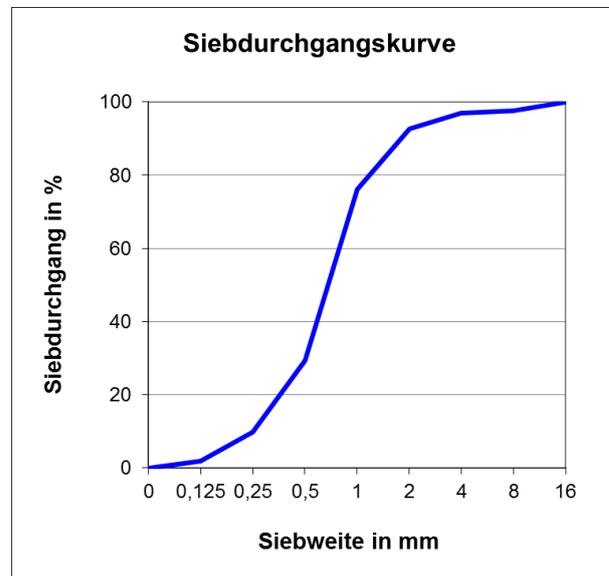


Abb. 53: KB_M1-Siebdurchgangskurve

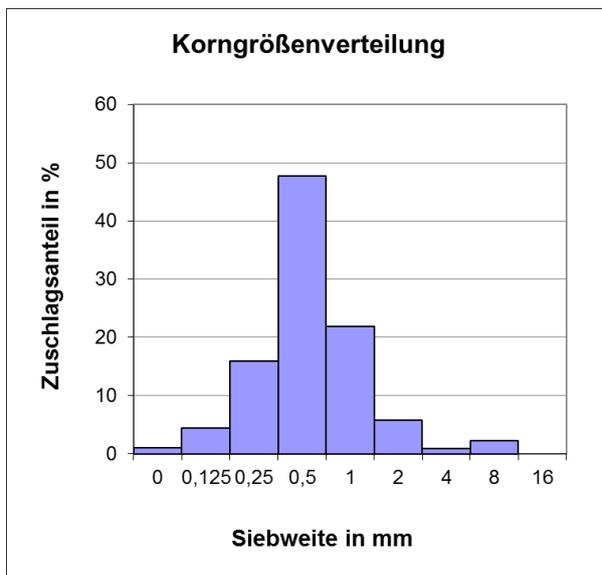


Abb. 54: KB_M2-Korngrößenverteilung

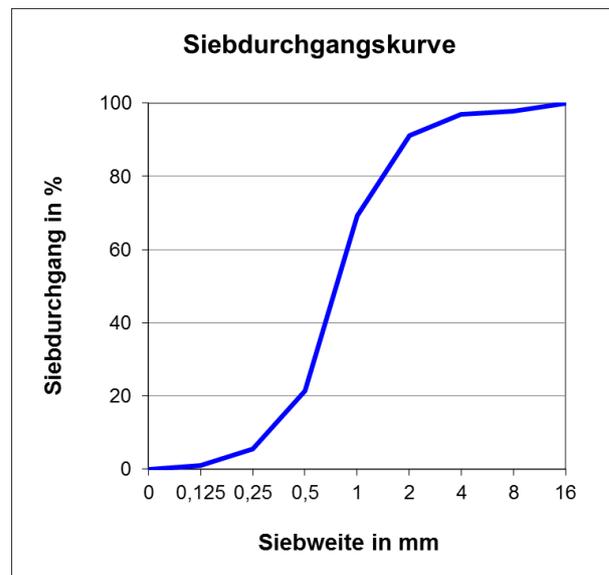


Abb. 55: KB_M2-Siebdurchgangskurve

Die Ergebnisse werden in der Tabelle 19 zusammengefasst. Bei beiden Mörteln, Putz- und Fugenmörtel sowie Setzmörtel handelt es sich um dolomitreiche, hydraulische Mörtel mit einem sehr ähnlichem Zuschlag. Die hohen Gehalte an Mg-Ionen sind typisch für historische Putze, die im Abbauggebiet dolomitischer Kalke verarbeitet wurden. Der Putz- und Fugenmörtel zeigt oberflächennah eine starke Vergipsung, die auf einen Eintrag von Sulfat über die Umwelt hinweist.

Der deutlichste Unterschied zwischen beiden Mörteln besteht im Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis. Der Putz- und Fugenmörtel zeigt mit einem B-Z-Verhältnis (in Volumenteilen) von 1: 0,7 einen sehr hohen Bindemittelgehalt, während der Setzmörtel mit einem B-Z-Verhältnis (in Volumenteilen) von 1: 2,7 viel magerer eingestellt wurde. Des Weiteren werden nach makroskopischen Untersuchungen im Gefüge des Setzmörtels tonig-schluffige Bestandteile festgestellt, die vermutlich mit dem Zuschlag zugegeben wurden und neben der roten Farbe eine weitere Abmagerung bewirkten. Diese Bestandteile werden im HCl-Aufschluss der chemischen Mörtelanalyse teilweise mit erfasst und dem hydraulischen Anteil zugerechnet (ZÖTZL & OELSNER 2016). Bei Beachtung dieser Gegebenheit wird von ähnlichen Kalkrohstoffqualitäten bei Setz- und Fugenmörtel ausgegangen. Des Weiteren zeigt das Bindemittel des Putz- und Fugenmörtels einen etwas höheren Gehalt an Sulfat und MgO als das des Setzmörtels.

Tab. 19: Zusammengefasste Ergebnisse der Mörteluntersuchungen

| Probennummer | Entnahmeort | Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis | Beschreibung |
|--------------|------------------------------------|---|---|
| KB_M1 | Historischer Putz- und Fugenmörtel | - bezogen auf hydraulischen Kalk und Quarzsandzuschlag, in Volumenteilen: ca. 1: 0,7* | <ul style="list-style-type: none"> - hydraulischer Kalkmörtel - erhöhte hydraulische Anteile - sehr hohe Magnesiumoxidgehalte (Dolomitkalk) - Quarzsandzuschlag 0/4, Überkorn bis 16 mm - hoher Sulfatgehalt im Bindemittel (Vergipsung der Oberfläche) - Zuschlag: - Komponenten: Quarz, Feldspat, Kieselschiefer, Quarzit, Glimmerschiefer, Hellglimmer, wenig Ziegelsplitt - Kornform: gedrunge, oft plattig - Rundung: kantig bis kantengerundet - Farbe der angeschlagenen Oberfläche: beige, Oberfläche zeigt einen Rotschleier |
| KB_M2 | Historischer Setzmörtel | - bezogen auf hydraulischen Kalk und Quarzsandzuschlag, in Volumenteilen: ca. 1:2,7* | <ul style="list-style-type: none"> - hochhydraulischer Kalkmörtel - hohe hydraulische Anteile - sehr hohe Magnesiumoxidgehalte - Quarzsandzuschlag 0/4, Überkorn bis 16 mm - geringer Sulfatgehalt im Bindemittel (Vergipsung der Oberfläche im Bereich des Abbruchs) - Zuschlag: - Komponenten: Quarz, Feldspat, Kieselschiefer, Quarzit, Glimmerschiefer, Hellglimmer - Kornform: gedrunge, oft plattig - Rundung: kantig bis kantengerundet - Farbe der angeschlagenen Oberfläche: rötlich-beige |

*Schüttdichte für NHL von 0,6 kg/dm³

Die Nachstellung der Mörtel kann sich am historischen oder modernen Vorbild orientieren. Für den Zuschlag wird ein Quarzsand aus einer regionalen Grube empfohlen. Das IDK-Sandkataster steht zur Verfügung (ZÖTZL et al. 2013). Das Mischungsverhältnis sollte auf moderne Bindemittel (Oberfläche, Schüttdichte) abgestimmt werden.

3.3.4 Untersuchungen an Ausgangsstoffen für die Heißkalkbereitung an Musterflächen in Kloster Buch

3.3.4.1 Probenahme

Im Vorfeld der Heißkalkbereitung war es interessant zu wissen, ob die eingesetzten Baustoffe ggf. selbst Träger von löslichen Salzen bzw. Schadsalzen sein könnten, die sie ins Mauerwerk eintragen. Weiterhin sollte die Feuchte der als Schüttgut verwendeten Baustoffe (Quarzsand, Bimssand, Ziegelmehl) ermittelt werden (ZÖTZL 2017c).

Die Proben für die Untersuchung der Ausgangsstoffe wurden dem Material entnommen, das durch A. Fenzke für die Herstellung von Heißkalkmischungen für die anzulegenden Musterflächen bereitgestellt wurde. Hierbei handelt es sich um Baustoffe, die sich bereits in der Praxis zur Heißkalkbereitung bewährt hatten und an verschiedenen Objekten eingesetzt worden sind. Als Gesteinskörnung wurden jedoch lokale Sande beprobt, aus denen einer ausgewählt werden sollte, um dem historischen Bestandsmörtel möglichst zu entsprechen (s.o.). Die Probenahme der Sande erfolgte am 13.07.2017 durch T. Köberle und T. Schmidt in der nahegelegenen Sand- und Kiesgrube Zschaitz (KÖBERLE 2017). Weiterhin wurden die von A. Fenzke für Heißkalkmischungen verwendeten Zusatzstoffe Bimssand, Ziegelsand sowie der Branntkalk der Firma SCHAEFER, Precal 30S, untersucht. Die Tabelle 20 beschreibt die Proben.

Tab. 20: Probenübersicht für Feuchte- und Salzuntersuchungen

| Probe | Bezeichnung Sande: interner Name | Fragestellung |
|---|-------------------------------------|---|
| Gesteinskörnungen (Zuschläge), lokale Zschaitzer und Salbitzer Sande | | |
| Probe 1 | Zschaitz BRAUN | Feuchte, reduzierte Salzanalyse, An- und Kationenanalyse |
| Probe 2 | Zschaitz FROSTSCHUTZ GRAUBRAUN | Feuchte, reduzierte Salzanalyse, An- und Kationenanalyse |
| Probe 3 | Zschaitz - GELB | Feuchte, reduzierte Salzanalyse |
| Probe 4 | Zschaitz KIESSAND | Feuchte, reduzierte Salzanalyse |
| Probe 5 | Salbitz - GELB | Feuchte, reduzierte Salzanalyse |
| Probe 6 | Salbitz - ROT | Feuchte, reduzierte Salzanalyse |

Fortsetzung der Tabelle, auf der nächsten Seite.

| Bindemittel und Zusätze | | |
|----------------------------|---|--|
| Bimssand | Bimssand, Bisorock Siebbims 0-4 mm Dr. Carl Riffer GmbH & Co. KG Baustoffwerke 56218 Mülheim-Kärlich | Feuchte, reduzierte Salzanalyse, An- und Kationenanalyse |
| Ziegelsand | Ziegelsand 0-4 mm, Mahlwerk Ernst Letschert KG, 56235 Ransbach-Baumbach | Feuchte, reduzierte Salzanalyse, An- und Kationenanalyse, XRD |
| Ziegel-sand_Dach | Ziegelsplitt Dach Fenzke | XRD |
| SCHAEFER-Precal 30S | CaO, CL 90 | reduzierte Salzanalyse, An- und Kationenanalyse |

3.3.4.2 Ergebnisse und Interpretation

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Materialfeuchte und zur Summe der löslichen Bestandteile werden in der Tabelle 21 dargestellt. Tabelle 22 zeigt Ergebnisse der qualitativen und quantitativen An- und Kationenanalysen an ausgesuchten Proben.

Tab. 21: Ergebnisse der Untersuchung von Feuchte und wasserlöslichen Bestandteilen

| Probe | Einwaage [g] | Lf ₂₅₀ [µS/cm] | pH [-] | ∑ wasserlösli. Bestandteile [Ma.-%] | Feuchte [Ma.-%] |
|----------------------------|-----------------|------------------------------|-----------|---|--------------------|
| Probe 1 | 5,00 | 29 | 8,20 | <0,12 | 3,96 |
| Probe 2 | 5,18 | 14 | 8,14 | 0,14 | 3,41 |
| Probe 3 | 5,00 | 7 | 8,14 | <0,12 | 3,52 |
| Probe 4 | 5,00 | 8 | 7,94 | <0,12 | 2,72 |
| Probe 5 | 5,00 | 16 | 8,03 | <0,12 | 4,90 |
| Probe 6 | 5,00 | 10 | 8,06 | <0,12 | 8,20 |
| Bimssand | 5,00 | 11 | 7,79 | 0,14 | 21,92 |
| Ziegelsand | 5,00 | 13 | 7,80 | <0,12 | 0,02 |
| SCHAEFER-Precal 30S | 5,00 | 2050 | 10,69 | 3,93 | n.b. |

Tab. 22: Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Salzanalysen an den Bohrmehlproben

| Probe | Anteile an löslichen Ionen in Ma.-% | | | | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ |
| Probe 1 | 0,03 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |
| Probe 2 | 0,02 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |
| Bimssand | <0,01 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |
| Ziegelsand | 0,02 | 0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |
| SCHAEFER-Precal 30S | 0,42 | 0,095 | 0,007 | <0,005 | <0,01 | 0,02 | 0,01 |

Die Sande aus der Grube Zschaitz zeigen keine auffällig hohen Feuchtwerte zwischen 3 und 4 Ma.-%, wobei die Salbitzer Sande etwas höhere Feuchten von 5 bis 8 Ma.-% aufweisen, die auf den augenscheinlich höheren Ton- und Schluffanteil zurückgeführt werden können. Die Sande enthalten keine auffälligen löslichen Bestandteile oder

Schadssalzionengehalte. Es wird jedoch empfohlen, die Sande mit den geringeren Ton-Schluffanteilen aus der Grube Zschaitz zu verwenden.

Weiterhin wurden die Zusätze Bimssand und Ziegelsplitt untersucht. Der Bimssand zeigt einen hohen Feuchtegehalt von ca. 22 Ma.-%, der hauptsächlich auf die hohe Oberfläche des Materials zurückgeführt werden kann. Der Ziegelsplitt ist trocken und zeigt eine Materialfeuchte von 0,02 Ma.-%. Beide Zusätze enthalten keine auffälligen löslichen Bestandteile oder Schadssalzionengehalte.

Tab. 23: SCHAEFER-Precal 30S, Ergebnisse der An- und Kationenanalyse

| Probe | Anteile an löslichen Ionen in Ma.-% | | | | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ |
| SCHAEFER-Precal 30S | 0,42 | 0,095 | 0,007 | <0,005 | <0,01 | 0,02 | 0,01 |

Die Untersuchungen des Bindemittelrohstoffs, Branntkalk Precal 30S (CaO) der Firma SCHAEFER, erfolgten nach Löschen in entionisiertem Wasser am Eluat. Es werden erwartungsgemäß eine hohe Leitfähigkeit, ein hoher Anteil an löslichen Bestandteilen und ein relativ hoher pH-Wert von 10,7 festgestellt. Die An- und Kationenanalysen (Tabelle 23) zeigen einen sehr geringen Chloridgehalt von 0,02 Ma.-%, der vermutlich auf die Verwendung chloridhaltiger Brennstoffe zurückzuführen ist.

Auffällig ist ein deutlicher Magnesium-Ionengehalt im Bindemittel von 0,095 Ma.-%. Mobile Magnesium-Ionen können in sulfatbelastetem Mauerwerk zur Bildung von bauschädigenden Magnesium-Sulfat-Salzen führen. Allerdings wird der Gehalt in der Gesamt-Mörtelrezeptur durch die Zugabe der Sandzuschläge und Bims- bzw. Ziegelsand-Zusätze erheblich reduziert. Damit kann der Branntkalk für die Verwendung an den Musterflächen freigegeben werden. Eine Schadssalzanalyse des abgebundenen Kalkmörtels sollte nach ausreichender Standzeit erfolgen.

Tabelle 24 zeigt die Ergebnisse der Röntgenpulverdiffraktometrie an den Ziegelsandproben.

Tab. 24: Ermittelter Phasenbestand des mittels XRD untersuchten Probematerials

| Probennummer | Phasenbestand/Zuordnung |
|---|---|
| Ziegelsand Letschert 0-3 mm | Quarz Mullit Hämatit |
| Ziegelsand_Altes Dach 0-3 mm | Quarz Mullit Hämatit Mikroclin |

Beide Ziegelsplittzusätze wurden mittels XRD untersucht. Dabei werden in beiden Proben geringe Anteile der keramischen Phase Mullit festgestellt. Die Probe der Firma Letschert zeigt einen deutlicheren Anteil Mullit. Die Mullitphasenbildung steht für hohe Brenntemperaturen. Eine hydraulische Reaktion dieses Ziegelsplitts im basischen Milieu wird eher für unwahrscheinlich gehalten. Möglicherweise erfolgen geringfügige

Grenzflächenreaktionen. Vielmehr wirkt dieser vermutlich als Stützkorn und zur schnellen Reduzierung des Anmachwassers durch Benetzung des hohen Feinkornanteils.

3.3.5 Anlage der Musterflächen und Nachuntersuchungen

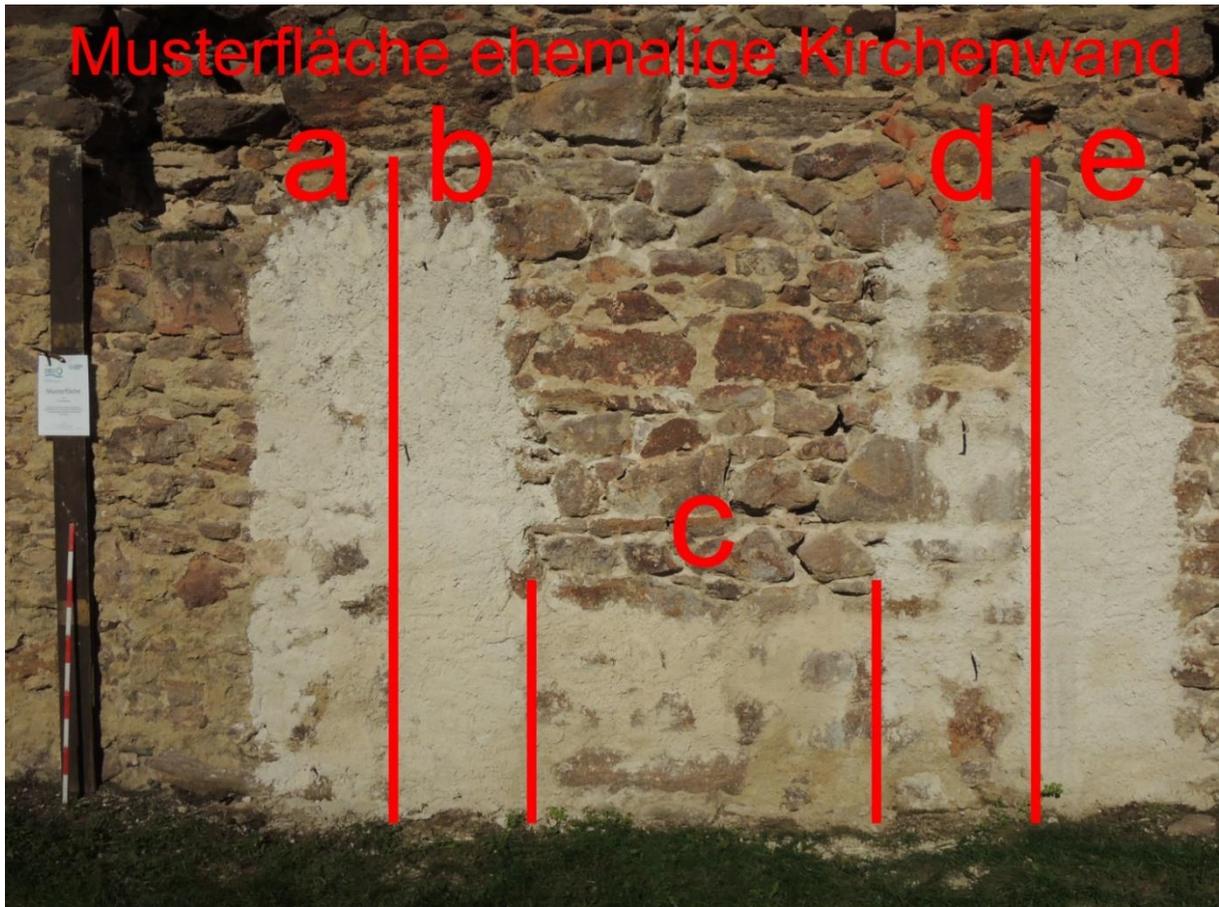
3.3.5.1 Anlage und Dokumentation der Musterfläche

Im Nachgang des ersten Workshops am 30. 09. 2017 wurden 12 Musterflächen mit verschiedenen Rezepturen (Heißkalkmörtel (HK) und zum Vergleich trocken gelöschter Kalkmörtel (TK) an der südlichen Langhausmauer der Klosterkirche in Kloster Buch durch A. Fenzke und T. Schmidt angelegt (Abbildung 56).



Abb. 56: Kloster Buch, Anlage und Dokumentation der Musterflächen zum Vergleich Heißkalkmörtel (HK) und trocken gelöschter Kalkmörtel (TK) am 30.09.2017 im Rahmen des 1. Heißkalkworkshops an der Südwand des ehemaligen Langhauses (Langhausmauer)

Sie sind in den Abbildungen 57 und 58 mit den entsprechenden verwendeten Rezepturen dokumentiert.



Untergrund: ehemaliger DDR-Putz

- a: Heißkalk, Fugen berappt: Mischung 1
- b: Heißkalk, Fugen berappt, Oberputz: Mischung 1
- c: Heißkalk, Fugen berappt: Mischung 3
- d: Trocken gelöscht, Fugen berappt: Mischung 5
- e: Trocken gelöscht, Fugen berappt, Oberputz: Mischung 5

Mischung 1: 1 RT Precal CL 90, 5 RT Frostschuttsand der Sandgrube Zschaitz 0-8 mm, 0,6 RT Wasser

Mischung 3: 0,5 RT Precal CL 90, 0,5 RT NHL 2 Otterbein, 5 RT Frostschuttsand der Sandgrube Zschaitz 0-8 mm, 1 RT Wasser

Mischung 5: 1 RT Precal CL 90, 5 RT Frostschuttsand der Sandgrube Zschaitz 0-8 mm, 2 RT Wasser + etwas Wasser zum Einstellen

Abb. 57: Kloster Buch, südliche Langhausmauer der ehem. Klosterkirche mit Musterflächen, Bereich links mit einem Kalk-Zementputz-Untergrund (Foto, Bearbeitung und Text: T. Köberle)



Untergrund: original Mauerwerk

- f: Trocken gelöscht, Fugen berappt: Mischung 5
- g: Trocken gelöscht, Fugen berappt: Mischung 4
- h: Trocken gelöscht, Fugen berappt, Oberputz: Mischung 5
- i: Heißkalk, Fugen berappt: Mischung 1
- j: Heißkalk, Fugen berappt: Mischung 2
- k: Heißkalk, Fugen berappt, Oberputz: Mischung 1

Mischung 1: 1 RT Precal CL 90, 5 RT Frostschuttsand der Sandgrube Zschaitz 0-8 mm, 0,6 RT Wasser

Mischung 2: 1 RT Precal CL 90, 2,5 RT Frostschuttsand der Sandgrube Zschaitz 0-8 mm,, 2,5 RT Bims, 0,7 RT Wasser

Mischung 4: 1 RT Precal CL 90, 4 RT Frostschuttsand der Sandgrube Zschaitz 0-8 mm, 1 RT Bims, 2 RT Wasser

Mischung 5: 1 RT Precal CL 90, 5 RT Frostschuttsand der Sandgrube Zschaitz 0-8 mm, 2 RT Wasser + etwas Wasser zum Einstellen

Abb. 58: Kloster Buch, Langhausmauer mit Musterflächen, Bereich rechts mit historischem Fugenmörtel im Untergrund (Foto, Bearbeitung und Text: T. Köberle)

Nach ca. einem Jahr Standzeit der Musterflächen erfolgten an mit den Voruntersuchungen vergleichbaren Probenahmepunkten (siehe Abschnitt 3.3.1) in den relevanten Bereichen Nachuntersuchungen und Bewertungen der Oberflächen.

3.3.5.2 Nachuntersuchungen an Musterflächen

Ziel der Nachuntersuchungen (Tabelle 25) ist die vergleichende Bewertung der Musterflächen aus Heißkalkmörtel und trocken gelöschtem Kalkmörtel. Die im Bericht beschriebenen Nachuntersuchungen erfolgten am 07.11.2018 und am 19.03.2019 am Objekt, weitere Analysen später im Labor des IDK in Halle.

In einem ersten Schritt wurden die Oberflächen der 12 Putzflächen mit verschiedenen Rezepturen/Ausführungstechniken begutachtet. Nach 12 Monaten erfolgten an allen Musterflächen in zwei Höhen vergleichende Untersuchungen zum Absanden der Putzoberflächen in den Höhenstufen 20 cm bis 30 cm (UNTEN) und 160 cm bis 170 cm (OBEN) durch Abpinseln (10 x horizontal, 10 x vertikal) einer Fläche von 10 x 10 cm.

Tab. 25: Untersuchungen an Musterflächen, Übersicht

| Untersuchungen an Musterflächen |
|--|
| Begutachtung nach 6, 12 und 18 Monaten |
| Nachuntersuchungen der Feuchte und Salzbelastung nach 12 Monaten |
| Abriebversuch mit Pinsel nach 12 Monaten |
| Prüfung der Carbonatisierungstiefe nach 18 Monaten |

Ebenfalls nach 12 Monaten erfolgten erneute Bohrmehlprobenahmen an mit den Voruntersuchungen vergleichbaren Probenahmepunkten und Tiefenstufen (Abbildung 59 und 60) bis in eine Tiefe von 10 cm. Weiterhin wurden 18 Monate nach der Applikation Prüfungen zur Carbonatisierungstiefe mit Phenolphthalein vorgenommen.

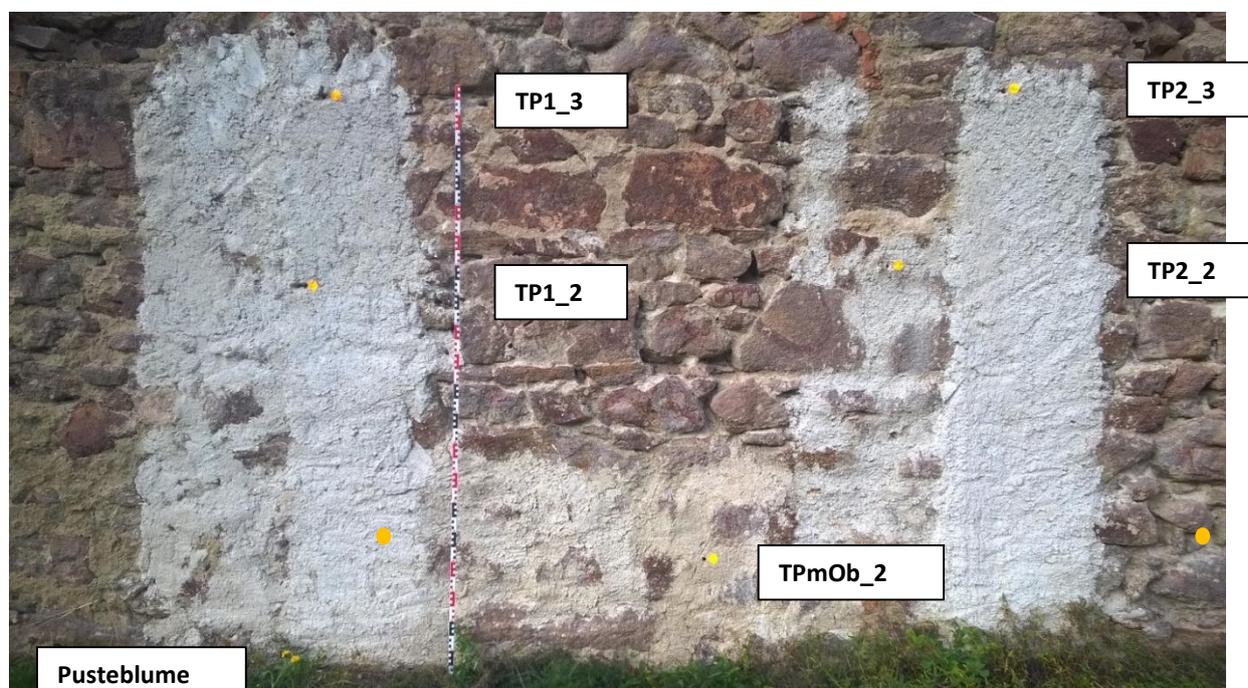


Abb. 59: Kloster Buch, Langhausmauer mit Musterflächen, westlicher Teil, Nachuntersuchungen, Probenahmepunkte KB_TP1_2 (links, ca. 135 cm über GOK), KB_TP1_3 (ca. 200 cm über GOK), KB_TPmOb_2 (ca. 45 cm über GOK), KB_TP2_2 (ca. 140 cm über GOK), KB_TP2_3 (ca. 200 cm über GOK)

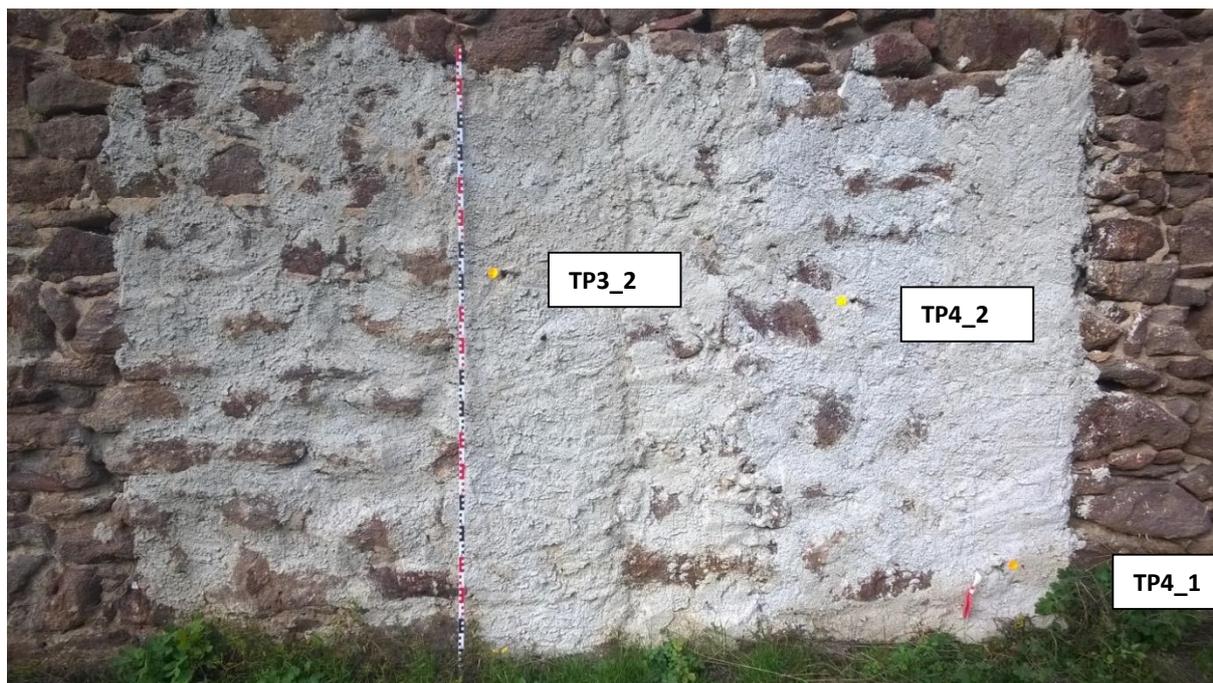


Abb. 60: Kloster Buch, Langhausmauer mit Musterflächen, östlicher Teil, Nachuntersuchungen, Probenahmepunkte KB_TP3_2 (ca. 130 cm über GOK), KB_TP4_1 (ca. 30 cm über GOK), KB_TP4_2 (ca. 125 cm über GOK)

3.3.5.3 Ergebnisse und Interpretation

Die Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen sowie der Bestimmung wasserlöslicher Bestandteile an Bohrmehlproben werden in der Tabelle 26 gezeigt und zum Vergleich gemeinsam mit den Werten der Voruntersuchungen dargestellt.

Tab. 26: Vergleich der Ergebnisse zu Feuchte und löslichen Bestandteilen aus Vor- und Nachuntersuchungen

| Probe | Tiefe [cm] | Lf ₂₅₀ [μS/cm] | pH [-] | ∑ wasserlös. Bestandteile [Ma.-%] | Feuchte [Ma.-%] |
|--|---------------|------------------------------|-----------|---|--------------------|
| Langhausmauer, Musterfläche links, ca. 135 cm über GOK (Muster b, M1, HK Fugen berappt, Oberputz HK M1) | | | | | |
| Voruntersuchung | 0-2 | 573 | 8,43 | 3,00 | 1,19 |
| Nachunt. KB_TP1_2/1 | 0-2 | 36 | 8,86 | <0,12 | 0,18 |
| Voruntersuchung | 2-4 | 260 | 8,44 | 1,68 | 1,78 |
| Nachunt. KB_TP1_2/2 | 2-4 | 45 | 8,79 | 0,14 | 0,29 |
| | | | | | |
| Nachunt. KB_TP1_2/3 | 4-6 | 795 | 10,12 | 1,45 | 0,34 |
| Nachunt. KB_TP1_2/4 | 6-10 | 148 | 9,50 | 0,52 | 0,83 |
| Langhausmauer, Musterfläche links, ca. 200 cm über GOK (Muster b, HK M1 Fugen berappt, Oberputz HK M1) | | | | | |
| Voruntersuchung | 0-2 | 490 | 8,47 | 2,25 | 1,02 |
| Nachunt. KB_TP1_3/1 | 0-2 | 21 | 9,75 | <0,12 | 0,31 |
| Voruntersuchung | 2-4 | 259 | 8,44 | 1,55 | 2,48 |
| Nachunt. KB_TP1_3/2 | 2-4 | 50 | 8,73 | <0,12 | 0,52 |
| | | | | | |
| Nachunt. KB_TP1_3/3 | 4-6 | 142 | 8,37 | 0,53 | 0,98 |
| Nachunt. KB_TP1_3/4 | 6-10 | 196 | 8,02 | 0,88 | 1,46 |
| Langhausmauer, Musterfläche Mitte, links, ca. 140 cm über GOK (Muster d, TK M5 Fugen berappt) | | | | | |
| Voruntersuchung | 0-2 | 522 | 8,20 | 2,29 | 1,13 |
| Nachunt. KB_TP2_2/1 | 0-2 | 249 | 8,24 | 1,19 | 0,51 |
| Voruntersuchung | 2-4 | 259 | 8,30 | 1,37 | 1,32 |
| Nachunt. KB_TP2_2/2 | 2-4 | 250 | 7,96 | 1,21 | 0,76 |
| | | | | | |
| Nachunt. KB_TP2_2/3 | 4-6 | 251 | 7,82 | 1,19 | 0,85 |
| Nachunt. KB_TP2_2/4 | 6-10 | 220 | 7,74 | 0,89 | 0,96 |
| Langhausmauer, Musterfläche Mitte, links, ca. 200 cm über GOK (Muster e, TK Fugen berappt, Oberputz TK) | | | | | |
| Voruntersuchung | 0-2 | 260 | 8,30 | 1,51 | 1,32 |
| Nachunt. KB_TP2_3/1 | 0-2 | 26 | 8,33 | <0,12 | 0,29 |
| Voruntersuchung | 2-4 | 197 | 8,36 | 0,79 | 2,11 |
| Nachunt. KB_TP2_3/2 | 2-4 | 42 | 7,83 | 0,15 | 0,83 |
| | | | | | |
| Nachunt. KB_TP2_3/3 | 4-6 | 79 | 7,46 | 0,27 | 1,16 |
| Nachunt. KB_TP2_3/4 | 6-10 | 110 | 7,45 | 0,43 | 0,79 |

| Langhausmauer, Musterfläche Mitte, rechts ca. 130 cm über GOK (Muster e, TK Fugen berappt, Oberputz M5) | | | | | |
|---|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Voruntersuchung | 0-2 | 751 | 7,72 | 3,71 | 0,88 |
| Nachunt. KB_TP3_2/1 | 0-2 | 48 | 7,78 | 0,13 | 0,18 |
| Voruntersuchung | 2-4 | 687 | 7,59 | 3,35 | 1,33 |
| Nachunt. KB_TP3_2/2 | 2-4 | 151 | 8,24 | 0,56 | 0,35 |
| | | | | | |
| Nachunt. KB_TP3_2/3 | 4-6 | 251 | 7,37 | 0,96 | 0,55 |
| Nachunt. KB_TP3_2/4 | 6-10 | 252 | 7,22 | 1,14 | 0,84 |
| Langhausmauer, Musterfläche rechts, ca. 30 cm über GOK (Muster k, HK Fugen berappt, Oberputz HK M1) | | | | | |
| Voruntersuchung | 0-2 | 272 | 7,65 | 2,03 | 6,33 |
| Nachunt. KB_TP4_1/1 | 0-2 | 47 | 7,85 | <0,12 | 0,39 |
| Voruntersuchung | 2-4 | 164 | 7,92 | 1,27 | 6,35 |
| Nachunt. KB_TP4_1/2 | 2-4 | 94 | 8,14 | 0,46 | 0,65 |
| | | | | | |
| Nachunt. KB_TP4_1/3 | 4-6 | 121 | 7,51 | 0,49 | 2,79 |
| Nachunt. KB_TP4_1/4 | 6-10 | 120 | 7,35 | 0,36 | 3,89 |
| Langhausmauer, Musterfläche rechts, ca. 125 cm über GOK (Muster j, HK M2 (Bims) Fugen berappt) | | | | | |
| Voruntersuchung | 0-2 | 767 | 7,63 | 3,85 | 1,08 |
| Nachunt. KB_TP4_2/1 | 0-2 | 23 | 7,86 | <0,12 | 0,23 |
| Voruntersuchung | 2-4 | 688 | 7,66 | 3,23 | 1,34 |
| Nachunt. KB_TP4_2/2 | 2-4 | 65 | 8,37 | 0,29 | 0,32 |
| | | | | | |
| Nachunt. KB_TP4_2/3 | 4-6 | 1599 | 9,47 | 3,07 | 0,29 |
| Nachunt. KB_TP4_2/4 | 6-10 | 783 | 8,58 | 2,06 | 0,67 |
| Zusätzliches TP, ohne Voruntersuchung Langhausmauer, Musterfläche links, ca. 45 cm über GOK (Muster c, HK (Ob) Fugen berappt) | | | | | |
| KB_TPmOb_2/1 | 0-2 | 90 | 8,12 | 0,44 | 1,09 |
| KB_TPmOb_2/2 | 2-4 | 31 | 8,36 | 0,21 | 2,04 |
| KB_TPmOb_2/3 | 4-6 | 49 | 8,02 | <0,12 | 5,85 |
| KB_TPmOb_2/4 | 6-10 | 63 | 7,52 | 0,16 | 8,26 |

Auffällig waren bei einigen Profilen der Voruntersuchung oberflächennah leicht erhöhte Feuchten, die auf eine Belastungen mit hygroskopischen Salzen zurückgeführt wurden. Diese wurden bei den Nachuntersuchungen nicht nachgewiesen. Bis in eine Tiefe von 4 cm werden nur sehr geringe Feuchten festgestellt (Abbildung 61). Die Tabelle 26 zeigt einen Vergleich der Feuchten aber auch der Gehalte an löslichen Salzen. Hier wird bereits eine geringfügige Anreicherung in den Neuputtoberflächen festgestellt. Diese ist im Profil TP2_2 besonders hoch. Die Analysen der An- und Kationen von Bohrmehlproben der ersten beiden Tiefenstufen zeigen oberflächennah Salzbelastungen mit Nitraten, die nach WTA-Merkblatt „Mauerwerksdiagnostik“ mit „mittel“ bis „hoch“ zu bewerten sind (Tabelle 27). Auch das Profil TPmOb_2/1 zeigt oberflächennah eine mit „mittel“ einzustufende Nitratbelastung.

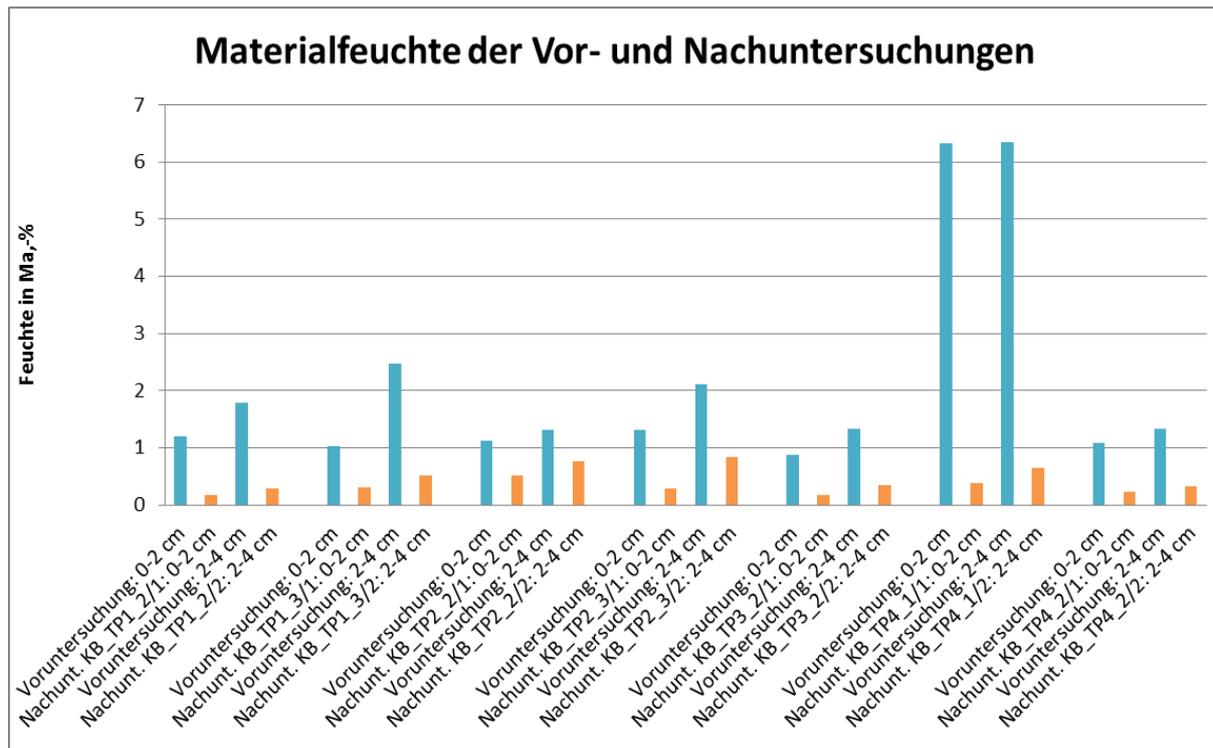


Abb. 61: Kloster Buch, Feuchteverteilung, Materialfeuchte der Vor- (blau) und Nachuntersuchungen (gelb) in den oberflächennahen Tiefenstufen 0 bis 2 cm und 2cm bis 4 cm

Tab.27: Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Salzanalysen an den Bohrmehlproben mit Bewertung der Anionengehalte nach WTA-MERKBLATT "MAUERWERKSDIAGNOSTIK" (1999): schwarz: gering; gelb: mittel; rot: hoch

| Probe | Anteile an löslichen Ionen in M.% | | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ |
| KB_TP1_2/3 | 0,52 | 0,015 | 0,008 | <0,005 | <0,01 | 0,02 | 0,06 |
| KB_TP2_2/1 | 0,26 | 0,067 | 0,030 | <0,005 | 0,46 | 0,04 | 0,19 |
| KB_TP2_2/2 | 0,17 | 0,089 | 0,078 | <0,005 | 0,21 | 0,09 | 0,47 |
| KB_TPmOb_2/1 | 0,07 | 0,030 | 0,045 | <0,005 | 0,02 | 0,02 | 0,11 |

Sowohl in Heißkalk- als auch trocken gelöschtem Mörteloberflächen wird bereits wieder eine Anreicherung von bauschädigenden Salzen beobachtet. Dabei werden höhere Anreicherungen an besonders leicht löslichem Kaliumnitrat bestimmt. Salzausblühungen wurden zum Zeitpunkt der Probenahme auf keiner Oberfläche festgestellt. Die Oberflächen beider Mörtel zeigen bisher (nach 18 Monaten Standzeit) keine gravierenden Schäden oder Materialverluste, die mit Feuchte- und Salzeinwirkung in Verbindung stehen.

Um die Mörteloberflächen zu vergleichen, wurde der *Abriebtest* mittels Pinsel (KIRCHNER & ZALMANZING 2011) durchgeführt, ein einfacher Feldtest aus dem Bereich der Steinkonservierung, mit dem die Intensität der körnigen Zersetzung vertikaler Steinoberflächen bewertet wird (BLÄUER et al. 2012). Der Test ist eigentlich nicht für raue Oberflächen mit größeren Zuschlagkomponenten geeignet, die auch noch eine unterschiedliche Ausbildung der Oberfläche zeigen. Unter Berücksichtigung möglicher Fehler, bietet er jedoch eine einfache Vergleichsmöglichkeit. Der Abriebtest wurde auf allen Musterflächen in den Höhenstufen von 60 cm bis 70 cm und 160 cm bis 170 cm durch Abpinseln einer Fläche von 10 x 10 cm durchgeführt (Abbildung 62 bis 65). Das abgepinselte Material wurde gesammelt und dann gravimetrisch bestimmt (Abbildung 66). Eine bessere Übersicht bietet der visuelle Vergleich des abgepinselten Oberflächenmaterials (Abbildung 62 bis 65), da hier grobe Komponenten berücksichtigt werden können. An den betrachteten Musterflächen werden allgemein nur geringe Oberflächenverluste festgestellt.

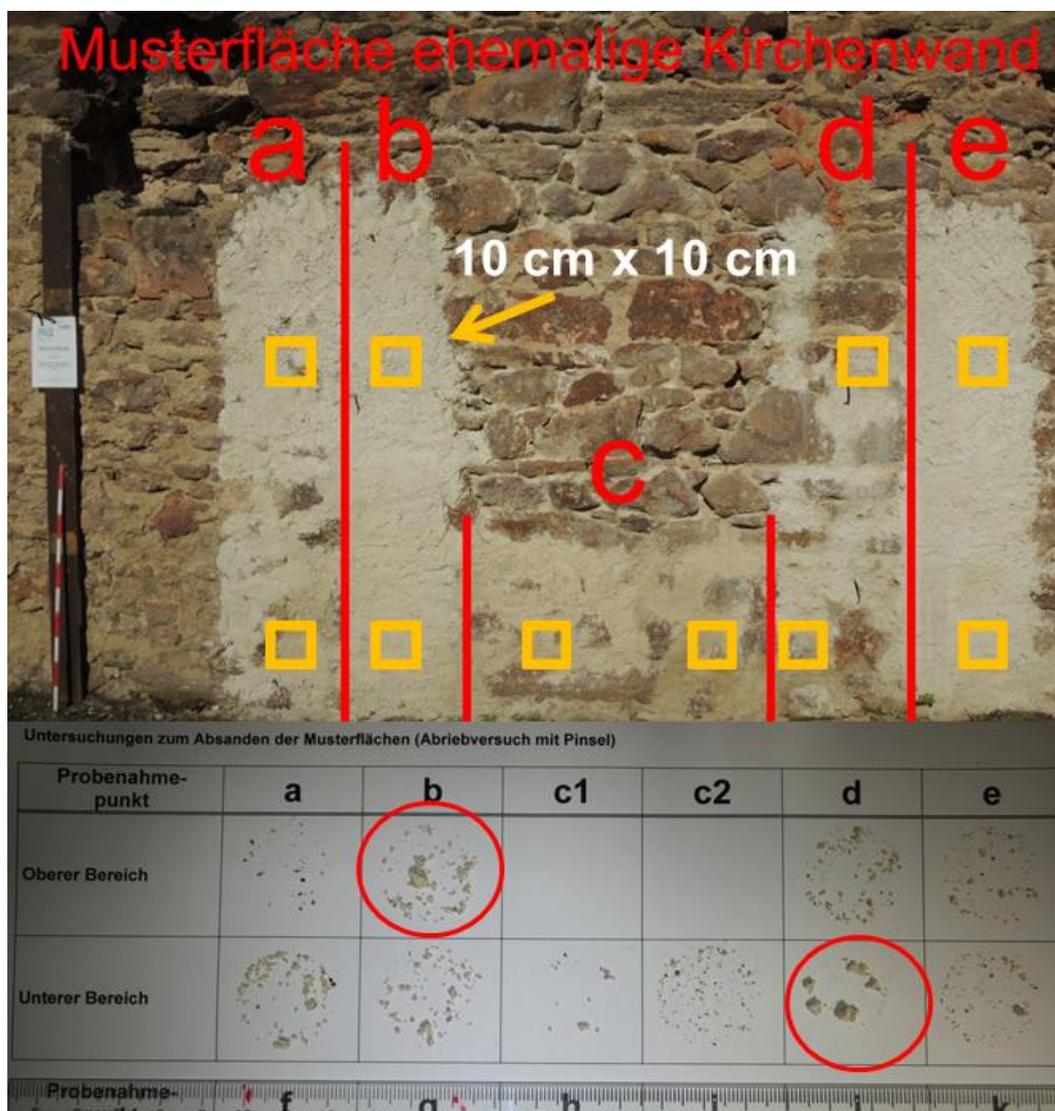


Abb. 62: Kloster Buch, südliche Langhausmauer mit Musterflächen, Abriebversuch mit Pinsel nach 12 Monaten, Verortung der Probenahme-flächen an den Musterflächen a bis e

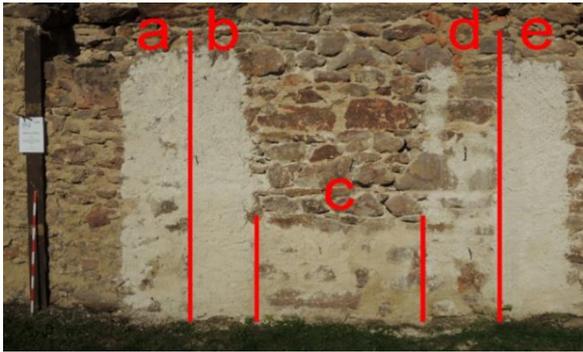


Abb. 63: Kloster Buch, Musterflächen a bis e

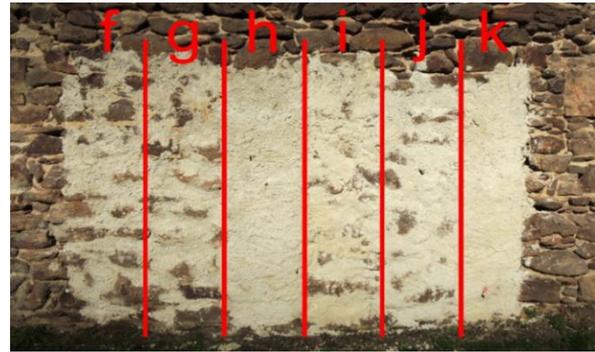


Abb. 64: Kloster Buch, Musterflächen f bis k

| Probenahme-punkt | a | b | c1 | c2 | d | e |
|------------------|---|---|----|----|---|---|
| Oberer Bereich | | | | | | |
| Unterer Bereich | | | | | | |
| Probenahme-punkt | f | g | h | i | j | k |
| Oberer Bereich | | | | | | |
| Unterer Bereich | | | | | | |

Abb. 65: Musterflächen, Abriebtest mit Pinsel, Zuordnung Musterfläche und Materialverlust durch Abrieb

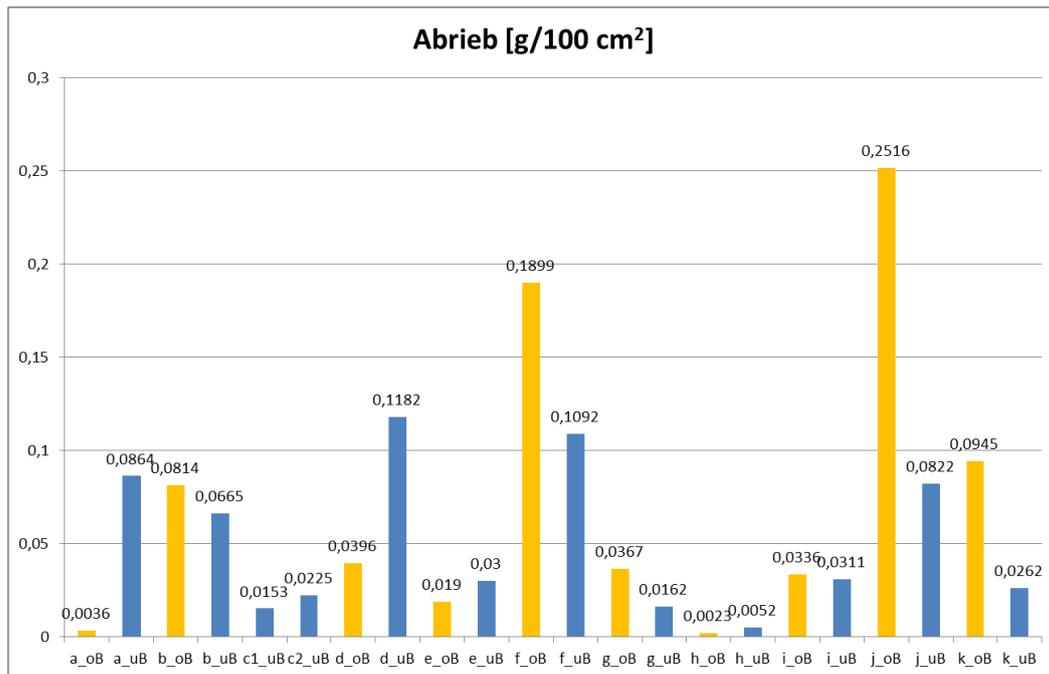


Abb. 66: Musterflächen, Abriebtest mit Pinsel, gravimetrische Bestimmung der Materialverluste durch Abrieb: oB = oberer Bereich, uB = unterer Bereich (Sockel)

Die geringsten Materialverluste durch Abpinseln werden bei der Fläche h (trocken gelöschter Kalk, Mischung 5) festgestellt. Danach folgt der NHL-haltige Heißkalkmörtel der Flächen c1 und c2 (nur unten angelegt). Die vergleichsweise hohen Verluste der Fläche j (Heißkalkmörtel, Mischung 2) sind auf die Bimszusätze zurückzuführen, die bei anderen Mischungen fehlen.

Die Bestimmung der *Carbonatisierungstiefe* mittels Phenolphthalein erfolgte nach 18 Monaten beispielhaft an den Musterflächen a bis d an Bohrmehl, bis in eine Tiefe von 6 cm. Das Bohrmehl wurde im cm-Abstand entnommen. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 67. Heißkalkmörtel, NHL-haltiger Heißkalkmörtel und trocken gelöschter Kalkmörtel zeigen Carbonatisierungstiefen von 4 bis 6 cm. Bei Musterfläche d (trocken gelöschter Kalkmörtel) führen basische Kalkspatzen zu einer Violettfärbung einzelner Komponenten.

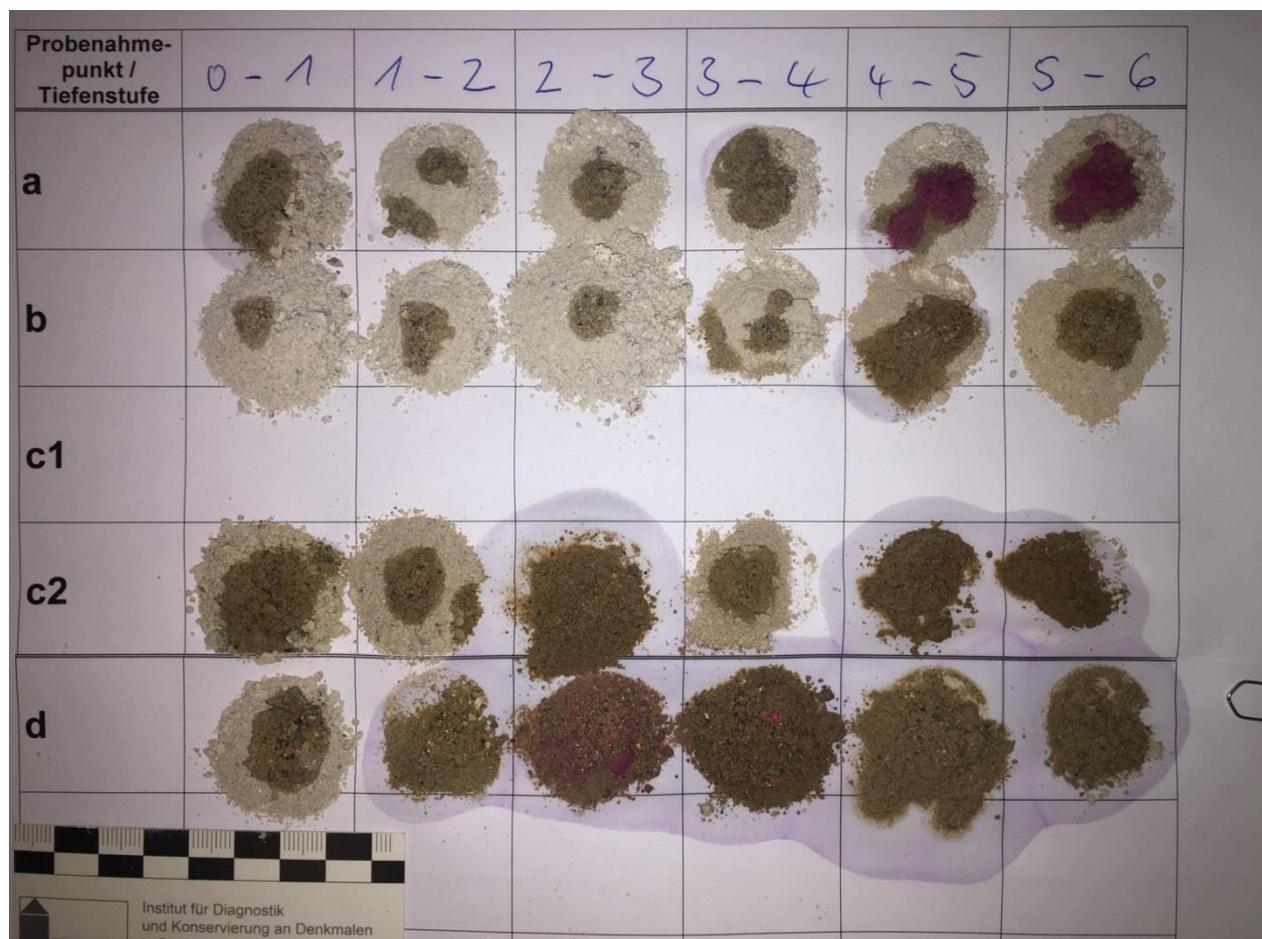


Abb. 67: Kloster Buch, Musterflächen, Bestimmung der Carbonatisierungstiefe, Bohrmehl nach Indikatorzugabe

Zusammenfassend zeigt sich, dass die untersuchten, mittels Heißkalk und trocken gelöschter hergestellten Mörteloberflächen ein Jahr nach der Applikation noch keine signifikanten Unterschiede in der Witterungsbeständigkeit aufweisen. Ein Monitoring wird die Entwicklung der Musterflächen in den nächsten Jahren weiter verfolgen.

3.3.5.4 Herstellung und Untersuchung von Ziegel-Putz-Verbundkörpern

Gleichzeitig mit der Anlage der Musterflächen an der südlichen Langhauswand der ehemaligen Klosterkirche in Kloster Buch erfolgte die Herstellung von 10 Ziegel- bzw. Klinker-Putz-Verbundkörpern mit den an der Langhauswand applizierten Mörtelmischungen, mit den Ausgangsstoffen Branntkalk (CaO: SCHAEFER-Precal 30 S, CL90-Pulver), Zuschlag (Sand/Kies: Zschaitz 0-8 mm) und Zusätzen (Bimssand, Ziegelsand), durch die Ausführenden A. Fenzke und T. Schmidt für umfassende vergleichende Untersuchungen der Kalkmörtel, der Materialeigenschaften und der Materialverbundeigenschaften (ZÖTZL 2019a). Neben Ziegelsteinen wurden auch Klinker (im Normalformat) als Untergrund eingesetzt, um speziell die Haftverbundeigenschaften der Mörtel auf dichtgebrannten Oberflächen zu untersuchen. Die Verbundkörper wurden im unweit entfernten Kohren-Sahlis ausgelagert und ähnlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt wie die Wandputze. Die Ziegelmuster wurden auf einer Kunststoffoberfläche mit Erdberührung hochkant nebeneinander positioniert und mit einem Brett überdacht (Dachüberstand ca. 2 cm) sowie die Rückseite der Ziegel vor der direkten Bewetterung geschützt (Abbildung 68). Die Kunststoffauflage gewährleistete ein Monitoring möglicher Oberflächenverluste besser als die direkt anschließende Rasenfläche an der Mustermauer in Klosterbuch. Klimamessungen erfolgten parallel an der Langhausmauer in Klosterbuch und in Kohren-Sahlis (ZÖTZL 2019a). Die Probeflächen konnten regelmäßig überprüft werden. Nach ca. einem Jahr Standzeit (einem Klima-Jahreszyklus) im Oktober 2018 erfolgten durch das IDK erste Nachuntersuchungen zur Wasseraufnahme an den Ziegeloberflächen. Weitere Untersuchungen zur Festigkeit wurden nach einer Auslagerung von 18 Monaten, nach zwei Wintern, im März 2019 durchgeführt.



Abb. 68: Ziegel-Musterflächen, Herstellung am 30.09.2017 mit Putzstärken von 2 bis 3 cm, Lagerung im Außenbereich 18 Monate, über zwei Winter (Aufnahme am 09.02.2019)

Die Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme mit dem Karstensen Prüfröhrchen (D'HAM et al. 2010) an unterschiedlich ausgebildeten Putzoberflächen erfolgte in der Ziegelmitte an 7 von 10 Putz-Ziegel-Verbund-Probekörpern. An drei Probekörpern war auf Grund der Oberflächenbeschaffenheit keine Prüfung möglich. Die ermittelten w-Werte zeigt Tabelle 28.

Bestimmung der Wasseraufnahme nach Karsten

Tab. 28: Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten an Putzoberflächen der Verbundkörper (nach 12 Monaten Auslagerung)

| Probe | HK 1 | HK 2 | TK | HKO 1 | HKO 2 | HKB 1 | HKB 2 |
|---|----------------|----------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Material | Heißkalkmörtel | Heißkalkmörtel | trocken gelöschter Kalkmörtel | Heißkalkmörtel mit NHL 2 | Heißkalkmörtel mit NHL 2 | Heißkalkmörtel mit Bimszusatz | Heißkalkmörtel mit Bimszusatz |
| w-Wert (60 min) [l/(m ² *h ^{0,5})] | 4,4 | 0,26 | 8 | 9 | 0,88 | 12,5 | 10 |

Die ermittelten Werte streuen erheblich und sind vermutlich auch von der Oberflächenbearbeitung, d.h. der Verdichtung der Oberfläche durch das Abziehen, abhängig und damit nur bedingt vergleichbar. Für einen Kalkmörtel sehr dichte Oberflächen zeigen die Proben HK2 und HKO2 mit w-Werten von 0,26 und 0,88. Eine weitere HK-Probe (HK1) weist ebenfalls einen niedrigen w-Wert von 4,4 auf. Die restlichen Werte der Proben TK, HKO1, HKB1 und HKB2 zeigen Werte in einer Größenordnung, die erfahrungsgemäß für einen Luftkalkmörtel gemessen wird. Der Bimszusatz in HKB1 und 2 beeinflusst möglicherweise ebenfalls die Wasseraufnahme der Mörtel.

Vergleichende Haftzugfestigkeitsuntersuchungen wurden an den im Außenbereich exponierten Putz-Ziegel-Verbund-Probekörpern (Ziegel mit Putzoberflächen) nach einem Zeitraum von 18 Monaten durchgeführt. Die Tabelle 29 und Abbildung 69 zeigen die Untersuchungsergebnisse. Leider lösten sich bereits bei der vorbereitenden Präparation einige Putzoberflächen vom Untergrund ab. Dadurch war die Prüfung nur an insgesamt 5 Probekörpern möglich. Ergebnisse: Die trocken gelöschten Kalkmörteloberflächen zeigen geringe Haftzugfestigkeiten und einen Bruch an der Grenzfläche zwischen Putzmörtel und Untergrund.

Tab. 29: Prüfung der Haftzugfestigkeit an Probekörpern

| Probe | Material | Haftzugfestigkeit [N/mm ²] | Bruchbild |
|--------|--|--|---|
| HKBO_1 | Heißkalkmörtel mit NHL-Zusatz und Ziegeluntergrund | 0,22 | Kohäsionsbruch (Bruch im Putzmörtel) |
| HKBO_2 | Heißkalkmörtel mit NHL-Zusatz und Ziegeluntergrund | 0,23 | Kohäsionsbruch (Bruch im Putzmörtel) |
| HK_Z1 | Heißkalkmörtel mit Ziegeluntergrund | 0,16 | Kohäsionsbruch (Bruch im Putzmörtel) |
| HK_Z2 | Heißkalkmörtel mit Ziegeluntergrund | 0,145 | Kohäsionsbruch (Bruch im Putzmörtel) |
| HK_K1 | Heißkalkmörtel mit Klinkeruntergrund | 0,12 | Kohäsionsbruch (Bruch im Putzmörtel) |
| HK_K2 | Heißkalkmörtel mit Klinkeruntergrund | 0,21 | Kohäsionsbruch (Bruch im Putzmörtel) |
| HK_B1 | Heißkalkmörtel mit Bimszusatz und Ziegeluntergrund | 0,249 | Kohäsionsbruch (Bruch im Putzmörtel) |
| HK_B2 | Heißkalkmörtel mit Bimszusatz und Ziegeluntergrund | 0,192 | Kohäsionsbruch (Bruch im Putzmörtel) |
| TK_1 | trocken gelöschter Kalkmörtel mit Ziegeluntergrund | 0,04 | Adhäsionsbruch (Bruch in der Berührungsfläche zwischen Putzmörtel und Untergrund) |
| TK_2 | trocken gelöschter Kalkmörtel mit Ziegeluntergrund | 0,068 | Adhäsionsbruch (Bruch in der Berührungsfläche zwischen Putzmörtel und Untergrund) |

Eine deutliche Steigerung der Haftzugfestigkeiten wird bei allen Heißkalkmörteln festgestellt. Dabei zeigen auch die NHL-haltigen Heißkalkmörtel sehr gute Haftzugfestigkeiten. Der Bruch erfolgt bei Heißkalkverwendung immer im Mörtel. Die Versuche zeigen eine hervorragende Anbindung der Heißkalkmörtel an den Ziegel- und sogar an den Klinkeruntergrund, die mit der Heißapplikation in Verbindung gebracht wird.

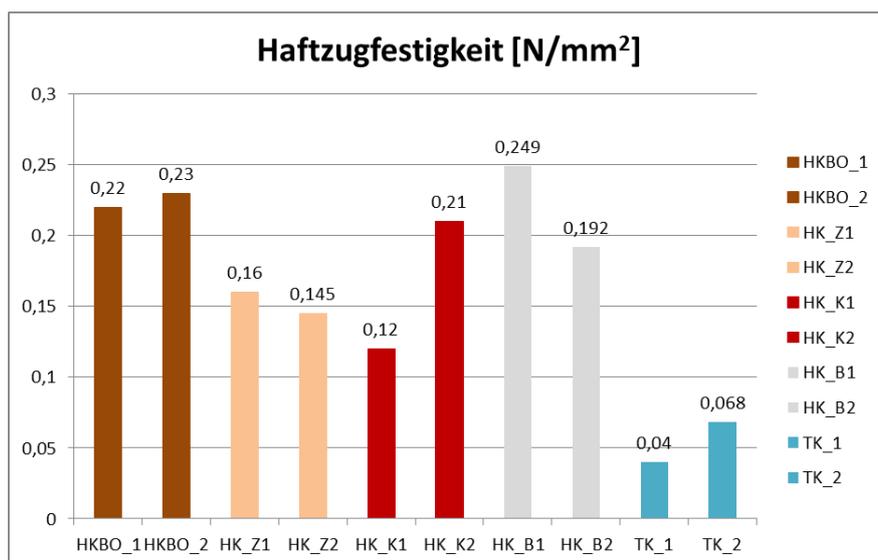


Abb. 69: Untersuchungen an Ziegel-Mustern, Prüfung der Haftzugfestigkeit nach 18 Monaten

An den im Außenbereich exponierten Putz-Ziegel-Verbund-Probekörpern (Ziegel mit Putzoberflächen) erfolgten nach einem Zeitraum von 18 Monaten vergleichende Untersuchungen der Druckfestigkeit an abgetrennten Putzproben. Die Tabelle 30 und

Abbildung 70 zeigen die Untersuchungsergebnisse. Danach liegen die Druckfestigkeiten der Heißkalkmörtel zwischen 1,3 N/mm² und 2,9 N/mm², die der trocken gelöscht hergestellten Kalkmörtel 1 N/mm² und 2,5 N/mm² und die der Heißkalkmörtel mit NHL-Zusatz Werte zwischen 1,9 N/mm² und 3,4 N/mm². Der Vergleich der Mittelwerte (Abbildung 71) zeigt vergleichbare Größenordnungen der Werte bei ca. 1,8 N/mm² für Heißkalkmörtel und trocken gelöschten Kalkmörtel. Mit ca. 2,8 N/mm² zeigen die Heißkalkmörtel mit NHL-Zusatz deutlich höhere Werte. Die Festigkeitserhöhung kann mit der wesentlich stabileren Bindung hydraulischer reagierender NHL-Komponenten im Bindemittelanteil erklärt werden.

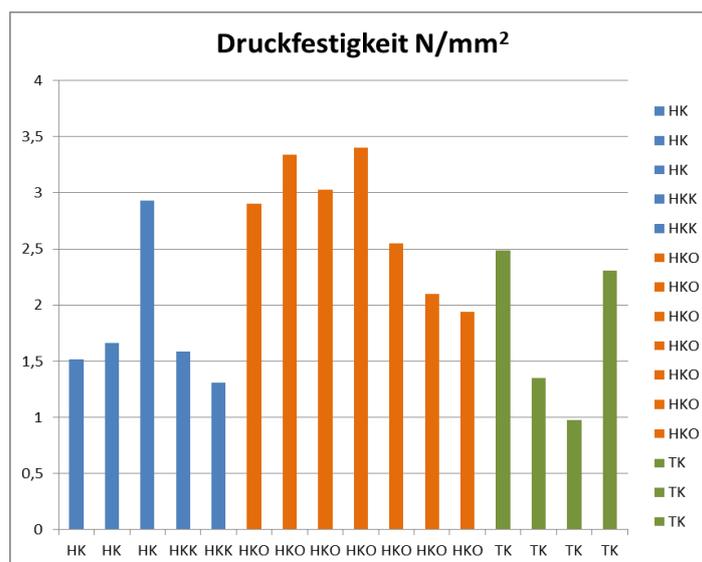


Abb. 70: Untersuchungen der Druckfestigkeit an abgetrennten Putzproben nach 18 Monaten

Tab. 30: Prüfung der Druckfestigkeit an abgetrennten Putzproben

| Probe | Material | Druckfestigkeit nach 18 Monaten [N/mm ²] |
|-------|--|--|
| HK | Heißkalkmörtel mit Ziegeluntergrund | 1,52 |
| HK | Heißkalkmörtel mit Ziegeluntergrund | 1,66 |
| HK | Heißkalkmörtel mit Ziegeluntergrund | 2,93 |
| HKK | Heißkalkmörtel mit Klinkeruntergrund | 1,59 |
| HKK | Heißkalkmörtel mit Klinkeruntergrund | 1,31 |
| HKO | Heißkalkmörtel mit NHL-Zusatz und Ziegeluntergrund | 2,90 |
| HKO | Heißkalkmörtel mit NHL-Zusatz und Ziegeluntergrund | 3,34 |
| HKO | Heißkalkmörtel mit NHL-Zusatz und Ziegeluntergrund | 3,03 |
| HKO | Heißkalkmörtel mit NHL-Zusatz und Ziegeluntergrund | 3,40 |
| HKO | Heißkalkmörtel mit NHL-Zusatz und Ziegeluntergrund | 2,55 |
| HKO | Heißkalkmörtel mit NHL-Zusatz und Ziegeluntergrund | 2,10 |
| HKO | Heißkalkmörtel mit NHL-Zusatz und Ziegeluntergrund | 1,94 |
| TK | trocken gelöschter Kalkmörtel mit Ziegeluntergrund | 2,49 |
| TK | trocken gelöschter Kalkmörtel mit Ziegeluntergrund | 1,35 |
| TK | trocken gelöschter Kalkmörtel mit Ziegeluntergrund | 0,98 |
| TK | trocken gelöschter Kalkmörtel mit Ziegeluntergrund | 2,31 |

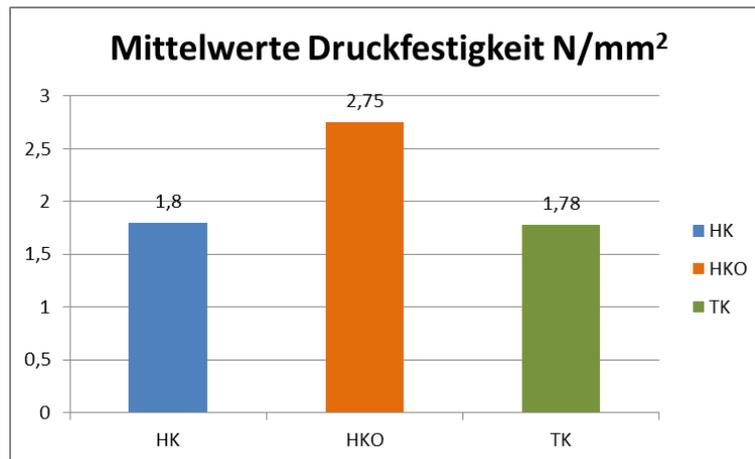


Abb. 71: Mittelwerte der Druckfestigkeit an abgetrennten Putzproben nach 18 Monaten

Für Gefügeuntersuchungen mittels REM wurden polierte Anschliffe der Ziegel-Mörtel-Verbundprobekörper mit einem Alter von > 18 Monaten, senkrecht zur Oberfläche geschnitten, hergestellt. Die Abbildung 72 zeigt senkrecht zur Oberfläche geschnittene Ziegel-Mörtel-Verbundproben.



Abb. 72: Senkrecht zur Oberfläche geschnittene Ziegel-Mörtel-Verbundproben (Probe imprägniert, Porenraum teilweise mit Harz gefüllt). Trocken gelöschter Kalkmörtel mit Ziegeluntergrund: TKZ, Heißkalkmörtel mit Ziegeluntergrund: HKZ, Heißkalkmörtel mit Klinkeruntergrund: HKK

Beide Kalkmörteltechniken, Heißkalk und trocken gelöschter hergestellter Mörtel, zeigen deutlich unterschiedliche Gefüge. Das Gefüge des trocken gelöschter hergestellter Kalkmörtels ist korn- und matrixgestützt, enthält Kalkspatzen und einen hohen Porenraum mit großen runden bis eckigen Poren (Abbildung 73). Der Mörtel zeigt auf Grund der vielen großen Poren nur teilweise einen Kontakt zur Ziegeloberfläche. Dagegen ist das Heißkalkmörtelgefüge matrixgestützt und zeigt nur in wenigen Fällen direkte Kornkontakte. Es ist wesentlich dichter und zeigt eine größere Kontaktfläche mit guter Anbindung zum Ziegel- oder Klinkeruntergrund sowie eine Vielzahl von Schwindrissen, die zu einer hohen Porosität führen (Abbildung 74 und 75). Die Kontakte zwischen Korn und Heißkalkmatrix sind sehr intensiv (Abbildung 76). Eine Reaktionszone mit angelösten Quarzkornoberflächen kann am Bruchstück mittels REM beobachtet werden (Abbildung 78). Die Oberfläche des

Heißkalkmörtels zeigt eine stark verdichtete Zone mit einer Stärke von 3 bis 5 Mikrometern, vergleichbar mit einer fest aufsitzenden Sinterschicht (Abbildung 79 und 80), die an ein gut verzahntes, stabiles Gefüegerüst aus großen Calcit-Kristallen fest angebunden ist. Die Sinterschicht ist nur sehr selten durch Risse unterbrochen, führt zu einer Verdichtung der Oberfläche und behindert den kapillaren Zugang von Wasser, wie Karsten-Messungen zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme zeigen. Nach Entfernung der Sinterschicht durch Anschleifen steigt die kapillare Wasseraufnahme auf Grund der Porosität (zusätzlich durch Schwindrisse) stark an. Der obere Bereich der Schicht zeigt ein Stützgerüst, gebildet aus gut verzahnten größeren Calcit-Kristallen, das wiederum durch kleinere Calcite verdichtet wurde (Abbildung 81 und 82). Das Gefüge lockert nach unten hin auf und zeigt mehr Hohlräume im Gefüge. Die großen Calcit-Kristalle (Skalenoeder) sind idiomorph ausgebildet zeigen deutliche Kristallflächen. Im Unterschied dazu werden im Gefüge des trocken gelöscht hergestellten Mörtels nur schlecht ausgebildete Calcit-Kristallite beobachtet (Abbildung 83), die, im Bereich der Grenzschicht etwas besser ausgebildet, ein wesentlich weniger dicht verzahntes, Sinter- oder Grenzschichtgefüge zur Oberfläche zeigen.

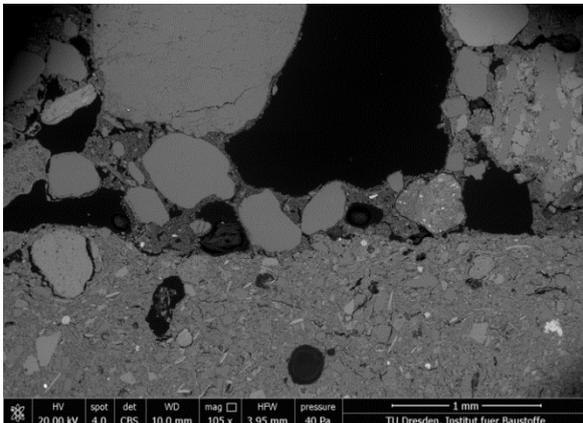


Abb. 73: Trocken gelöschter Kalkmörtel auf Ziegeluntergrund (TKZ). Gefüge mit großen Poren, keine Schwindrisse (Anschliff, REM-Aufnahme)

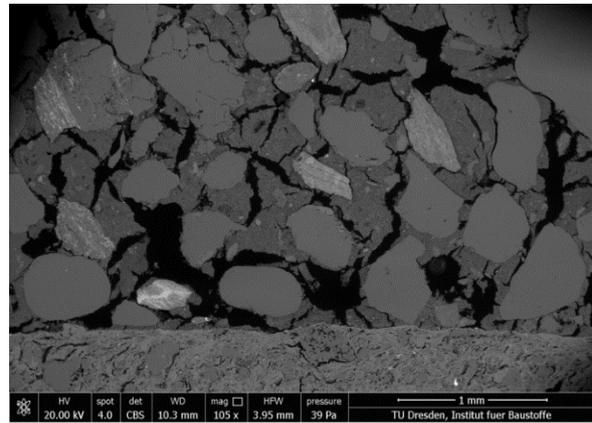


Abb. 74: Heißkalkmörtel auf Klinkeruntergrund (HKZ): stark durch Schwindrisse gestörtes Gefüge (Anschliff, REM-Aufnahme)

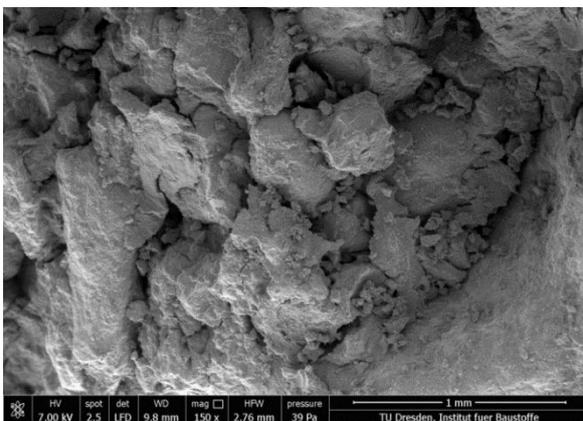


Abb. 75: Heißkalkmörtelbruchstück mit schwindrissreichem Gefüge (REM-Aufnahme)

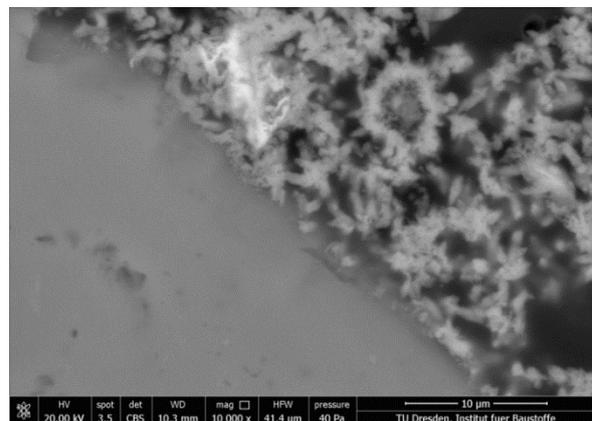


Abb. 76: Heißkalkmörtel (HKK) auf Klinkeroberfläche: Gefügebild aus der Mitte der Probe: Kontakt Calcitmatrix zum Quarzkorn: der Kontaktbereich ist nicht auflösbar (Anschliff, REM-Aufnahme)

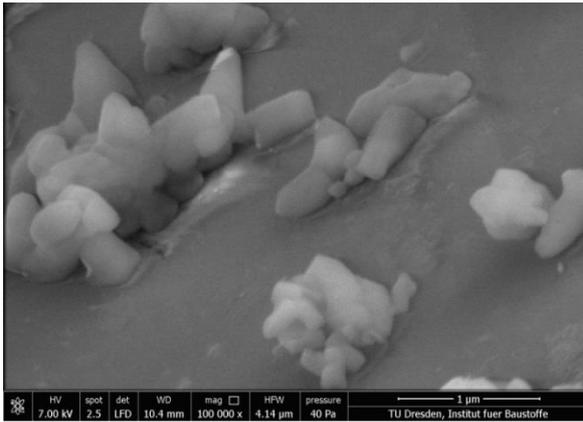


Abb. 78: Heißkalkmörtel (HKM) auf Klinkeroberfläche: Gefügebild aus der Mitte der Probe: Kontakt Cacit-Quarzkorn mit Reaktionszone (Bruchstück, REM-Aufnahme)

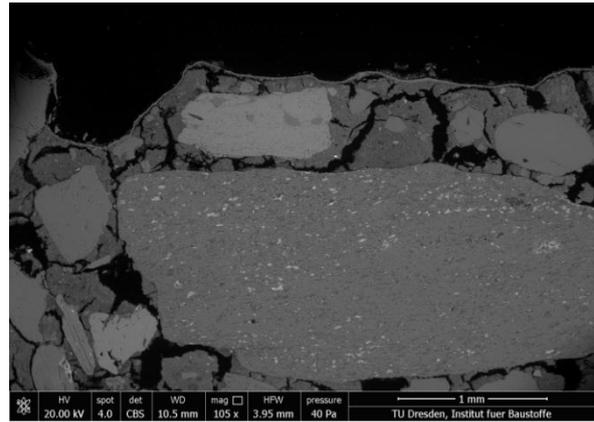


Abb. 79: Heißkalkmörtel auf Klinker (HKM), Mörteloberfläche mit dichter durchgängig erhaltener Sinterschicht. (Anschliff, REM-Aufnahme)

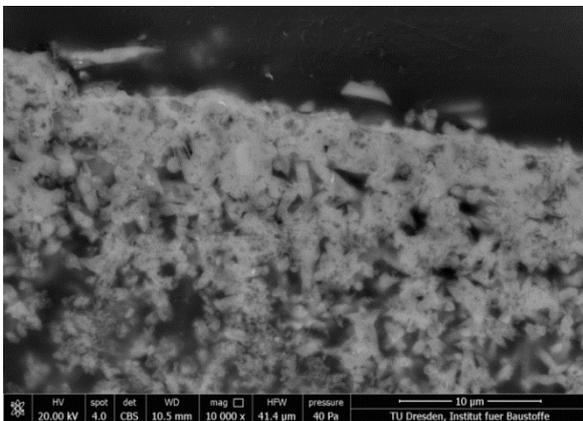


Abb. 80: Oberfläche des Heißkalkmörtels aus Abb. 79 mit stark verdichteter Zone von 3 bis 5 Mikrometern (Anschliff, REM-Aufnahme)

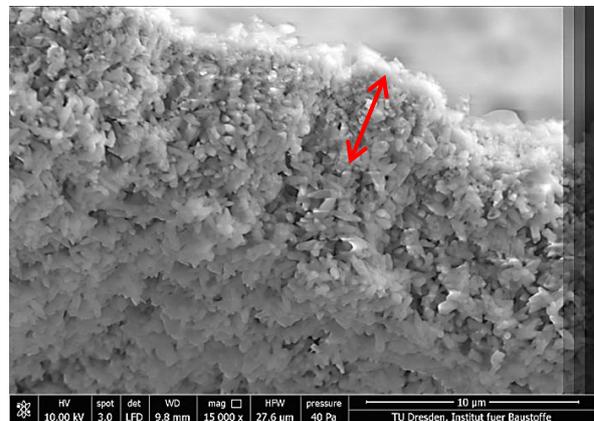


Abb. 81: Heißkalkmörtel auf Klinker (HKM), Mörteloberfläche mit dichter durchgängig erhaltener Sinterschicht (Bruchstück, REM-Aufnahme).

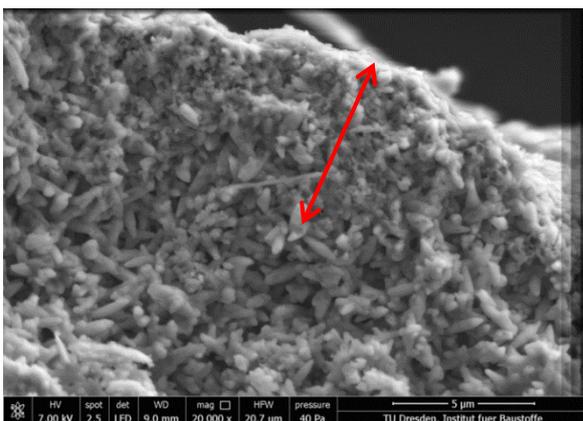


Abb. 82: Heißkalkmörtel auf Klinker (HKM), Mörteloberfläche mit dichter Sinterschicht, die (Bruchstück, REM-Aufnahme).

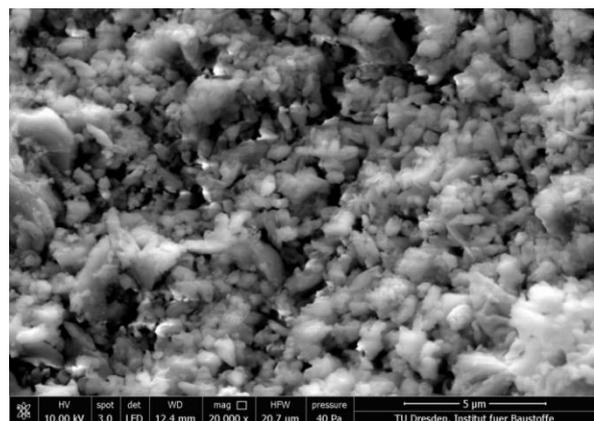


Abb. 83: Trocken gelöschter Kalkmörtel (TK) auf Ziegel: typisches schlecht aufzulösendes Kalkmörtelgefüge mit viel kleineren schlecht ausgebildeten - Kristalliten. (Bruchstück, REM-Aufnahme)

3.4 Evaluierung bestehender Restaurierungen in Heißkalktechnik an umweltgeschädigtem Mauerwerk

Im Rahmen des Projektes wurden durch das IDK an bereits bestehenden Heißkalkmusterflächen bzw. Restaurierungen in Heißkalktechnik an historischen Objekten Nachuntersuchungen zur deren Evaluierung durchgeführt. Der Umfang der durchgeführten Evaluierungen ist dabei sehr unterschiedlich und reicht – abhängig von der jeweils spezifischen Objektsituation – von der Untersuchung von Materialproben bis zu einer nur visuellen Beurteilung ohne zerstörende Probenahme. In einigen Fällen war das IDK bereits im Vorfeld des DBU-Projekts an der Maßnahmenplanung an solchen Objekten beteiligt und konnte so Daten aus Voruntersuchungen an den später behandelten Flächen mit in das Projekt einbringen. Die Beobachtungen und Untersuchungen an den einbezogenen Objekten werden im Folgenden dargestellt.

3.4.1 Untersuchungsmethoden

- **Messung der kapillaren Wasseraufnahme**

Siehe Gliederungspunkt 3.2.1

- **Feuchtebestimmung nach der Darmmethode**

Siehe Gliederungspunkt 3.3.1

- **Qualitative und Quantitative Salzanalyse**

Siehe Gliederungspunkt 3.3.1

- **Mörtelanalyse**

Siehe Gliederungspunkt 3.3.1

- **Röntgenpulverdiffraktometrie**

Siehe Gliederungspunkt 3.3.1

- **Abriebtest mit Pinsel**

Siehe Gliederungspunkt 3.3.1

- **Bestimmung der Carbonatisierungstiefe**

Siehe Gliederungspunkt 3.3.1

3.4.2 Grimma, Klosterkirche, Musterflächen in Heißkalktechnik

Die um 1435 errichtete Klosterkirche St. Augustin in Grimma, in der Luther während der Reformationszeit mehrfach predigte, ist eine der bedeutendsten Kirchen der Stadt Grimma. Zusammen mit dem Gymnasium St. Augustin bildet sie ein einzigartiges Ensemble, das

überregional zu den bekanntesten Stadtansichten der Muldestadt zählt (Abbildung 84). Bis zur Reformation stand die Klosterkirche in Nutzung des Augustiner-Eremiten-Ordens und danach, bis 1937, als Kirche der angrenzenden Fürsten- und Landesschule zu Grimma. Heute ist die Saalkirche eine Kulturhalle und bietet Raum für Konzerte, Ausstellungen und Zusammenkünfte. Die Klosterkirche wurde aus dem in Grimma anstehenden Porphyry (Rhyolith) in Bruchsteintechnik mit Mauerstärken von fast 150 cm erbaut. Die Innenwände zeigen erhebliche Schäden, verursacht durch das Jahrhunderthochwasserereignis von 2002 in Kombination mit Auswirkungen einer anthropogen verursachten Schadsalzbelastung.



Abb. 84: Die Klosterkirche (1435 erbaut) und das über Jahrhunderte zugehörige Gymnasium in Grimma (Südostansicht). Rechts im Bild die beim Jahrhunderthochwasser 2002 zerstörte Pöppelmannbrücke, Aufnahme am 26.02.2016

3.4.2.1 Voruntersuchungen zur Feuchte- und Salzbelastung

Die Voruntersuchungen (ZÖTZL 2018a) erfolgten in enger Abstimmung mit dem Landesamt für Denkmalpflege Sachsen (S. Reuter), der Stadt Grimma (Fr. Hollauf) und dem Architekten (M. Lätzsch), im Jahr 2015, um für die Restaurierung bzw. Sicherung der gefährdeten Wandbereiche der Klosterkirche eine Datengrundlage zu schaffen. Für die Anpassung der Mörtelrezepturen an den historischen Bestand wurden vereinfachte chemische Mörtelanalysen und die Bestimmung der Sieblinie durchgeführt. Bewusst wurden Feuchte- und Salzbelastungen in Mauerwerksbereichen aus (dem in der Region anstehenden Rhyolith-) Bruchstein und in Bereichen mit Ziegelergänzungen analysiert. In diesen gut untersuchten Bereichen konnten dann im Herbst 2015 durch Restaurator T. Schmidt die Heißkalkmusterflächen angelegt werden.

Die Probenahme erfolgte im April 2015. Für die Untersuchungen zur Feuchte- und Salzbelastung wurden Bohrmehlhöhen- und -tiefenprofile angelegt. Tabelle 31 zeigt die Lage der Profile im Kirchenraum und die beprobten Höhen über Fußbodenoberkante (FOK). In jeder Höhe wurden Bohrmehlproben in 5 Tiefenstufen entnommen: (1) 0-2 cm, (2) 2-4 cm,

(3) 4-14 cm, (4) 34-44 cm, (5) 44-45 cm. Außerdem wurden zwei Proben von Ausblühsalzen zur Untersuchung der vorkommenden Mineralphasen mit XRD gewonnen.

Die beprobten Mauerwerksbereiche sind in Abbildung 85 bis 88 in der Übersicht dargestellt. An allen entnommenen Bohrmehlproben wurden Feuchteanalysen durchgeführt. Die Analyse des Gesamtgehalts löslicher Bestandteile (i.w. bauschädliche Salze ohne weitere Spezifizierung) erfolgte jeweils nur an den Proben aus den Tiefenstufen 1 und 2 (bis 4 cm Tiefe); die Analyse der enthaltenen Kationen und Anionen wurde nur an Proben der Tiefenstufe 1 (0-2 cm Tiefe) aus den Profilen GKK_TP_1 und GKK_TP_2 durchgeführt. Die angewandten Analysenmethoden wurden bereits in Abschnitt 3.1.1 dargestellt.

Tab. 31: Höhenprofile in den beprobten Sockelbereichen der Innenwände der Klosterkirche Grimma.

| | GKK_TP1 N-Seite, östlich des Bogens, Bruchstein- mauerwerk | GKK_TP2 N-Seite, zwischen den Bögen, Ziegel / Bruchstein | GKK_TP3 N-Seite, neben der Bühne | GKK_TP4 S-Seite |
|------|---|---|---|---------------------------|
| Höhe | 35 cm (GKK_TP1_1) | 30 cm (GKK_TP2_1) | 40 cm (GKK_TP3_1) | 25 cm (GKK_TP4_1) |
| Höhe | 50 cm (GKK_TP1A_1) | 100 cm (GKK_TP2_2) | 100 cm (GKK_TP3_2) | 105 cm (GKK_TP4_2) |
| Höhe | 105 cm (GKK_TP1_2) | - | - | - |
| Höhe | 160 cm (GKK_TP1_3) | - | | |



Abb. 85: Nordseite, östlich des Bogens, Bruchstein, Sockel, Übersicht des Bereichs der Probenahmepunkte in Profil TP1: TP1_1 (ca. 35 cm über FOK), TP1_2 (ca. 105 cm über FOK) und TP1_3 (ca. 160 cm über FOK). TP1_1A befindet sich rechts neben dem Profil TP1_1



Abb. 86: Nordseite, zwischen den Bögen, Ziegel/Bruchstein, Sockel, Übersicht des Bereichs der Probenahmepunkte in Profil TP2: TP2_1 ca. 30 cm und TP2_2 100 cm über FOK



Abb. 87: Nordseite, neben Bühne, Sockel, Übersicht des Bereichs der Probenahmepunkte in Profil TP3: TP3_1 ca. 40 cm und TP3_2 100 cm über FOK



Abb. 88: Südseite, Sockel, Probenahmepunkte ca. 25 cm und 105 cm über FOK

Die Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen bzw. der Untersuchungen der Gesamtsumme löslicher Bestandteile an Bohrmehlproben werden in Tabelle 32, die Ergebnisse der Salzanalysen an Bohrmehlproben in Tabelle 33 dargestellt.

Tab: 32: Ergebnisse der Untersuchung von Feuchte und wasserlöslichen Bestandteilen

| Probe | Tiefenstufe [cm] | Lf ₂₅₀ [µS/cm] | pH [-] | ∑ wasserlös. Bestandteile [Ma.-%] | Feuchte [Ma.-%] |
|---|---------------------|------------------------------|-----------|--|--------------------|
| Nordseite, östlich des Bogens, Bruchstein, Sockel, ca. 35 cm über FOK | | | | | |
| GKK_TP1_1/1 | 0-2 cm | 586 | 6,06 | 2,84 | 6,67 |
| GKK_TP1_1/2 | 2-4 cm | 270 | 6,48 | 1,33 | 4,72 |
| GKK_TP1_1/3 | 4-14 cm | | | | 4,48 |
| GKK_TP1_1/4 | 34-44 cm | | | | 3,60 |
| GKK_TP1_1/5 | 44-54 cm | | | | 2,26 |
| Nordseite, östlich des Bogens, Bruchstein, Sockel, ca. 50 cm über FOK | | | | | |
| GKK_TP1A_1 | 0-2 cm | 187 | 6,70 | 0,69 | 5,36 |
| GKK_TP1A_2 | 2-4 cm | 80 | 6,95 | 0,27 | 2,79 |
| GKK_TP1A_3 | 4-14 cm | | | | 1,54 |
| GKK_TP1A_4 | 34-44 cm | | | | 2,49 |
| GKK_TP1A_5 | 44-54 cm | | | | 2,11 |
| Nordseite, östlich des Bogens, Bruchstein, Sockel, ca. 105 cm über FOK | | | | | |
| GKK_TP1_2/1 | 0-2 cm | 876 | 5,87 | 3,97 | 4,60 |
| GKK_TP1_2/2 | 2-4 cm | 162 | 6,64 | 0,69 | 4,01 |
| GKK_TP1_2/3 | 4-14 cm | | | | 3,49 |
| GKK_TP1_2/4 | 34-44 cm | | | | 3,14 |
| GKK_TP1_2/5 | 44-54 cm | | | | 2,15 |

| Nordseite, östlich des Bogens, Bruchstein, Sockel, ca. 160 cm über FOK | | | | | |
|---|----------|------|------|-------------|-------|
| GKK_TP1_3/1 | 0-2 cm | 1023 | 6,21 | 6,03 | 5,97 |
| GKK_TP1_3/2 | 2-4 cm | 241 | 6,90 | 1,18 | 6,00 |
| GKK_TP1_3/3 | 4-14 cm | | | | 5,76 |
| GKK_TP1_3/4 | 34-44 cm | | | | 6,37 |
| Nordseite, zwischen Bögen, Ziegel/Bruchstein, Sockel, ca. 30 cm über FOK | | | | | |
| GKK_TP2_1/1 | 0-2 cm | 558 | 7,15 | 2,68 | 6,97 |
| GKK_TP2_1/2 | 2-4 cm | 268 | 7,04 | 1,52 | 7,23 |
| GKK_TP2_1/3 | 4-14 cm | | | | 5,12 |
| GKK_TP2_1/4 | 34-44 cm | | | | 3,43 |
| GKK_TP2_1/5 | 44-54 cm | | | | 3,74 |
| Nordseite, zwischen Bögen, Ziegel/Bruchstein, Sockel, ca. 100 cm über FOK (Ziegel) | | | | | |
| GKK_TP2_2/1 | 0-2 cm | 268 | 7,23 | 1,57 | 0,88 |
| GKK_TP2_2/2 | 2-4 cm | 108 | nb | 0,47 | 0,45 |
| GKK_TP2_2/3 | 4-14 cm | | | | 0,61 |
| GKK_TP2_2/4 | 34-44 cm | | | | 0,76 |
| GKK_TP2_2/5 | 44-54 cm | | | | 0,85 |
| Nordseite, neben Bühne, Sockel, ca. 40 cm über FOK | | | | | |
| GKK_TP3_1/1 | 0-2 cm | | | | 11,70 |
| GKK_TP3_1/2 | 2-4 cm | | | | 5,96 |
| GKK_TP3_1/3 | 4-14 cm | | | | 6,24 |
| GKK_TP3_1/4 | 34-44 cm | | | | 4,80 |
| GKK_TP3_1/5 | 44-54 cm | | | | 2,45 |
| Nordseite, neben Bühne, Sockel, ca. 100 cm über FOK | | | | | |
| GKK_TP3_2/1 | 0-2 cm | | | | 1,43 |
| GKK_TP3_2/2 | 2-4 cm | | | | 3,38 |
| GKK_TP3_2/3 | 4-14 cm | | | | 2,51 |
| GKK_TP3_2/4 | 34-44 cm | | | | 2,26 |
| GKK_TP3_2/5 | 44-54 cm | | | | 1,91 |
| Südseite, Sockel, ca. 25 cm über FOK | | | | | |
| GKK_TP4_1/1 | 0-2 cm | | | | 5,09 |
| GKK_TP4_1/2 | 2-4 cm | | | | 5,26 |
| GKK_TP4_1/3 | 4-14 cm | | | | 3,81 |
| GKK_TP4_1/4 | 34-44 cm | | | | 5,82 |
| GKK_TP4_1/5 | 44-54 cm | | | | 5,65 |
| Südseite, Sockel, ca. 105 cm über FOK | | | | | |
| GKK_TP4_2/1 | 0-2 cm | | | | 1,76 |
| GKK_TP4_2/2 | 2-4 cm | | | | 2,62 |
| GKK_TP4_2/3 | 4-14 cm | | | | 2,48 |
| GKK_TP4_2/5 | 44-54 cm | | | | 1,70 |

Tab. 33: Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Salzanalysen an den Bohrmehlproben mit Bewertung der Anionen nach WTA-MERKBLATT "MAUERWERKSDIAGNOSTIK" (1999): schwarz: gering; gelb: mittel; rot: hoch

| Probe | Anteile an löslichen Ionen in Ma.-% | | | | | | |
|-------------|-------------------------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ |
| GKK_TP1_1/1 | 0,035 | 0,015 | 0,237 | 0,037 | 0,475 | 0,089 | 0,858 |
| GKK_TP1_2/1 | 0,045 | 0,085 | 0,462 | 0,057 | 0,205 | 0,320 | 2,397 |
| GKK_TP1_3/1 | 0,109 | 0,279 | 0,445 | 0,131 | 0,336 | 0,282 | 3,357 |
| GKK_TP2_1/1 | 0,045 | 0,225 | 0,103 | 0,064 | 0,575 | 0,066 | 0,616 |
| GKK_TP2_2/1 | 0,040 | 0,090 | 0,082 | 0,034 | 0,180 | 0,094 | 0,528 |

Tabelle 34 gibt eine Übersicht über die in Proben von Salzausblühungen vorgefundenen Mineralphasen.

Tab: 34: Mineralphasenbestand der Ausblühsalzproben

| Probe | Material | XRD-Phasenbestand | bauschädigende Salze |
|--------------|------------------|--|---|
| GKK_TP1_ES | Fuge | Epsomit Hexahydrat Niter (Kaliumnitrat) Quarz | Epsomit Hexahydrat Niter (Kaliumnitrat) |
| GKK_TP2_ES_Z | Ziegeloberfläche | Epsomit Hexahydrat Gips Quarz | Epsomit Hexahydrat |

Es wird eine deutliche bis hohe Feuchtebelastung im Mauerwerk festgestellt, die besonders oberflächennah mit hohen Gehalten hygroskopischer Salze korrelieren. Die Analyse der Schadsalzgehalte zeigt in allen untersuchten Profilen oberflächennah zum Teil sehr hohe Anreicherungen von Kaliumnitrat und deutliche Gehalte an Magnesiumsulfathydrat und Natriumchlorid. Die beschriebenen Schadsalze werden auch mittels Röntgendiffraktometrie in Ausblühsalzproben nachgewiesen.

Eine Schädigung der Oberflächen erfolgt in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte, infolge eines Hydratstufenwechsels oder durch wechselnde Lösungs- und Kristallisationsvorgänge. Die Herkunft des Magnesiums liegt erfahrungsgemäß im dolomitischen Setzmörtel. Der Eintrag von Sulfat wird über die Umwelt erfolgt sein (SIEDEL 2013). Es werden die Magnesiumsulfathydrate Hexahydrat (MgSO₄ x 6H₂O) und Epsomit (MgSO₄ x 7H₂O) nachgewiesen.

Das Hochwasserereignis im Jahr 2002 führte zu einer zusätzlichen Mobilisierung und Umverteilung der Schadstoffe, verbunden mit einem Aufstieg von Schadstoffen in höhere Mauerwerksbereiche und der Schädigung weiterer historischer Oberflächen in diesen Bereichen.

Die Innenwände der Klosterkirche zeigen erhebliche Schäden, verbunden mit stetig fortschreitenden Materialverlusten der historischen Putzfassung. Ein zügiger Schadensfortschritt ist erkennbar und an Hand herabfallender Putzfragmente für jedermann sichtbar. Eine Sicherung bzw. Restaurierung der geschädigten Putzoberflächen wird dringend

empfohlen. Dabei sollte ein zusätzlicher Alkalieintrag durch die Restaurierungsmaterialien vermieden werden. Allein reine Luftkalkputze, magnesium- und alkalifrei, tragen keine zusätzlichen Schadsalzkativen in das bereits stark durch Schadsalzanionen gesättigte Mauerwerk ein. Der Einsatz der Heißkalktechnik könnte hier möglicherweise helfen, der Aufgabenstellung gerecht zu werden.

3.4.2.2 Untersuchung der historischen Bestandsmörtel

Für die Nachstellung der bauzeitlichen Putz- und Setzmörtel wurden dem Bestand Proben eines Setzmörtels und eines Putzmörtels entnommen (Abbildung 89 und 90) und im IDK-Labor untersucht. Die Ergebnisse der vereinfachten chemischen Mörtelanalyse werden in der Tabelle 35 angegeben. Die Ergebnisse der Siebanalyse der Proben sind in Tabelle 36 aufgeführt, Korngrößenverteilung und Sieblinie werden in den Abbildung 91 bis 94 grafisch dargestellt.



Abb. 89: Nordseite, Ostportal,
Probenahmepunkt Setzmörtel und Putz



Abb. 90: Nordseite, Ostportal,
Probenahmepunkt Setzmörtel und Putz

Tab. 35: Ergebnisse der Mörteluntersuchungen

| Probennummer | Entnahmeort | Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis | Beschreibung |
|----------------------|---|--|--|
| GK_Setzmörtel | Grimma, Klosterkirche, Nordseite, Ostportal | - bezogen auf den HCl-löslichen Anteil, in Masseprozent: ca. 1:2,1 - bezogen auf Bindemittel und Quarzsandzuschlag*, in Volumenteilen: ca. 1:1,4 | <u>Bindemittel:</u> vermutlich hydraulischer Kalk - Magnesiumgehalt (nicht bestimmt) - Gehalt an Sulfat (nicht bestimmt) <u>Zuschlag:</u> Quarzsandzuschlag 0/8 mit Überkorn bis 16 mm <u>Farbe der angeschlagenen Oberfläche:</u> hellbeige bis grau |
| GK_Putz | Grimma, Klosterkirche, Nordseite, Ostportal | - bezogen auf den HCl-löslichen Anteil, in Masseprozent: ca. 1:1,5 - bezogen auf Bindemittel und Quarzsandzuschlag*, in Volumenteilen: ca. 1:0,9 | <u>Bindemittel:</u> vermutlich hydraulischer Kalk - Magnesiumgehalt (nicht bestimmt) - Gehalt an Sulfat (nicht bestimmt) <u>Zuschlag:</u> Quarzsandzuschlag 0/2 <u>Kornform:</u> zum Teil kugelig, gedrunen, selten plattig <u>Rundung:</u> gut gerundet bis kantengerundet <u>Farbe der angeschlagenen Oberfläche:</u> rotbraun |

Tab. 36: Ergebnisse der Siebanalyse von Bestandsmörteln aus der Klosterkirche Grimma

| Probe | Korngrößenanalyse in Ma.-%, Siebweite in mm | | | | | | | | | |
|----------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| | <0,1 | 0,125 | 0,25 | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 4,0 | 8,0 | 16,0 | >32,0 |
| GK_Setzmörtel | 1,40 | 7,00 | 16,29 | 24,65 | 19,02 | 18,05 | 7,63 | 5,96 | | |
| GK_Putz | 3,23 | 23,39 | 37,03 | 22,79 | 3,83 | 0,32 | | | | |

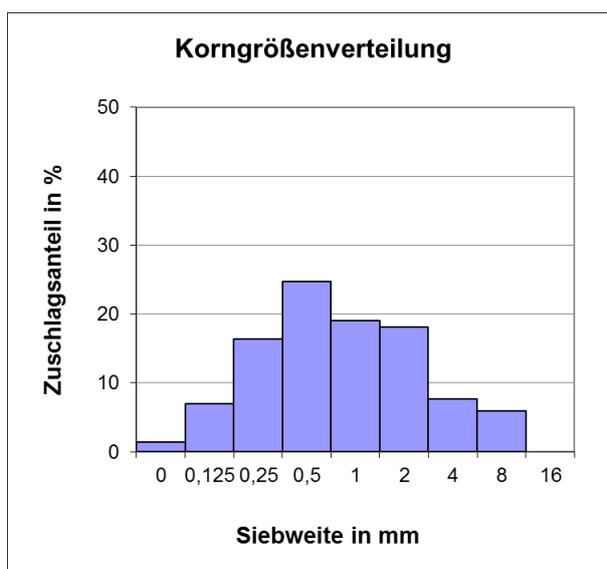


Abb. 91: GK_Setzmörtel -Korngrößenverteilung

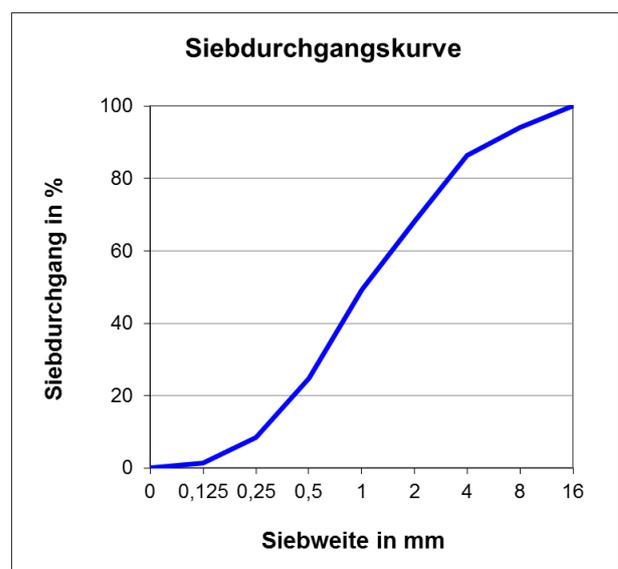


Abb. 92: GK_Setzmörtel -Siebdurchgangskurve

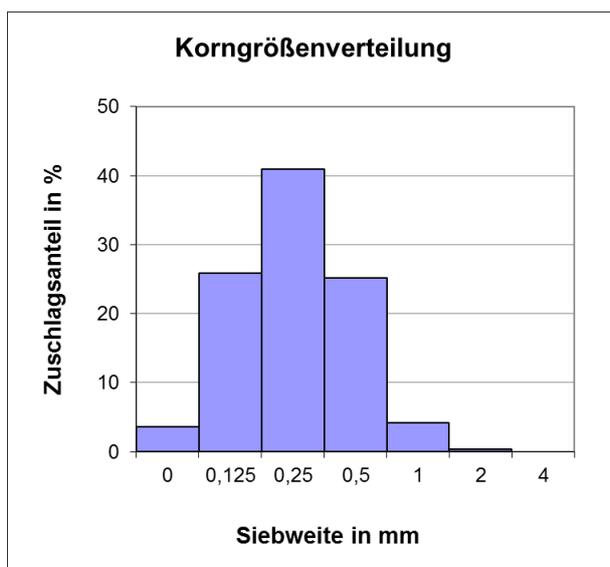


Abb.93: GK_Putz-Korngrößenverteilung

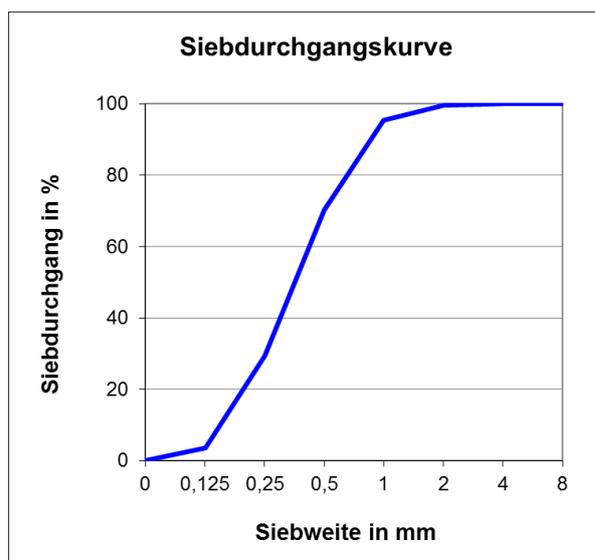


Abb. 94: GK_Putz-Siebdurchgangskurve

Die Nachstellung der Mörtel kann sich am historischen Vorbild orientieren. Für den Zuschlag wird ein Quarzsand aus einer regionalen Grube (z.B. Pönitz) empfohlen. Das IDK-Sandkataster steht zur Verfügung. Das Mischungsverhältnis sollte auf moderne Bindemittel (Oberfläche, Schüttdichte) abgestimmt werden.

3.4.2.3 Anlage von Putzmusterflächen

Die Anlage von unterschiedlichen Musterflächen erfolgte durch Dipl.-Restaurator T. Schmidt im Mai 2015 in der Klosterkirche. Dabei wurden folgende Mörtelmaterialien bzw. Bindemitteln appliziert: Heißkalk-Baustellenmischung, Baustellenmischung mit trocken gelöschtem Kalk, Porengrundputz „PPQ“, Baustellenmischung mit NHL2. In Abbildung 95 und 96 sind die Musterflächen dokumentiert.



Abb.95: Im Mai 2015 angelegte Putzmusterflächen an der Nordwand der Klosterkirche in Grimma, auf der linken Seite die mit Heißkalkmörtel ausgeführten Flächen (Probefläche 1 in Abb. 96).

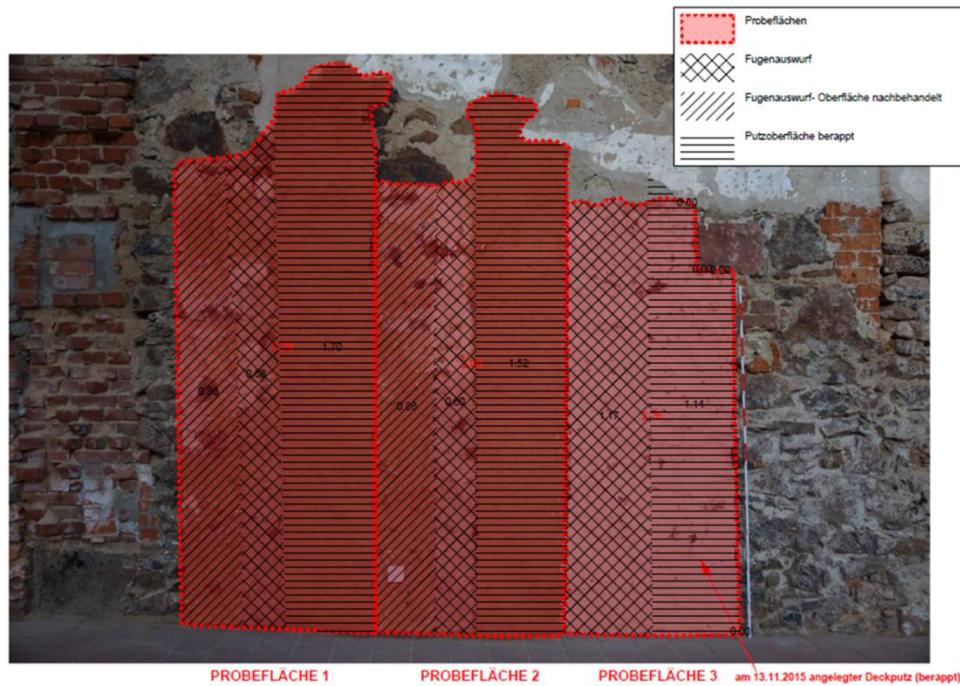


Abb.96:
Anlage von Putzmusterflächen (aus SCHMIDT 2015)

Musterflächen:

- 1: Fugenauswurf mit Heißkalkmörtel (**HK**) berappt, nachbehandelt, gekratzt, gebürstet
- 2: Fugenauswurf mit HK berappt
- 3: Fugenauswurf mit HK, Putzoberfläche mit trocken gelöschten Kalkmörtel (**TK**) berappt
- 4: Fugenauswurf mit TK berappt, nachbehandelt, gekratzt, gebürstet
- 5: Fugenauswurf mit TK berappt
- 6: Fugenauswurf mit TK, Putzoberfläche mit TK berappt
- 7: Fugenauswurf mit Porengrundputz „PPQ“ (Baumit) berappt
- 8: Fugenauswurf mit Porengrundputz „PPQ“, Putzoberfläche mit natürlich hydraulischer Kalkmörtel (**NHL**) berappt

3.4.2.4 Nachuntersuchungen an Musterflächen und Bewertung

Die Nachuntersuchungen (ZÖTZL 2018a) erfolgten am 09.03.2018, nahezu 3 Jahre nach der Applikation der Musterflächen (zu den Untersuchungsmethoden s. Abschnitt 3.3.1). In einem ersten Schritt wurden die Oberflächenmaterialverluste, sehr gut auf dem vorhandenen Fußbodenplatten nachweisbar, für jede Musterfläche dokumentiert (Abbildung 97 bis 99).

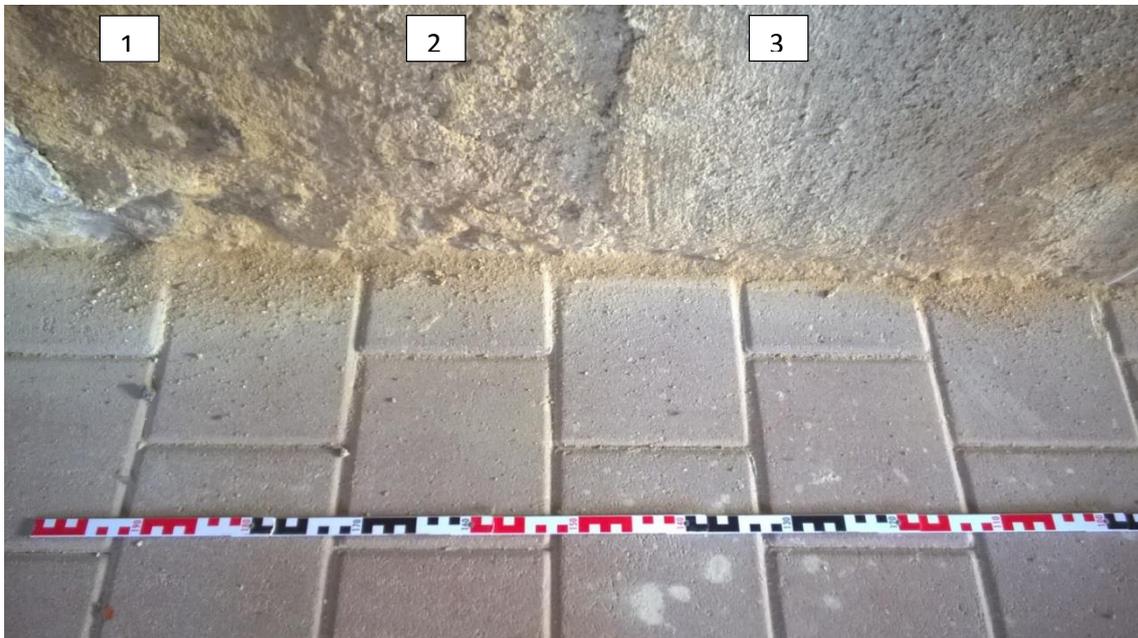


Abb. 97: Dokumentation der Oberflächenmaterialverluste

Musterflächen: 1: Fugenauswurf mit HK berappt, nachbehandelt, gekratzt, gebürstet; 2: Fugenauswurf mit HK berappt; 3: Fugenauswurf mit HK, Putzoberfläche mit TK berappt



Abb. 98: Dokumentation der Oberflächenmaterialverluste

Musterflächen: 4: Fugenauswurf mit TK berappt, nachbehandelt, gekratzt, gebürstet; 5: Fugenauswurf mit TK berappt; 6: Fugenauswurf mit TK, Putzoberfläche mit TK berappt

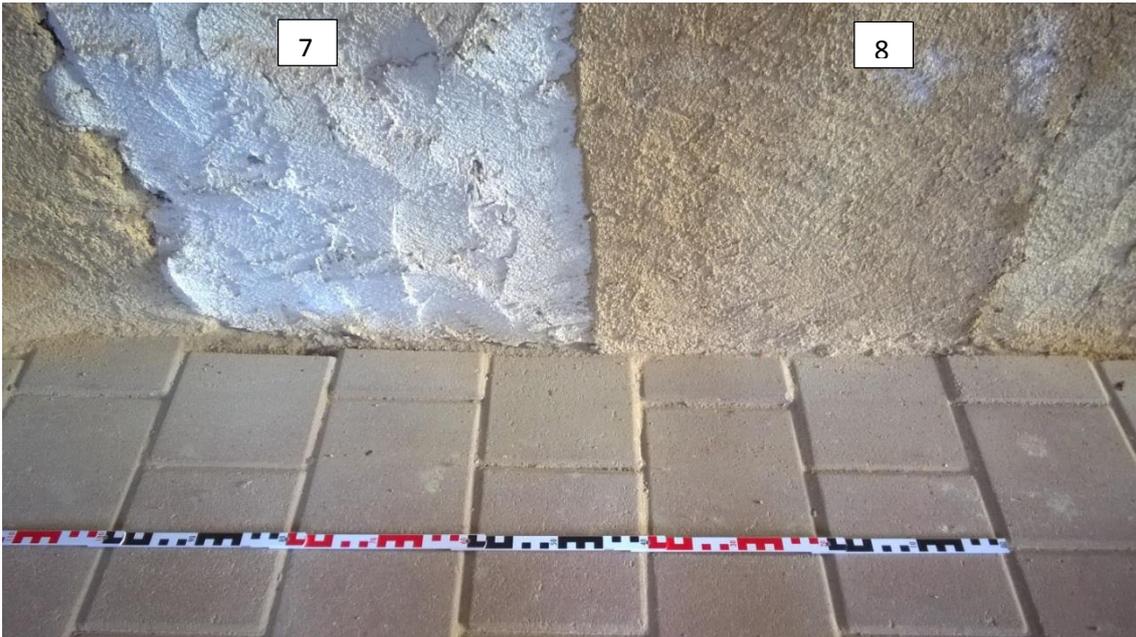


Abb. 99: Dokumentation der Oberflächenmaterialverluste
Musterflächen: 7: Fugenauswurf mit Porengrundputz „PPQ“ (Baumit) berappt;
8: Fugenauswurf mit Porengrundputz „PPQ“, Putzoberfläche mit NHL berappt

Danach wurden an allen Musterflächen in zwei Höhen vergleichende Untersuchungen zum Absanden der Putzoberflächen in den Höhenstufen 60 cm bis 70 cm (UNTEN) und 160 cm bis 170 cm (OBEN) durch Abpinseln einer Fläche von 10 x 10 cm durchgeführt (Abbildung 100).



Abb. 100: Vergleichende Untersuchungen zum Absanden der Putzoberflächen in den Höhenstufen 60 cm bis 70 cm und 160 cm bis 170 cm durch Abpinseln einer Fläche von 10 x 10 cm



Abb. 101: MF1: Fugenauswurf mit HK berappt, nachbehandelt, gekratzt, gebürstet: OBEN



Abb. 102: MF1: Fugenauswurf mit HK berappt, nachbehandelt, gekratzt, gebürstet: UNTEN



Abb. 103: MF2: Fugenauswurf mit HK berappt: OBEN



Abb. 104: MF2: Fugenauswurf mit HK berappt: UNTEN



Abb. 105: MF3: Fugenauswurf mit HK, Putzoberfläche mit TK berappt: OBEN



Abb. 106: MF3: Fugenauswurf mit HK, Putzoberfläche mit TK berappt: UNTEN



Abb. 107: MF4: Fugenauswurf mit TK berappt, nachbehandelt, gekratzt, gebürstet: OBEN



Abb. 108: MF4: Fugenauswurf mit TK berappt, nachbehandelt, gekratzt, gebürstet: UNTEN



Abb. 109: MF5: Fugenauswurf mit TK berappt: OBEN



Abb. 110: MF5: Fugenauswurf mit TK berappt: UNTEN



Abb. 111: MF6: Fugenauswurf mit TK, Putzoberfläche mit TK berappt: OBEN



Abb. 112: MF6: Fugenauswurf mit TK, Putzoberfläche mit TK berappt: UNTEN



Abb. 113: MF7: Fugenauswurf mit Porengrundputz „PPQ“ (Baumit) berappt: OBEN

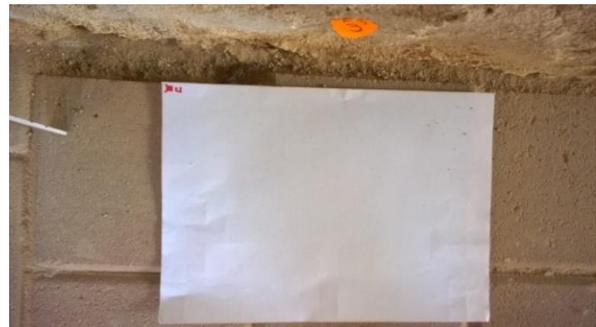


Abb. 114: MF7: Fugenauswurf mit Porengrundputz „PPQ“ (Baumit) berappt: UNTEN



Abb. 115: MF8: Fugenauswurf mit Porengrundputz „PPQ“, Putzoberfläche mit NHL berappt: OBEN



Abb. 116: MF8: Fugenauswurf mit Porengrundputz „PPQ“, Putzoberfläche mit NHL berappt: UNTEN

Die Heißkalkmusterflächen wurden mit einem Branntkalk, der als Granulat (1 cm große Branntkalkstücke) vorlag, auf Basis einer Baustellenmischung hergestellt. Dabei kam es bei

dem bereits applizierten Mörtel zu einem „Nachlöschen“ der nicht vollständig durchreagierten Kalkstücken (Spatzen) und damit verbunden zu Oberflächenverlusten. Gleichzeitig reicherten sich eisenhaltige Sandbestandteile in diesen Bereichen an. Die Dokumentation der Oberflächenmaterialverluste am Fuße der Musterflächen zeigte ein starkes Absanden im Bereich der Heißkalkmusterflächen (Abbildung 97), eine etwas geringeres Absanden der TK-Musterflächen (Abbildung 98) und nur sehr wenige Verluste an den Porenputz- und NHL-Flächen (Abbildung 99). Dies konnte mittels Abpinseltest (Abbildung 101 bis 116) bestätigt werden, wobei die im unteren Sockelbereich beprobten Flächen deutlich stärker absandeten als die in einer Höhe von 160 cm bis 170 cm.

Die Carbonatisierungstiefe der Luftkalkmörtelflächen wurde nach einer Standzeit der Flächen von fast 3 Jahren im cm-Abstand an Bohrmehl bis in eine Tiefe von 3 cm überprüft. Alle Luftkalkmörtelflächen 1 bis 6 zeigten eine vollständige Carbonatisierung bis in diese Tiefe.

Die Suche und Dokumentation von Ausblühsalzen auf den einzelnen Musterflächen zeigte Ausblühsalz-„Rasenflächen“ bei allen Musterflächen, auch auf dem Porengrundputz und dem NHL-Oberputz. Drei Proben von Ausblühsalzen wurden entnommen (Abbildung 117) und mittels XRD auf ihren Phasengehalt untersucht. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 37.



Abb. 117: Ausblühsalze im Bereich der Musterflächen, Probenahmepunkte ES1 bis ES3

Tab. 37: Mineralphasenbestand der Ausblühsalzproben

| Probe | Material | XRD-Phasenbestand | bauschädigende Salze |
|-------|-----------------------------------|---|---|
| ES1 | ES 1 auf HK-Oberfläche | Mg-Sulfathydrat, Kaliumnitrat, wenig Natriumchlorid | Mg-Sulfathydrat Kaliumnitrat Natriumchlorid |
| ES2 | auf Porenputz- und NHL-Oberfläche | Na-Sulfat, wenig Kaliumnitrat | Mg-Sulfathydrat Kaliumnitrat |
| ES3 | auf Porenputz-Oberfläche | Na-Sulfat, Natriumchlorid | Mg-Sulfathydrat Natriumchlorid |

Weiterhin erfolgten Bohrmehlprobenahmen in mit den Voruntersuchungen vergleichbaren Tiefenstufen (Abb. 118). Die Salzgehalte der Bohrmehlproben wurden analysiert und nach WTA-MERKBLATT "MAUERWERKSDIAGNOSTIK" (1999) bewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 38 dargestellt.



Abb. 118: Nachuntersuchungen der Salzbelastung an Musterflächen in der Klosterkirche Grimma, Probenahmepunkte TP1 bis TP9, Probenahme nach ca. 3 Jahren Standzeit

Die nachgewiesene höhere Salzbelastung im unteren Sockelbereich korreliert sehr gut mit einem in der Regel stärkeren Materialverlust in diesem Bereich der Putzflächen (vgl. Abbildung 101 bis 116). Die Salzuntersuchungen aller Musterflächen in vergleichbarer Höhe zeigen bereits wieder hohe Salzbelastungen hauptsächlich mit Nitraten. Die Ergebnisse der vergleichenden Untersuchungen zum Materialverlust ergeben für die luftkalkbasierten Materialien HK und TK eine geringe Widerstandsfähigkeit gegenüber der hohen Salzlast im Mauerwerk. Der TK scheint gegenüber dem HK geringfügig stabiler zu sein. Durch die Verarbeitung einer Baustellenmischung mit Stückkalk als Heißkalk wird neben der gewünschten Expansion nachlöschender Branntkalkstücken in der Fuge ein zusätzlicher Schädigungsmechanismus (lokale Treibkernbildung mit Abplatzungen) in Putzflächen ausgelöst.

Die hydraulischen erhärtenden Komponenten im Porengrundputz, aber auch im NHL-Putz bieten nach 3 Jahren Standzeit ausreichend Stabilität gegenüber der bestehenden Salzlast.

Tab. 38: Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Salzanalysen an den Bohrmehlproben und Bewertung der Ergebnisse nach WTA-MERKBLATT "MAUERWERKSDIAGNOSTIK" (1999) (rot: hoch, gelb: mittel, schwarz: gering)

| Probe | Anteile an löslichen Ionen in Ma.-% | | | | | | |
|--|-------------------------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ |
| HK-Fugenauswurf, Oberfläche nachbehandelt | | | | | | | |
| GN_TP_1_1 | 0,13 | 0,068 | 0,39 | 0,18 | 0,29 | 0,26 | 0,96 |
| GN_TP_1_3 | 0,013 | 0,024 | 0,16 | 0,065 | 0,051 | 0,083 | 0,32 |
| HK-Fugenauswurf | | | | | | | |
| GN_TP_2_1 | 0,092 | 0,024 | 0,23 | 0,11 | 0,063 | 0,16 | 0,62 |
| GN_TP_2_3 | 0,014 | 0,013 | 0,067 | 0,037 | 0,024 | 0,042 | 0,13 |
| HK-Fugenauswurf, TK-Putz berappt (1. Tiefenstufe) | | | | | | | |
| GN_TP3_1 | 0,11 | 0,074 | 0,16 | 0,11 | 0,24 | 0,15 | 0,65 |
| GN_TP_3_2 | 0,066 | 0,037 | 0,14 | 0,13 | 0,036 | 0,18 | 0,55 |
| GN_TP_3_3 | 0,011 | 0,019 | 0,077 | 0,058 | 0,02 | 0,075 | 0,19 |
| TK-Fugenauswurf, Oberfläche nachbehandelt | | | | | | | |
| GN_TP_4_1 | 0,08 | 0,11 | 0,23 | 0,12 | 0,41 | 0,094 | 0,56 |
| GN_TP_4_3 | 0,005 | 0,048 | 0,085 | 0,032 | 0,08 | 0,022 | 0,2 |
| TK-Fugenauswurf | | | | | | | |
| GN_TP_5_1 | 0,15 | 0,1 | 0,25 | 0,16 | 0,44 | 0,13 | 0,9 |
| GN_TP_5_3 | 0,005 | 0,047 | 0,059 | 0,034 | 0,055 | 0,021 | 0,19 |
| TK-Fugenauswurf, TK-Putz berappt (1. Tiefenstufe) | | | | | | | |
| GN_TP_6_1 | 0,07 | 0,047 | 0,2 | 0,14 | 0,13 | 0,13 | 0,7 |
| GN_TP_6_2 | 0,006 | 0,05 | 0,069 | 0,051 | 0,09 | 0,04 | 0,14 |
| GN_TP_6_3 | 0,006 | 0,047 | 0,072 | 0,04 | 0,057 | 0,029 | 0,14 |
| PPQ-Fugenauswurf und Putzoberfläche berappt | | | | | | | |
| GN_TP_7_1 | 0,16 | 0,021 | 0,3 | 0,31 | 0,66 | 0,13 | 0,58 |
| GN_TP_7_3 | 0,014 | 0,011 | 0,039 | 0,014 | 0,043 | 0,007 | 0,032 |
| PPQ-Fugenauswurf, NHL-Putz berappt (1. Tiefenstufe) | | | | | | | |
| GN_TP8_1 | 0,034 | 0,012 | 0,13 | 0,18 | 0,12 | 0,094 | 0,47 |
| GN_TP_8_2 | 0,07 | 0,006 | 0,12 | 0,47 | 0,84 | 0,06 | 0,23 |
| GN_TP_8_3 | 0,013 | 0,008 | 0,048 | 0,022 | 0,044 | 0,008 | 0,03 |
| HK-TK-Mischputz (Anlage 11/2017) | | | | | | | |
| GN_TP_9_1 | 0,62 | < 0,001 | 0,044 | 0,012 | 0,001 | 0,008 | 0,051 |
| GN_TP_9_2 | 0,77 | < 0,001 | 0,029 | 0,008 | 0,003 | 0,007 | 0,031 |

Die für die Anlage der Musterflächen ausgewählten Wandbereiche stellen auf Grund der erhöhten bis hohen Feuchtebelastung im Sockelbereich und der hohen Belastung mit den stark bauschädigenden Salzen wie Kaliumnitrat und Magnesiumsulfathydrat eine typische Belastung eines historischen Gebäudes in Sachsen im Verbreitungsgebiet der Dolomitkalkmörtel dar.

Eine gute Flankenhaftung der HK-Putze wird im Fugenbereich festgestellt. In der Putzfläche haben sie sich in diesem Anwendungsfall jedoch weniger gut bewährt, was wohl vor allem der Verarbeitung eines Branntkalk-Stückerkalks als Baustellenmischung zuzuschreiben ist

Auf Grundlage der Evaluierung der Musterflächen wurde für die notwendige Instandsetzungsmaßnahme im Innenraum der Klosterkirche Grimma ein Kompromiss zwischen einer guten Anbindung im Fugenbereich und einer höheren Widerstandsfähigkeit gegenüber der anstehenden Salzlaster angestrebt, der durch Anwendung eines Branntkalks auf Pulverbasis in Mischung mit einem NHL erzielt werden sollte. Die Entscheidung zur Applikation wurde nach zwei Jahren Monitoring, im Rahmen einer Bauberatung im Jahr 2017 getroffen. Das Material wurde Anfang November 2017 im Sockelbereich umlaufend appliziert und konnte nach einer Standzeit von 4 Monaten mit untersucht werden. Zu diesem Zeitpunkt konnten keine Schäden oder Salzausblühungen auf Oberflächen festgestellt werden. Die Salzbelastung im Putzquerschnitt wurde mit „gering“ bewertet.

3.4.3 Magdeburg, Kloster Unserer Lieben Frauen, Krypta, Heißkalkmusterflächen

Die Anlage der Heißkalkmusterfläche in der Krypta des Klosters Unserer Lieben Frauen in Magdeburg erfolgte an stark salzbelastetem Mauerwerk auf Empfehlung des IDK und auf Veranlassung der beauftragten Architektin, Frau R. Hartkopf, bzw. der Stadt Magdeburg am 01. und 05.12.2016 und durch den Restaurator Dr. W. Wedekind. Im Vorfeld der Anlage der Putzfläche wurden durch das IDK am 26.08.2016 Voruntersuchungen am Mauerwerk durchgeführt (ZÖTZL & KERSTEN 2016; ZÖTZL 2017a). Die Nachuntersuchungen der Musterfläche (im Vergleich mit zwei weiteren Putzflächen) erfolgten im Januar 2018 (ZÖTZL 2018b). Die Ergebnisse wurden beim zweiten Projekt-Workshop am 19.03.2018 an der HfBK Dresden in einem Vortrag präsentiert.



Abb. 119: Magdeburg, Kloster Unserer Lieben Frauen, Krypta, Aufnahme nach Abnahme der Putzfassung

3.4.3.1 Voruntersuchungen und Interpretation der Ergebnisse

Die Voruntersuchungen des Mauerwerks erfolgten am 26.08.2016. Für die Untersuchungen zur Feuchte- und Salzbelastung wurden Bohrmehlhöhen- und -tiefenprofile angelegt. Die Tabelle 39 informiert über die Probenahme und die Art der durchgeführten Untersuchungen. Die Abbildung 120 und 121 dokumentieren die Probenahmepunkte. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen die Tabellen 40 und 41.

Tab. 39: Probenübersicht: Bei allen Proben wurde die Materialfeuchte bestimmt und eine Analyse des löslichen Gesamtsalzgehalts und der Leitfähigkeit durchgeführt. Bei bestimmten Proben erfolgten qualitative und quantitative Schadsalzuntersuchungen mit Bestimmung der An- und Kationen

| Probennummer | Entnahmeort | Bemerkungen | Analysen |
|--|-------------|---|---|
| Krypta, Südwand, innen, Probenahmepunkt TP5, 30 cm über Fußboden | | | |
| MD_K_PUTZ_TP5 | Putz | starke Putzschäden (Hohlstellen, Fehlstellen, Salzausblühungen) | Feuchte qualitative und quantitative An- und Kationenbestimmung |
| MD_K_TP5_1 | 0-2 cm | Fuge unterhalb Putzoberfläche | Feuchte qualitative und quantitative An- und Kationenbestimmung |
| MD_K_TP5_2 | 2-5 cm | dito | Feuchte Analyse lösl. Gesamtsalzgehalt |
| MD_K_TP5_3 | 5-10 cm | dito | Feuchte Analyse lösl. Gesamtsalzgehalt |
| MD_K_TP5_4 | 10-20 cm | dito | Feuchte Analyse lösl. Gesamtsalzgehalt |
| MD_K_TP5_5 | 20-30 cm | dito | Feuchte Analyse lösl. Gesamtsalzgehalt |
| MD_K_TP5_6 | 30-40 cm | dito | Feuchte Analyse lösl. Gesamtsalzgehalt |
| Krypta, Südwand, innen, Probenahmepunkt TP6, 112 cm über Fußboden | | | |
| MD_K_PUTZ_TP6 | Putz | starke Putzschäden (Hohlstellen, Fehlstellen, Salzausblühungen) | qualitative und quantitative An- und Kationenbestimmung |
| MD_K_TP6_1 | 0-2 cm | Fuge unterhalb Putzoberfläche | qualitative und quantitative An- und Kationenbestimmung |
| MD_K_TP6_2 | 2-5 cm | dito | Feuchte Analyse lösl. Gesamtsalzgehalt |
| MD_K_TP6_3 | 5-10 cm | dito | Feuchte Analyse lösl. Gesamtsalzgehalt |
| MD_K_TP6_4 | 10-20 cm | dito | Feuchte Analyse lösl. Gesamtsalzgehalt |
| MD_K_TP6_5 | 20-30 cm | dito | Feuchte Analyse lösl. Gesamtsalzgehalt |
| MD_K_TP6_6 | 30-40 cm | dito | Feuchte Analyse lösl. Gesamtsalzgehalt |



Abb. 120: Krypta, Südwand, innen, Voruntersuchungen, Probenahmepunkte TP5 und TP6, Übersicht



Abb. 121: Krypta, Südwand, innen, Voruntersuchungen, Probenahmepunkte TP5 und TP6, Detail

Tab. 40: Ergebnisse der Untersuchungen des löslichen Gesamtsalzgehaltes, der Feuchte, Leitfähigkeit und des pH-Wertes an Bohrmehlproben

| Probe | Tiefenstufe [cm] | Lf ₂₅₀ [μS/cm] | pH [-] | ∑ wasserlös. Bestandteile [Ma.-%] | Feuchte [Ma.-%] |
|---|---------------------|------------------------------|-----------|---|--------------------|
| Krypta, Südwand, innen, Probenahmepunkt TP5, 30 cm über Fußboden | | | | | |
| MD_K_PUTZ_TP5 | Putz | 283 | 6,60 | 2,20 | - |
| MD_K_TP5_1 | 0-2 cm | 884 | 6,60 | 6,74 | 15,08 |
| MD_K_TP5_2 | 2-5 cm | 619 | 6,76 | 5,38 | 15,05 |
| MD_K_TP5_3 | 5-10 cm | 181 | 7,71 | 0,65 | 8,41 |
| MD_K_TP5_4 | 10-20 cm | 41 | 7,93 | <0,12 | 2,64 |
| MD_K_TP5_5 | 20-30 cm | 51 | 7,63 | 0,14 | 6,47 |
| MD_K_TP5_6 | 30-40 cm | 59 | 7,66 | 0,16 | 6,13 |
| Krypta, Südwand, innen, Probenahmepunkt TP6, 112 cm über Fußboden | | | | | |
| MD_K_PUTZ_TP6 | | 598 | 6,78 | 3,30 | - |
| MD_K_TP6_1 | 0-2 cm | 178 | 7,57 | 1,09 | 4,48 |
| MD_K_TP6_2 | 2-5 cm | 137 | 7,73 | 0,45 | 7,08 |
| MD_K_TP6_3 | 5-10 cm | 62 | 7,26 | 0,12 | 6,57 |
| MD_K_TP6_4 | 10-20 cm | 57 | 7,40 | 0,12 | 5,71 |
| MD_K_TP6_5 | 20-30 cm | 70 | 7,25 | 0,23 | 2,86 |
| MD_K_TP6_6 | 30-40 cm | 40 | 7,41 | 0,15 | 3,13 |

Tab. 41: Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Salzanalysen an den Bohrmehlproben und Bewertung der Ergebnisse nach WTA-MERKBLATT "MAUERWERKSDIAGNOSTIK" (1999) (rot: hoch, gelb: mittel, schwarz: gering)

| Probe | Anteile an löslichen Ionen in Ma.-% | | | | | | |
|--|-------------------------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ |
| Krypta, Südwand, innen, Probenahmepunkt TP5, 30 cm über Fußboden | | | | | | | |
| MD_K_PUTZ_T/P5 | 0,196 | 0,045 | 0,326 | 0,053 | 0,060 | 0,181 | 0,828 |
| MD_K_TP5/1 | 0,664 | 0,078 | 0,505 | 0,106 | 0,606 | 0,355 | 2,852 |
| Krypta, Südwand, innen, Probenahmepunkt TP6, 112 cm über Fußboden | | | | | | | |
| MD_K_TP6/1 | 0,224 | 0,040 | 0,029 | <0,005 | 0,327 | 0,033 | 0,144 |

Im Bereich der Krypta wurden an Wandbereichen und im Fußboden starke Schäden in Putz und Fußbodenestrich festgestellt. Nach Bewertung der Untersuchungsergebnisse erfolgt die Befeuchtung der Wandflächen von außen über das anstehende Erdreich, sowie durch die oberflächennah nachgewiesenen hygroskopischen Salze (Nitrate, Chloride) und durch Kondensationsfeuchte. Der im Jahr 2004 applizierte Luftkalkputz (Opferputz) zeigt teilweise eine extreme Anreicherung von Schadsalzkationen in der Zone bis 5 cm unterhalb der Oberfläche. Eine Wiederholung des erprobten Vorgehens bei der Putzerneuerung würde in einem ähnlichen Zeitraum eine effektive Salzreduzierung bewirken. Allein reine *Luftkalkputze*, magnesium- und alkalifrei, tragen keine zusätzlichen Schadsalzkationen in das bereits stark durch Schadsalzanionen belastete Mauerwerk ein.

Allerdings sollte eine zu starke Verdichtung der Oberfläche vermieden werden. Vielmehr könnte versucht werden, einen kapillaren Transport der Salze an die Oberfläche zu ermöglichen. Diese könnten dann abgesaugt und entsorgt werden. Um hier geeignete Festigkeiten, gute Haftungen und ein gut ausgebildetes Porensystem zu erreichen, wurde die Applikation als Heißkalk empfohlen. Diese sollte über einen in dieser Technik erfahrenen Handwerker oder Restaurator erfolgen.

Im Rahmen anzulegender Musterflächen wurden, neben der Heißkalkapplikation, auch zu einem Teil hydraulisch erhärtende Putze vorgeschlagen, die naturgemäß sehr wenig Alkalien eintragen, langsam riss- und spannungsarm erhärten und eine gute Standhaftigkeit gegenüber einer Schadsalzbelastung entwickeln. Die Anwendung von Romanzement-Kalk-Putzen sowie NHL-basierten Putzen sollte untersucht werden.

In Vorbereitung der Anlage von Putzmusterflächen sollten die Fugen bis in eine Tiefe von 5 cm ausgeräumt werden, um die mit Schicht zu reduzieren in der Schadsalzkationen aufkonzentriert waren.

3.4.3.2 Anlage und Nachuntersuchungen der Heißkalkmusterfläche

Die Nachuntersuchungen der Musterflächen in der Krypta des Klosters Unserer Lieben Frauen erfolgten reichlich 1 Jahr nach deren Anlage im Januar 2018. Die Applikation der Musterfläche durch W. Wedekind erfolgte Ende 2016 in zwei Schritten. Zum Einsatz kam der regionale Wegelebener Sand und ein Brantkalk (Pulver, CL90 Q) der Firma Rygol. Gleichzeitig erfolgte durch die Firma Steinservice die Anlage weiterer zwei Musterflächen, einmal auf Basis einer Baustellenmischung aus Wegelebener Sand mit einem NHL2 der Firma Otterbein, des weiteren mit einem Trockenmörtelprodukt der Firma ROCEM-Plaster.



Abb. 122: Magdeburg, Kloster Unserer Lieben Frauen, Krypta, Anlage der Musterflächen Ende 2016, Aufnahme am 02.12.2016



Abb. 123: Magdeburg, Kloster Unserer Lieben Frauen, Krypta, Aufnahme am 08.02.2017

Die Probenahme erfolgte am 09.01.2018. Für die Nachuntersuchungen zur Salzbelastung wurden zwei Bohrmehltiefenprofile angelegt. Tabelle 42 informiert über die Probenahme und die Art der durchgeführten Untersuchungen. Abbildung 124 dokumentiert die Probenahme.

Tab. 42: Probenübersicht

| Probennummer | Entnahmeort | Bemerkungen | Analysen |
|--|-------------|-------------------------------------|---|
| Krypta, Südwand, Heißkalkmusterfläche, Probenahmepunkt, ca. 35 cm über Fußboden | | | |
| KULF_M_HK1 | 0-2 cm | Putzoberfläche | qualitative und quantitative An- und Kationenbestimmung |
| KULF_M_HK2 | 2-5 cm | Fuge | qualitative und quantitative An- und Kationenbestimmung |
| KULF_M_HK3 | 5-10 cm | Fuge | qualitative und quantitative An- und Kationenbestimmung |
| Krypta, Südwand, Heißkalkmusterfläche, Probenahmepunkt ca. 135 cm über Fußboden | | | |
| KULF_M_HKPT2 | 0-2 cm | Putzoberfläche, unterhalb Steinlage | qualitative und quantitative An- und Kationenbestimmung |



Abb. 124: Magdeburg, Kloster Unserer Lieben Frauen, Krypta, Heißkalkmusterfläche: Probenahmepunkte in ca. 35 cm und 135 cm Höhe, Aufnahme am 09.01.2018

Die Ergebnisse der qualitativen und quantitativen An- und Kationenanalysen an Proben werden in der Tabelle 43 dargestellt.

Tab. 43: Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Salzanalysen an den Bohrmehlproben und Bewertung der Ergebnisse nach WTA-Merkblatt 4-5-99/D "Mauerwerksdiagnostik" (schwarz: gering; gelb: mittel; rot: hoch)

| Probe | Anteile an löslichen Ionen in Ma.-% | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ |
| Heißkalkmusterfläche | | | | | | | |
| KULF_M_HK1 | 0,67 | 0,00005 | 0,047 | 0,006 | 0,011 | 0,028 | 0,069 |
| KULF_M_HK2 | 0,31 | 0,00005 | 0,043 | 0,008 | 0,012 | 0,024 | 0,011 |
| KULF_M_HK3 | 0,034 | < 0,00005 | 0,046 | 0,01 | 0,064 | 0,012 | 0,033 |
| Heißkalkmusterfläche | | | | | | | |
| KULF_M_HKPT2 | 0,67 | 0,00005 | 0,05 | 0,01 | 0,0043 | 0,04 | 0,17 |

Die Putzoberfläche der Heißkalkmusterfläche zeigte während des Monitorings eine Vielzahl von Schwindrissen (Abbildung 124). Die Oberfläche der Heißkalkmusterfläche weist schwarzbraune Verfärbungen auf (Abbildung 123), die untersucht wurden. Dabei handelt es sich um Teerbestandteile, die ebenfalls auf den Oberflächen des Natursteinmauerwerks nachgewiesen werden können und Reste einer früheren Sperrschicht darstellen (Abbildung 122). Nach Applikation des Heißkalkmörtels wurden diese im alkalischen Milieu gelöst und durch die Putzschicht an deren Oberfläche transportiert.

Nach Abnahme der Putzschicht wurde der Fugenverbund Stein-Heißkalk untersucht. Dieser ist augenscheinlich gut ausgebildet. Die Nachuntersuchungen der Bohrmehltiefenprofile zeigt bereits wieder eine Einwanderung der in den Voruntersuchungen nachgewiesenen Schadsalzionen in die Putzoberfläche. Die vorgefundene Konzentration korreliert erwartungsgemäß mit der Löslichkeit der Salze. Oberflächennah sind Nitratkonzentrationen mit „gering“ und „mittel“ zu bewerten, Sulfat- und Chlorid werden mit „gering“ bewertet.

Trotz nachgewiesener Salzbelastung, vieler Schwindrisse und einer braun bis schwarz verfärbten Oberfläche steht die Heißkalkfläche gut und zeigt kein Absanden, auch nicht in bodennahen Bereichen. Das Erscheinungsbild ist dagegen für einen Ausstellungsraum nicht akzeptabel.

Nach Bewertung der Putzmuster wurde für die Restaurierungsmaßnahme empfohlen, die im Sinne der Salzreduzierung stark ausgearbeiteten Fugen mittels Heißkalktechnik zu verschließen und den Putz auf Basis eines trocken gelöschten Kalkputzes in Baustellenmischung zu applizieren. Die Ausführung der Arbeiten erfolgte im Januar 2018 durch die Firma Steinservice. Die Teerbestandteile auf den Natursteinoberflächen wurden vor den Arbeiten mechanisch entfernt.



Abb. 125: Krypta, Südwand, innen:
Schwindrisse im oberen Bereich der
Musterfläche



Abb. 126: Krypta, Südwand, innen: verbliebene
schwarze Teerreste einer früheren
Sperrschicht auf Natursteinoberflächen



Abb. 127: Magdeburg, Kloster Unserer Lieben Frauen, Krypta, Heißkalkmusterfläche: vermutlich durch
gelöste Teerbestandteile braun bis schwarz verfärbte Oberfläche, Aufnahme am 18.01.2018

3.4.3.3 Evaluierung der Restaurierung

Ca. 14 Monate nach der Ausführung, am 27.03.2019, erfolgte eine erste Inaugenscheinnahme (ZÖTZL 2019c). Die Wandbereiche stehen gut, in einem nachweislich stark mit Schadsalzen beaufschlagten Bereich werden Effloreszenzen auf Oberflächen beobachtet. Die gute Porosität des applizierten Wandaufbaus aus Heißkalkmörtel im ausgearbeiteten Fugenbereich und einem kalt angetragenen Luftkalkputz führen zu einer Anreicherung der Schadsalze an der Oberfläche, ohne den Putz sichtbar zu schädigen. Die Salze lassen sich leicht durch Absaugen entfernen.



Abb. 128: Krypta im restaurierten Zustand, Aufnahme am 27.03.2019



Abb. 129: Krypta, Südwand, Putz mit Effloreszenzen im Sockelbereich. Salze können leicht von der Oberfläche abgesaugt werden. Aufnahme am 27.03.2019

3.4.4 Zeitz, Michaeliskirche, Instandsetzung Strebepfeiler in Heißkalktechnik

Der Heißkalkeinsatz an der Michaeliskirche in Zeitz diente der kraftschlüssigen Verfüllung großer ausgewitterter Hohlräume an einem stark geschädigten Strebepfeiler der Südseite (Abbildung 130) mit einem an den Zeitzer Sandstein angepassten Mörtel auf Heißkalkbasis. Die Schadensbilder mit tiefen Auswitterungen im Sandstein zeigen die Abbildung 131 bis 133. Als Zuschlag diente ein gebrochener Sandsteinsand 0,1 bis 0,5 mm, der aus einem lokalen Sandstein hergestellt wurde. Das Bindemittel-Zuschlagverhältnis betrug 1:3, das Bindemittel setzte sich aus einem Branntkalk CL 80Q und einem Portlandweiszement zusammen. Zuvor wurde der Strebepfeiler einer aufwändigen Salzminderungsmaßnahme unterzogen. Auf die Oberfläche der restaurierten Bereiche wurde eine Sumpfkalkschlämme appliziert. Die Arbeiten wurden durch den Restaurator Dr. W. Wedekind konzipiert und im Jahr 2014 durchgeführt (WEDEKIND 2015). Die Projektleitung erfolgte durch die Dombaumeisterin Frau R. Hartkopf.



Abb. 130: Zeitz, Michaeliskirche, Strebepfeiler, Restaurierung in Heißkalktechnik



Abb. 131: Michaeliskirche, Westseite, Fassadenelemente aus Zeitzer Sandstein mit deutlichen Spuren einer erheblichen Salzverwitterung



Abb. 132: Herauswittern von Steinbereichen mit geringerer Festigkeit (Alveolarverwitterung).



Abb. 133: Herauswittern von Steinbereichen mit geringerer Festigkeit (Alveolarverwitterung). Das im Vergleich zum Stein witterungsresistentere (zu feste und dichte) Fugenmaterial bleibt bestehen.

3.4.4.1 Probenahme

Die Nachuntersuchungen erfolgten am 02.03.2018 (ZÖTZL 2018c). Für die Untersuchungen zur Feuchte- und Salzbelastung wurden Bohrmehlhöhen- und -tiefenprofile angelegt. Tabelle 44 informiert über die Probenahme und die Art der durchgeführten Untersuchungen. Die Abbildung 134 und 135 dokumentieren die Probenahme.

Tab. 44: Probenübersicht

| Probennummer | Tiefenstufe [cm] | Material | Analysen |
|--|------------------|-------------------------------|---|
| Tiefenprofil im Heißkalk, tiefe Ergänzung, Bohrmehl | | | |
| ZM_TP1_1 | 0-1 | Sumpfkalkschlämme, Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe An- und Kationenanalyse |
| ZM_TP1_2 | 1-2 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe An- und Kationenanalyse |
| ZM_TP1_3 | 2-3 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe |
| ZM_TP1_4 | 3-4 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe |
| ZM_TP1_5 | 4-5 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe |
| ZM_TP1_6 | 5-6 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe An- und Kationenanalyse |
| ZM_TP1_7 | 6-7 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe |
| ZM_TP1_8 | 7-8 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe |
| ZM_TP1_9 | 8-9 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe |
| ZM_TP1_10 | 9-10 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe An- und Kationenanalyse |

Fortsetzung der Tabelle auf der nächsten Seite

| Tiefenprofil im Heißkalk, Fuge, Bohrmehl | | | |
|--|-----|-------------------------------|--|
| ZM_TP2_1 | 0-1 | Sumpfkalkschlämme, Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe An- und Kationenanalyse |
| ZM_TP2_2 | 1-2 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe |
| ZM_TP2_3 | 2-3 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe |
| ZM_TP2_4 | 3-4 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe |
| ZM_TP2_5 | 4-5 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe |
| ZM_TP2_6 | 5-6 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe |
| ZM_TP2_7 | 6-7 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe |
| Tiefenprofil im <u>Naturstein</u> , Bohrmehl | | | |
| ZM_TP3_1 | 0-1 | Sumpfkalkschlämme, Sandstein | Carbonatisierungstiefe An- und Kationenanalyse |
| ZM_TP3_2 | 1-2 | Sandstein | Carbonatisierungstiefe An- und Kationenanalyse |
| ZM_TP3_3 | 2-3 | Sandstein | Carbonatisierungstiefe An- und Kationenanalyse |

Die Untersuchung der Proben erfolgte mit der in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Analysenmethodik.



Abb. 134: Zeitz, Michaeliskirche, beprobter Strebe Pfeiler

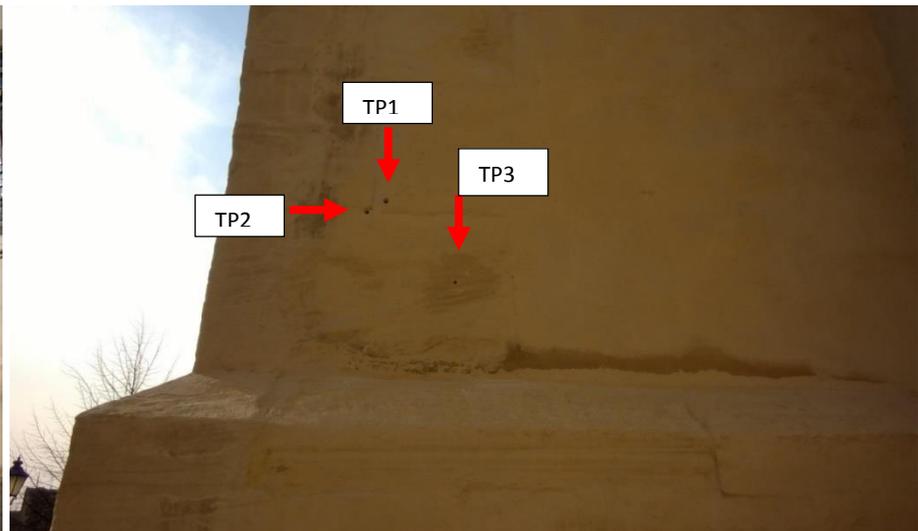


Abb. 135: Zeitz, Michaeliskirche, beprobter Strebe Pfeiler. TP1: tiefe Ergänzung, TP2: Heißkalfuge, TP3: Naturstein. Oberflächenfassung mittels Sumpfkalkschlämme, z.T. braune Schleier auf Oberfläche

3.4.4.2 Ergebnisse und Interpretation

Die Ergebnisse der qualitativen und quantitativen An- und Kationenanalysen an ausgesuchten Proben werden in Tabelle 45 dargestellt und nach WTA-MERKBLATT "MAUERWERKSDIAGNOSTIK" (1999) bewertet.

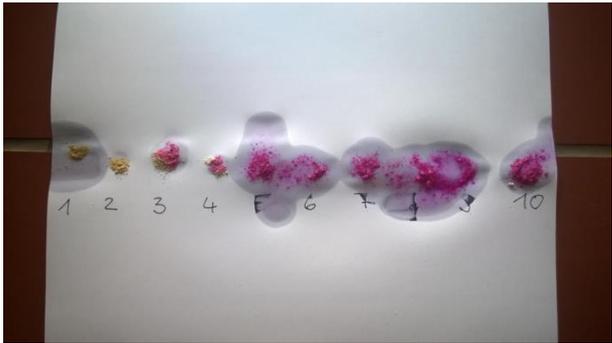
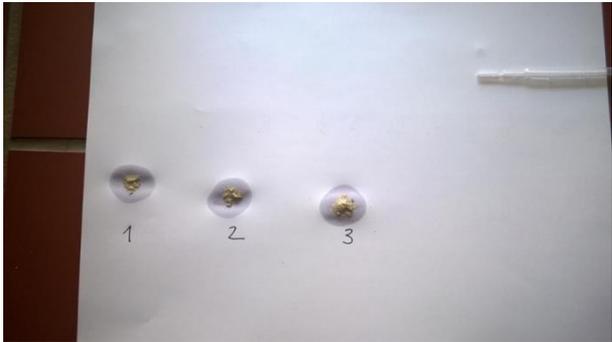
Tab. 45: Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Salzanalysen an den Bohrmehlproben und Bewertung nach WTA-MERKBLATT "MAUERWERKSDIAGNOSTIK" (1999) (rot: hoch, gelb: mittel, schwarz: gering)

| Tiefenstufe [cm] | Probe | Anteile an löslichen Ionen in Ma.-% | | | | | | |
|--|------------|-------------------------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| | | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ |
| TP 1: Tiefenprofil im Heißkalk, tiefe Ergänzung, Bohrmehl | | | | | | | | |
| 0-1 | ZM_TP1_1 | 0,05 | 0,007 | 0,13 | 0,067 | 0,066 | 0,064 | 0,30 |
| 1-2 | ZM_TP_1_2 | 0,03 | 0,009 | 0,15 | 0,092 | 0,030 | 0,095 | 0,41 |
| 5-6 | ZM_TP_1_6 | 0,66 | 0,001 | 0,1 | 0,049 | 0,004 | 0,039 | 0,22 |
| 9-10 | ZM_TP_1_10 | 0,67 | < 0,001 | 0,07 | 0,022 | 0,002 | 0,019 | 0,09 |
| TP2: Tiefenprofil im Heißkalk, Fuge, Bohrmehl | | | | | | | | |
| 0-1 | ZM_TP_2_1 | 0,12 | 0,082 | 0,06 | 0,057 | 0,420 | 0,088 | 0,25 |
| TP3: Tiefenprofil im <u>Naturstein</u>, Bohrmehl | | | | | | | | |
| 0-1 | ZM_TP_3_1 | 0,06 | 0,012 | 0,11 | 0,072 | 0,035 | 0,090 | 0,42 |
| 1-2 | ZM_TP_3_2 | 0,07 | 0,023 | 0,12 | 0,083 | 0,043 | 0,120 | 0,46 |
| 2-3 | ZM_TP_3_6 | 0,75 | < 0,001 | 0,07 | 0,027 | 0,003 | 0,022 | 0,13 |

Die Analysen der Schadsalzgehalte zeigen in beiden Profilen oberflächennah eine Anreicherung von Nitrat, die nach WTA-Merkblatt Mauerwerksdiagnostik mit „mittel“/„hoch“ zu bewerten ist. Das leicht lösliche Salz wird im TP 1 bis in eine Tiefe von 6 cm mit der Bewertung „mittel“/„hoch“ und in der Tiefenstufe 9 cm bis 10 cm mit der Bewertung „gering“/„mittel“ nachgewiesen. Vergleichende Untersuchungen im Sandstein zeigen bis in eine Tiefe von 3 cm vergleichbare Werte. Auffällige Mg-Sulfat-Konzentrationen wurden weder im Heißkalk-Tiefenprofil TP1 noch im Sandsteinprofil TP3 nachgewiesen. Allein das Profil TP 2 zeigt in der untersuchten ersten Tiefenstufe eine mit „gering“/„mittel“ einzustufende Sulfatkonzentration und zudem eine Anreicherung von Mg-Ionen, die auf eine Bildung von Magnesiumsulfathydraten schließen lassen.

Im Rahmen der Nachuntersuchungen erfolgte auch die Bestimmung der Carbonatisierungstiefe mittels Phenolphthalein an Bohrmehlproben, die im cm-Abstand entnommen wurden. Tabelle 46 zeigt die Ergebnisse.

Tab. 46: Bestimmung der Carbonatisierungstiefe im Tiefenprofil

| Probennummer | Tiefenstufe [cm] | Entnahmeort | Analysen |
|--|------------------|--|----------|
| Tiefenprofil im Heißkalk, tiefe Ergänzung, Bohrmehl | | | |
| ZM_TP1_1 | 0-1 |  | |
| ZM_TP1_2 | 1-2 | | |
| ZM_TP1_3 | 2-3 | | |
| ZM_TP1_4 | 3-4 | | |
| ZM_TP1_5 | 4-5 | | |
| ZM_TP1_6 | 5-6 | | |
| ZM_TP1_7 | 6-7 | | |
| ZM_TP1_8 | 7-8 | | |
| ZM_TP1_9 | 8-9 | | |
| ZM_TP1_10 | 9-10 | | |
| Tiefenprofil im Heißkalk, Fuge, Bohrmehl | | | |
| ZM_TP2_1 | 0-1 |  | |
| ZM_TP2_2 | 1-2 | | |
| ZM_TP2_3 | 2-3 | | |
| ZM_TP2_4 | 3-4 | | |
| ZM_TP2_5 | 4-5 | | |
| ZM_TP2_6 | 5-6 | | |
| ZM_TP2_7 | 6-7 | | |
| Tiefenprofil im <u>Naturstein</u>, Bohrmehl | | | |
| ZM_TP3_1 | 0-1 |  | |
| ZM_TP3_2 | 1-2 | | |
| ZM_TP3_3 | 2-3 | | |

Die Untersuchungen der Carbonatisierungstiefen im cm-Maßstab an frisch im Tiefenprofil (bis in eine Tiefe von 7 cm und 10 cm) entnommenen Bohrmehlproben zeigen in beiden Tiefenprofilen der Heißkalkmörtel eine Carbonatisierung bis in eine Tiefe von ca. 2 cm. Die Ergebnisse werden durch die Salzanalysen bestätigt (geringe Werte für lösliches Ca). Danach erfolgte bisher, nach ca. 3,5 Jahren Standzeit, nur oberflächennah eine durch Carbonatisierung bestimmte Festigkeitsentwicklung. Im Fall der über 10 cm tiefen Hohlraumverfüllung werden unterhalb dieser 2 cm geringere Festigkeitswerte erwartet, die auf eine Verzahnung der Portlanditkristalle, aber auch auf eine hydraulische Reaktion der Zementmineralphasen des Weißzements im Zuschlag-Bindemittel-Gefüge zurückgeführt werden können. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Carbonatisierung in Folge der Bewitterung im Laufe der Jahre weiter langsam voranschreitet.

Die in Heißkalktechnik restaurierten Bereiche stehen augenscheinlich gut, trotz einer (stichprobenartig bestimmten) nach WTA-MERKBLATT "MAUERWERKSDIAGNOSTIK" (1999) mit „mittel“/„hoch“ einzustufenden Nitratbelastung, die in Korrelation mit den ebenfalls bestimmten K-Kationen auf eine Kalisalpeterbildung hinweisen. Auffällig sind wenige braunschwarze Verfärbungen, die in Randbereichen auf Oberflächen aufliegen. Diese lassen einen Transport von Fe- und Mn-reichen Komponenten an die Oberfläche vermuten. Deren Lösung kann im alkalischen Milieu des Heißkalkmörtels erfolgt sein.

3.4.5 Schlosspark Mosigkau, Chinesischer Pavillon, Nachuntersuchungen an Heißkalkflächen

Die Restaurierung der Außenfassaden des Chinesischen Pavillons im Schlosspark Mosigkau in Heißkalktechnik erfolgte auf Veranlassung des beauftragten Architekten, Herrn Gebhardt (Fa. gebhardtplan), bzw. der Kulturstiftung Dessau-Wörlitz im Jahr 2016 durch B. Bubnick (Fa. Bubnick). Im Vorfeld der Anlage erfolgten Mörtelanalysen des Bestandputzes. Die Nachuntersuchungen durch das IDK wurden am 13.03.2018 durchgeführt (ZÖTZL 2018d). Sie beschränken sich auf eine visuelle Inaugenscheinnahme der Oberflächen, da keine Erlaubnis für eine gering invasive Probenahme bestand. Die Ergebnisse wurden beim zweiten Projekt-Workshop am 19.03.2018 an der HfBK Dresden in einem Vortrag präsentiert.



Abb. 136: Schlosspark Mosigkau, Chinesischer Pavillon, Aufnahme am 13.03.2018

3.4.5.1 Restaurierung der Fassadenputze

Die folgenden Ausführungen zum Bauablauf wurden inhaltlich der durch B. Bubnick am 05.07.2017 erstellten Bauablaufdokumentation entnommen (BUBNICK 2017). Bei dem Pavillon handelt es sich um einen eingeschossigen Fachwerkbau mit vollständig überputzten Außenflächen.

Vorgehensweise: Das Abdecken des Fachwerkes mit einem Ölpapier und einem Schilfrohrputzträger diente der Abkoppelung möglicher Bewegung im Fachwerkholz vom überliegenden Putz (Abbildung 137 und 138).



Abb. 137: Fachwerkwand mit Ölpapierabdeckung zur Abkoppelung des Fachwerks vom Putz (aus BUBNICK, 2017)



Abb. 138: Ansatz des Schilfrohrputzträgers zur Abkoppelung des Fachwerks vom Putz (aus BUBNICK, 2017)

Es folgte die Herstellung einer ersten Ausdrücklage (Brantkalk CL90, NHL2, Grubensand 0-2 mm, Tierhaarmierung) im Putzträgerbereich und einer dünnen Lage im Gefachbereich (Abbildung 139 bis 141). Nach einer Standzeit von ca. 4 Wochen wurde der Unterputz (Brantkalk CL90, NHL2, Grubensand 0-2 mm, Tierhaarmierung) im Abgleich zur Ausdrücklage appliziert sowie frescal die Oberputzlage (Wandflächen: Brantkalk CL90, NHL2, Grubensand 0-2 mm, Pigment, Kurzfasermierung, Abbildung 142 und 143). Die Oberfläche wurde abgerieben (Abbildung 144). Die Sockelflächen wurden mit der Rezeptur für einen deutlich festeren Mörtel (geringer Anteil Weißzement CEM I 52,5, NHL5, Grubensand 0-2 mm, Pigment, Kurzfasermierung) ausgeführt. Der Oberfläche erhielt einen Sumpfkalkanstrich (Abbildung 145).

Das Mischen des Materials erfolgte im Zwangsmischer. Eine Mischung ergab 4 Baueimer Mörtel, so dass mit 4 Arbeitern geputzt werden musste um den Mörtel noch „heiß“ an die Wand zu bekommen.



Abb. 139: Mischvorgang nach
Brantkalkzugabe mittels
Zwangsmischer (aus BUBNICK 2017)



Abb. 140: Heißkalk vor Wasser- und NHL-
Zugabe (aus BUBNICK 2017)



Abb. 141: Anwerfen der Ausdrücklage (aus
BUBNICK 2017)



Abb. 142: Ausdrücklage, Unterputz, farbiger
Sockel-Oberputz nach dem Ausreiben
(aus BUBNICK 2017)



Abb. 143: Anwerfen des Oberputzes (aus BUBNICK 2017)



Abb. 144: Ausreiben des Oberputzes mittels abgerundetem Reibebrett (aus BUBNICK 2017)



Abb. 145: Glattputz-Oberfläche nach dem Reiben und vor Ausbildung des Anschlusses zu den Palmetten (aus BUBNICK 2017)



Abb. 146: Glattputz-Oberfläche nach dem Kalkanstrich mit Ausbildung des Anschlusses zu den Palmetten (aus BUBNICK 2017)

3.4.5.2 Visuelle Evaluierung der Restaurierung in Heißkalktechnik

Die evaluierten Heißkalkoberflächen, die wie oben beschrieben unter Zugabe eines NHL zum Branntkalk hergestellt wurden, stehen nach einer Standzeit von 2 Jahren sehr gut (Abbildung 147 und 148). Auch im Fassungsbereich werden keine Schäden beobachtet. Allein wenige Risse, die auf Bewegungen der frischen Palmettenhölzer zurückgeführt werden, sind zu verzeichnen.



Abb. 147: Sehr gut stehende Putzoberfläche nach einer Standzeit von 2 Jahren. Risse werden auf die auf Bewegungen der frischen Palmettenhölzer zurückgeführt.



Abb. 148: Sehr gut stehende Putzoberfläche nach einer Standzeit von 2 Jahren. Risse werden auf die auf Bewegungen der frischen Palmettenhölzer zurückgeführt.

3.4.6 Meißen, Dom, Südarkade, Pfeiler, „Heiße Vierungsfuge“

Der Heißkalk Einsatz am Meißner Dom diente der kraftschlüssigen Verfüllung zweier Vierungsfugen im Bereich der Basis des südlichen Pfeilers der Südarkade (Abbildung 149 bis 151) und erfolgte bereits im Jahr 1994. Die Arbeiten wurden durch den Dombaumeister G. Donath veranlasst, im DOMBAUBERICHT 95 dokumentiert und in der Zeitschrift Stuck, Putz, Trockenbau veröffentlicht (DONATH 1995).



Abb. 149: Einsatz einer Vierung im Bereich der Basis des südlichen Pfeilers der Südarkade vor 25 Jahren. Ausführung der Vierungsfugen in Heißkalktechnik im Jahr 1994



Abb. 150: Einsatz einer Vierung im Bereich der Basis des südlichen Pfeilers der Südarkade

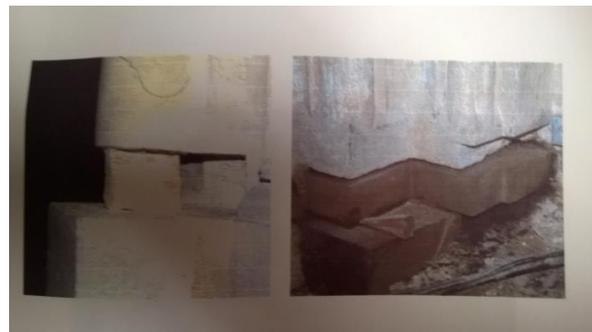


Abb. 151: Einsatz einer Vierung im Bereich der Basis des südlichen Pfeilers der Südarkade. Abb. aus Dombaubericht, Zeitraum 1994 bis 1995

3.4.6.1 Probenahme

Die Nachuntersuchungen erfolgten am 16.01.2019 (ZÖTZL 2019b). Für die Untersuchungen zur Carbonatisierung und Salzbelastung wurde ein Bohrmehl-Tiefenprofil angelegt (Tabelle 47).

Tab. 47: Probenübersicht

| Probennummer | Tiefenstufe [cm] | Material | Analysen |
|--|------------------|------------|---|
| Lettner, Bündelpfeiler Süd, Vierungsfuge (3 cm stark) | | | |
| Meiß_TP1_1 | 0-1 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe An- und Kationenanalyse |
| Meiß_TP1_1 | 1-2 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe |
| Meiß_TP1_1 | 2-3 | Kalkmörtel | Carbonatisierungstiefe |

3.4.6.2 Ergebnisse und Interpretation

Tab. 48: Bestimmung der Carbonatisierungstiefe im Tiefenprofil

| Probennummer | Tiefenstufe [cm] | Bestimmung der Carbonatisierungstiefe |
|---|------------------|--|
| Tiefenprofil in der Heißkalkfuge, Bohrmehl | | |
| Meiß_TP1_1 | 0-1 |  |
| Meiß_TP1_2 | 1-1,5 | |
| Meiß_TP1_3 | 1,5-2 | |
| Meiß_TP1_4 | 2-3 | |
|  | | |

Die Untersuchung der Carbonatisierungstiefe im Tiefenprofil (bis in eine Tiefe von 3 cm) zeigt eine Carbonatisierung bis in eine Tiefe von etwas weniger als 1 cm. Das Ergebnis wird durch die Salzanalyse bestätigt. Danach erfolgte nach ca. 25 Jahren Standzeit nur oberflächennah eine durch Carbonatisierung bestimmte Festigkeitsentwicklung mit den entsprechenden Werten. Darunter werden deutlich geringere Festigkeitswerte erwartet, die nur auf die Verzahnung der Portlanditkristalle im Zuschlag-Bindemittel-Gefüge zurückgeführt werden können. Es ist nicht davon auszugehen, dass die Carbonatisierung im Laufe der Jahre weiter voranschreitet, da im Innenraum die entsprechende Befeuchtung fehlt. Ob hydraulische Phasen Teil des Kalkmörtelgefüges sind und ebenfalls zur Festigkeit der Vierungsfuge beitragen, wurde nicht untersucht. Die Anwendung von reinen Luftkalkmörteln zur Verfüllung von Fugen und Hohlräumen mit dem Ziel, Festigkeiten eines carbonatisierten Mörtels zu erreichen (d.h., ggf. statische Kräfte aufzunehmen), wird generell nicht als sinnvoll erachtet, da eine ausreichende Carbonatisierung bis in die Tiefe auch über längere Zeiträume nicht erfolgen kann.

Die Ergebnisse der qualitativen und quantitativen An- und Kationenanalysen an einer Probe aus dem äußersten Profilabschnitt (0-1 cm Tiefe) werden in der Tabelle 49 dargestellt.

Tab. 49: Ergebnisse der Salzuntersuchungen und Bewertung nach WTA-MERKBLATT "MAUERWERKSDIAGNOSTIK" (1999) (rot: hoch, gelb: mittel, schwarz: gering)

| Probe | Einwaage [g] | Lf ₂₅₀ [µS/cm] | pH [-] | Σ wasserlös. Bestandteile [Ma.-%] |
|------------|-----------------|------------------------------|-----------|---|
| Meiß_TP1/1 | 0,84 | 19 | 7,96 | 0,67 |

| Probe | Anteile an löslichen Ionen in M.% | | | | | | |
|------------|-----------------------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ |
| Meiß_TP1/1 | 0,33 | 0,119 | 0,021 | 0,010 | <0,01 | <0,01 | 0,07 |

Die Analyse der Schadsalzgehalte der ersten Tiefenstufe zeigt oberflächennah eine geringfügige Anreicherung von Nitrat, die nach WTA-MERKBLATT "MAUERWERKSDIAGNOSTIK" (1999) mit „gering“ zu bewerten ist. In Korrelation mit den ebenfalls bestimmten K-Kationen weist sie auf eine geringfügige Kalisalpbildung hin. Die registrierten geringen Mg-Ionenkonzentrationen können dem Kalkbestandteil zugeordnet werden, aber auch auf eine frühere Anreicherung im Sandsteinmaterial des Pfeilers zurückgeführt worden sein, aus dem auch die Nitrationen „eingewandert“ sind.

Die in Heißkalktechnik eingebrachte Fuge steht augenscheinlich gut, Verfärbungen der Oberfläche werden nicht beobachtet.

4 Diskussion

4.1 Entwicklung und Verstetigung des Weiterbildungsformats (Workshops)

Als Resultat der Entwicklung eines Weiterbildungsformats zum Thema Heißkalk sollte innerhalb der Projektlaufzeit ein präsentabler Workshop für Praktiker und Anwender in seinen theoretischen und praktischen Elementen erarbeitet und erprobt werden. Dieser steht nun zur Verfügung und kann an einem geeigneten Ort „mobil“ für Teilnehmer aus der Denkmalpflegepraxis durchgeführt werden. Die im Verlauf des Projektes gewonnenen Erkenntnisse der baustofflichen Untersuchungen an den im Workshop praktisch präsentierten Heißkalkmischungen fließen dabei in die Präsentationen mit ein und untermauern die praktische Arbeit mit Heißkalkmischungen wissenschaftlich.

In der Endphase des Projekts wurden Kontakte mit dem Förderverein des Technischen Denkmals Ziegelei Hundisburg e.V. aufgenommen, weil das Gelände der historischen Ziegelei für die Durchführung sowohl des Abschlusskolloquiums als auch künftiger Workshops zum Heißkalk prädestiniert erschien. Seitens des Fördervereins bestand Interesse am Thema, so dass zunächst das Abschlusskolloquium unter großer Beteiligung der interessierten Fachöffentlichkeit in der Ziegelei Hundisburg stattfinden konnte. Die Räumlichkeiten der historischen Ziegelei boten dabei einen dem Thema der Denkmal-erhaltung angemessenen Rahmen, und das Team der Ziegelei Hundisburg übernahm die technische Organisation der Veranstaltung. Im Vorfeld war bereits besprochen worden, dass der Förderverein auch Möglichkeiten einer Trägerschaft für künftige Workshops zum Thema

Heißkalk sieht. Ein erster Workshop zum Heißkalk nach Beendigung des Projekts soll vom 27. bis 28. 09. 2019 in der Ziegelei Hundisburg durchgeführt werden und wurde zum Abschlusskolloquium angekündigt. Auf ausdrücklichen Wunsch der Teilnehmer des zweiten Workshops in der HfBK Dresden sowie von Interessenten beim Abschlusskolloquium soll dieser Workshop die praktische Anwendung von Heißkalk und das individuelle Üben noch mehr in den Vordergrund stellen. Die Teilnehmerzahl wurde deshalb nochmals auf maximal 15 Personen verringert. Zudem sind nun 7 Stunden individuell betreutes Verarbeiten von Heißkalk eingeplant. Der Bogen wird hier ebenfalls vom Mauermörtel, Putz-, Fugmörtel bis zu Möglichkeiten mit Heißkalktünche geschlagen. Es wird sich herausstellen, wie sich dieses ambitionierte Workshop-Angebot bewähren wird.

Die Workshops sollen dann künftig in angemessenen Abständen entsprechend der Nachfrage weiter in Hundisburg angeboten werden.

Die im Projektantrag geplante Einbeziehung des entwickelten Workshop-Formats in die Ausbildung an der HfBK Dresden muss nach dem Weggang des bisherigen Inhabers der Professur für das Lehrgebiet Wandmalerei und Architekturfarbigkeit (Prof. Dr. T. Danzl), der einem Ruf an die TU München folgte, im Herbst 2019 mit seinem Nachfolger in Dresden neu besprochen werden.

4.2 Materialuntersuchungen zur Ermittlung von Kennwerten

Die im Labormaßstab hergestellten Mörtel mit den Mischungen H1 bis H3 beziehungsweise K1 bis K3 bildeten die Grundlage für die Untersuchung zur Gewinnung von Materialparametern wie Druckfestigkeit, Wasseraufnahme, Gefügeausbildung usw. Es soll gleich im Vorfeld darauf hingewiesen werden, dass die hier präsentierten Ergebnisse nicht für Heißkalk im Allgemeinen zu sehen sind, sondern lediglich für die im Labor untersuchten Rezepturen gelten können. Es hat sich während der Vorbereitungen und der Untersuchungen herausgestellt, dass Heißkalkmörtel sehr empfindlich auf jegliche Änderungen in der Rezeptur und des Klimas reagieren. Kleinste Abweichungen vom Wassergehalt, in der Zusammensetzung der Rezepte bis zu Veränderungen der Wassertemperatur führen zu abweichenden Ergebnissen. Ähnliches, im nicht so starken Maßstab, gilt für die trocken gelöschten, kalt verarbeiteten Mörtel.

Im Vergleich von Heißkalk mit trocken gelöschten, kalt verarbeiteten Mörteln lassen sich bei den im Forschungsprojekt untersuchten Mischungen folgende Unterschiede feststellen:

- Heißkalkmörtel sind naturgemäß heiß, dies hat sich bei den Laborversuchen auch bestätigt. In mehreren Vorversuchen konnte festgestellt werden, dass Temperaturentwicklung und die maximal erreichte Temperatur von verschiedenen Bedingungen abhängen. Um diese Einflüsse zu minimieren wurde im Forschungsprojekt versucht die Randbedingungen wie Wassertemperatur, Rohstoffe und Mischungsverhältnis und Vorgehen beim Verarbeiten konstant zu halten. Die Temperatur wurde beim Anmachen der Mörtel im Eimer gemessen und aufgezeichnet. Bei allen drei Mischungen H1 bis H3 konnte ein sehr schneller Temperaturanstieg auf etwa 70°C gemessen werden. Nachdem diese Temperatur erreicht

war, fiel sie auch relativ wieder schnell ab. Dennoch liegt nach einer Stunde die Temperatur im Eimer immer noch deutlich über 40°C. Dies gilt aber nur für Mörtel die nicht verarbeitet wurden. Wenn der Mörtel portionsweise entnommen wurde und beispielsweise als Putz oder zum Herstellen von Probekörper in Kontakt mit einem kälteren Untergrund kam, führte dies zwangsläufig auch zu einem schnelleren Abkühlen. Wie sich unterschiedliche Abkühlungsgeschwindigkeiten auf das Gefüge und die weiteren Eigenschaften auswirken, wurde in diesem Forschungsprojekt nicht systematisch untersucht. Hier ist weiterer Forschungsbedarf zu sehen. Die in den Mischungen H1 bis H3 gemessenen 70°C sind auch nur für diese Mischungen mit diesem Branntkalk zu belegen. Allgemein wurde in Diskussionen mit Spezialisten, die langjährige Erfahrung in der Verarbeitung von Heißkalk haben, als Ergebnis festgelegt, dass Heißkalk mindestens eine Temperatur von 40°C haben sollte, ansonsten würde man von WAM (warm applied mortar, siehe WACHA & PINTÉR 2019) oder kalt verarbeiteten Mörteln sprechen.

- Die Heißkalkmörtel gewinnen schneller an Festigkeit und weisen nach einem Jahr auch eine höhere Festigkeit auf, jeweils verglichen mit denselben Rezepturen bei trocken gelöschten, kalt verarbeiteten Mörteln, beispielsweise Mischung H1 verglichen mit Mischung K1. Die Mischungen untereinander lassen sich nur bedingt vergleichen, da die Sieblinien der Zuschläge nicht identisch sind. Die Ziegel-Sandmischungen haben einen höheren Feinanteil in den Zuschlägen, die Bims-Sandmischung einen höheren Grobanteil. Dass es zu einer unterschiedlichen Festigkeitsentwicklung über einen längeren Zeitraum kommt, könnte damit erklärt werden, dass in den Mischungen K1 bis K3 ein Teil des Bindemittels in den Kalkspatzen konzentriert ist. Diese stehen demnach gar nicht zur Stabilisierung des Mörtelgefüges zur Verfügung. Für die frühe Festigkeitsentwicklung der Heißkalke, die ersten Stunden bis Tage, wird dies jedoch keine signifikante Rolle spielen. Hier ist eher eine Reduzierung des Wassergehalts durch die Umwandlung von Calciumoxid in Calciumhydroxid zu vermuten. Obwohl dem trocken gelöschten Kalkmörtel dieselbe Menge an Wasser zur Verfügung stand, wird das schnelle Abziehen des Wassers aus dem Porensystem durch das Kalklöschchen in Kombination mit Verdunsten durch die entstehende Hitze zunächst eine mechanische Bindung zur Folge haben, vergleichbar mit der Festigkeitsentwicklung bei trocknendem Lehm.

- Heißkalkmörtel zeigen ein stärkeres kapillares Saugen. Obwohl der mikroskopisch ermittelte Porenraum der Makroporen annähernd gleich ist, saugen Heißkalkmörtel doch bedeutend besser als die trocken gelöschten, kalt verarbeiteten. Dies hängt einerseits mit der Geometrie der Makroporen zusammen, die bei den hier verarbeiteten Heißkalkmörteln aus einem ausgeprägten Schwundrissystem besteht, aber auch durch die Mikroporosität, die durch Quecksilberporosimetrie analysiert wurde. Hier fallen die Heißkalkmörtel durch mehr kleinere Poren auf, vor allem ein auffällig höherer Anteil an Poren zwischen 0,2 und 0,3 µm, der bei den kalt verarbeiteten Mörteln nicht so ausgeprägt ist. Dieses starke Saugen prädestiniert die Heißkalkmörtel zum Entfeuchten von nassem Mauerwerk. Der Widerstand

gegen bauschädliche Salze, in den Experimenten durch Magnesiumsulfat, ist bei allen Mörteln gut bis auf die Mörtel mit Bims-Sand als Zuschlag. Diese zeigen ein extremes Schadensbild nach 120 Tagen, sie saugen dafür aber auch am besten. Wenn man in Kauf nimmt, dass die Standzeit des Mörtels nur begrenzt ist, dafür ein schnellstmögliches Entfeuchten und eine hohe Salzreduktion gewünscht wird, dann könnte man die Mörtelmischung 3 empfehlen. Die Entsalzungskapazität erscheint bei der heiß verarbeiteten Mischung H3 ein wenig höher als bei der kalt verarbeiteten K3.

Bei den anderen Mischungen lagern sich die Salze an der Oberfläche ab und können dort abgenommen werden. Es konnte nach 120 Tagen keine Schädigung beobachtet werden.

- Die von den Praktikern oft geäußerte Meinung, dass Heißkalkmörtel durch den Übergang von Branntkalk zu Calciumhydroxid expandieren und somit eine bessere Verbindung des Mörtels in Fugen erreicht oder einem Schwinden entgegen gewirkt wird, konnte nicht prinzipiell bestätigt werden. Die im Forschungsprojekt verwendeten Mörtelmischungen H1 bis H3 zeigen in den Laborversuchen kein Expandieren, dafür ein ausgeprägtes Schwinden. Durch die Untersuchung der Nasslöschkurve konnte gezeigt werden, dass dies vermutlich mit der hohen Reaktivität des verwendeten SCHAEFER-Kalks in Verbindung steht. Die Reaktivität und damit die Umsetzung von Branntkalk zu Calciumhydroxid, das Löschen, ist schon beendet wenn der Mörtel fertig gemischt ist. Bei der Verarbeitung ist der Mörtel zwar noch heiß, es findet jedoch kaum noch ein Löschvorgang und damit einhergehend eine Expansion statt. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass mit einem Granulat der SCHAEFER-Kalke oder einem anderen, langsameren Branntkalk durchaus Expansionen möglich sind. In diesem Feld erscheint noch Potential und Bedarf an weiterer Forschung. Eventuell könnte geeignetes Mischen von unterschiedlichen Branntkalken zu einer steuerbaren Expansion führen.

4.3 Anlage von Heißkalk-Musterflächen an historischem Mauerwerk und deren naturwissenschaftliche Untersuchung

Die Anlage und vergleichende Bewertung von Musterflächen, die mit Heißkalkmörtel und kalten, trocken gelöschten Kalkmörteln unterschiedlicher Mörtelrezepturen (aus dem Portfolio von A. Fenzke) hergestellt wurden, war ein wichtiger Projektbestandteil. Nach umfangreichen Voruntersuchungen der Feuchte- und Salzbelastung des Mauerwerks sowie Mörtelanalysen am bauzeitlichen Bestand wurden, im Anschluss an den ersten Workshop (30.09.2017) durch die Restauratoren A. Fenzke und T. Schmidt an der Ruine der Langhausmauer der Klosterkirche im ehemaligen Zisterzienserkloster Buch bei Leisnig Musterflächen angelegt und dokumentiert. In diesem Zusammenhang wurden außerdem Putzmörtel-Ziegel-Verbund-Probekörper für die Ermittlung von Materialkennwerten nach 360 Tagen hergestellt und auf dem Testgelände in Kohren-Sahlis ausgelagert.

Die für die Applikation der Musterflächen ausgewählte Langhausmauer zeigte mit einer erhöhten bis hohen Feuchtebelastung und einer hohen Belastung mit häufig anzutreffenden bauschädigenden Salzen (Kaliumnitrat und Magnesiumsulfathydrat) eine sehr gute Eignung. Um die Stabilität von Heißkalkmörteln und trocken gelöschten Kalkmörteln gegenüber Verwitterungseinflüssen (Feuchte, Salz und Temperatur) zu vergleichen, wurden nach einem Jahr Standzeit erste Nachuntersuchungen durchgeführt. Dazu erfolgten Bohrmehlabproben in mit den Voruntersuchungen vergleichbaren Höhen- und Tiefenstufen, bis in eine Tiefe von 10 cm. Im Zusammenhang mit den Voruntersuchungen in einigen Bestandsmörteloberflächen festgestellte leicht erhöhte Feuchtwerte, die auf eine hohe Belastungen mit hygroskopischen Salzen zurückgeführt wurden, konnten im Rahmen der Nachuntersuchungen in keinem der Putzmörtel nachgewiesen werden. In einigen Mörteloberflächen ist jedoch nach einem Jahr Standzeit bereits eine Anreicherung von bauschädigenden Salzen zu beobachten. Dabei handelt es sich um leicht lösliche Nitrate, deren Belastung oberflächennah nach WTA-MERKBLATT „Mauerwerksdiagnostik“ mit „mittel“ bis „hoch“ zu bewerten sind. Salzausblühungen wurden zum Zeitpunkt der Probenahme auf keiner Oberfläche festgestellt. Die Oberflächen der zu vergleichenden Mörtelsysteme zeigten bis zum Zeitpunkt der Nachuntersuchungen keine gravierenden Schäden oder Materialverluste, die mit Feuchte- und Salzeinwirkung in Verbindung stehen.

Um die Mörteloberflächen zu vergleichen, wurde der Abriebtest mittels Pinsel (KIRCHNER & ZALMANZIG 2011) durchgeführt, ein einfacher Feldtest aus dem Bereich der Steinkonservierung, mit dem eigentlich die Intensität der körnigen Zersetzung vertikaler Steinoberflächen bewertet wird. Unter Berücksichtigung möglicher Fehler bietet er auch für Putzoberflächen eine einfache Vergleichsmöglichkeit. Im Ergebnis der Untersuchungen zeigt sich, dass die untersuchten, mittels Heißkalk und kalten, trocken gelöscht hergestellten Mörteloberflächen ein Jahr nach der Applikation noch keine signifikanten Unterschiede in der Verwitterungsbeständigkeit aufweisen. Ein Monitoring wird die Entwicklung der Musterflächen in den nächsten Jahren weiter verfolgen.

Die Ergebnisse der Mörteldruckfestigkeiten an Ziegel-Mörtel-Verbundprobekörpern der untersuchten Luftkalkrezepturen (Heißkalk- und trocken gelöschter Kalkmörtel) zeigen im Mittel ähnliche Werte. Trotz des durch Schwindrisse gestörten Heißkalkmörtelgefüges wird eine sehr gute Anbindung an den Ziegel- und Klinkeruntergrund festgestellt, die durch die Werte der Haftzugfestigkeiten und mit einem Abriss im Mörtelgefüge belegt werden. Im Gegensatz dazu zeigen alle kalt verarbeiteten Mörtel einen Abriss an der Grenzfläche zwischen Mörtel und Untergrund. Die Oberfläche des Heißkalkmörtels zeigt, im Gegensatz zum kalt verarbeiteten Kalkmörtel, eine stark verdichtete Zone von 3 bis 5 μm , die an ein stabiles Gefüge angebunden ist. Diese Ausbildung führt zu einer geringen Wasseraufnahme über die Oberfläche und einer Verlangsamung der Carbonatisierung. Nach einer Zeit von 18 Monaten konnten in einem Teil der Proben im Grenzbereich zwischen Ziegel oder Klinker zum Mörtel mittels Phenolphthaleintest eine noch nicht vollständig durchcarbonatisierte Zone mit einer Stärke von 3 mm bis 4 mm festgestellt werden. Eine Hinterfeuchtung kann bei Frosteinfluss zur Zermürbung des Materials direkt unterhalb der Oberfläche und schließlich

zur Abschaltung der verdichteten Oberfläche führen. Das nun der Verwitterung ausgesetzte schwindrissreiche Gefüge mit hoher Porosität zeigt wiederum sehr hohe Wasseraufnahmen. Mittels Karstenschen Prüfröhrchen wurde an einer Probe eine Wasseraufnahme von 5 ml in 30 Sekunden ermittelt. Die beschriebenen Gefügeeigenschaften der untersuchten Heißkalkmörtelrezepturen führen voraussichtlich zu einer schnellen Zerstörung des Mörtels.

Das Auftreten eines schwindrissreichen Gefüges wird von Köberle (Kapitel 3.2.8 Rasterelektronenmikroskopie) ebenfalls an einem mit gleicher Rezeptur, unter Verwendung eines anderen Sandes, unter Laborbedingungen hergestellten Heißkalkmörtels beschrieben.

Ein Verheilen der Schwindrisse an 18 Monate alten, witterungsbeaufschlagten Proben konnte mittels REM-Technik nicht beobachtet werden.

Luftkalkmörtelprismen, die im Zusammenhang mit der Restaurierung der Krypta des Klosters Unserer Lieben Frauen in Magdeburg mit einer anderen Rezeptur und unter Verwendung anderer Ausgangsmaterialien (Branntkalk, Sand) in Heißkalktechnik hergestellt wurden, zeigen dagegen ein schwindrissfreies Gefüge. An diesen Prismen nach > 360 Tagen ermittelte Materialkennwerte zeigen für Luftkalkmörtel als üblich einzustufende Druckfestigkeiten von 1,7 N/mm² und hohe Wasseraufnahmen von 29 kg/m² nach 60 Minuten (ZÖTZL 2019c).

4.4 Evaluierung bestehender Restaurierungen in Heißkalktechnik an umweltgeschädigtem Mauerwerk

Aus den Ergebnissen der Objektevaluierungen in Verbindung mit eigenen, vom IDK im Projekt durchgeführten Untersuchungen lassen sich folgende Aussagen treffen:

Bei Putzen kann die Verarbeitung von Kalkgranulat zur Heißkalkmörtelherstellung zum Eintrag eines Schädigungsmechanismus durch Nachlöschen der Kalkspatzen führen. Der Einsatz von Kalkgranulat ist besonders bei Putzanwendungen in Heißkalktechnik nicht zu empfehlen. Sicher nachgewiesen wurde der Effekt allerdings nur bei einer Kalkgranulatsorte, andere Kalkgranulate wurden nicht untersucht. Von einem Treibpotential unterschiedlicher Geschwindigkeit, in Abhängigkeit von Brand und Rohstoff, bei Verwendung von Granulat wird jedoch generell ausgegangen. Beim Einsatz als Mauermörtel kann der Effekt des Nachtreibens mit Volumenexpansion jedoch gewünscht sein.

Die Zumischung von NHL zum Heißkalkmörtel erhöht die Putzmörtelfestigkeit und Stabilität gegenüber einer Salzbelastung, wie auch eigene Festigkeitsuntersuchungen (Gliederungspunkt 3.3.5.4) zeigen. Die hohe Heißkalktemperatur hat scheinbar bei den erreichten Werten keine nachteilige Auswirkung auf die Festigkeitsentwicklung unter Mitwirkung hydraulisch reagierender Phasen und damit auf die Vernetzung von Calciumsilikathydratphasen. Eine Veränderung der Reaktionsparameter wird jedoch in Abhängigkeit von der Temperatur erwartet.

Eisenreiche Bestandteile aus dem Mauerwerk können an die Oberfläche der Heißkalkmörtel transportiert und dort angereichert werden. Dadurch kann es zur Verfärbungen kommen.

Dieser Stoffumlagerungsprozess im hochalkalischen Milieu des Mörtels ist auch für kalt applizierte Kalkmörtel bekannt und kann an Hand von Beispielen aus der praktischen Denkmalpflege belegt werden (ZÖTZL 2011). Der besonders groß ausgebildete Porenraum des Heißkalkmörtels, in Untersuchungen durch eine hohe Wasseraufnahme belegt, begünstigt diese Transportprozesse.

Schwarzbraune Oberflächenverfärbungen einer Heißkalkputzoberfläche durch Teerbestandteile wurden nach kurzer Standzeit nachgewiesen. Ursache dafür waren Reste einer früheren Sperrschicht auf dem Natursteinuntergrund. Nach Applikation des Heißkalkmörtels wurde der Teeranstrich im alkalischen Milieu angelöst und gelöste Bestandteile durch die porenreiche Putzschicht an die Oberfläche transportiert und angereichert. Der zuvor abgenommene, in der 1990er Jahren kalt applizierte Luftkalkmörtel zeigte keine starken Verfärbungen der Oberfläche.

Augenscheinlich gut ausgebildete Materialverbunde zwischen Heißkalkmörtel und Natursteinfuge wurden beispielsweise in der Krypta des Klosters Unserer Lieben Frauen in Magdeburg festgestellt. Auf Grund der sehr hohen Salzlast im Mauerwerk wurde bereits zwei Jahre nach der Ausführung wieder eine hohe Belastung im Mörtel festgestellt. Die günstige Porosität des applizierten Mörtelsystems aus Heißkalkmörtel im ausgearbeiteten Fugenbereich und einem kalt angetragenen Luftkalkputz führen zu einer Anreicherung der Schadenssalze an der Oberfläche, ohne den Putz sichtbar zu schädigen. Die Salze lassen sich leicht durch Absaugen entfernen.

Auch der Einsatz eines mit einem Weißzement modifizierten Heißkalkmörtels mit einem Sandsteinbrechsandszuschlag als Steinergänzungs- sowie Verfüllmörtel an einem Strebe- Pfeiler der Michaeliskirche in Zeitz (WEDEKIND et al. 2016) steht sehr gut und zeigt eine weitere Einsatzmöglichkeit des Materials zur schnellen und kraftschlüssigen Verfüllung großer Hohlräume. Auch nach Auswertung der beiden Workshops scheint die Heißkalk- technik für diesen Anwendungsfall prädestiniert zu sein. Durch das schnelle Ansteifen ist ein schneller Bauablauf möglich, der mit anderen Mörteln auf Kalkbasis nicht zu erreichen ist.

Die Verfüllung einer Vierungsfuge mit einem reinen Heißkalkmörtel im Jahr 1994, veranlasst durch den damaligen Dombaumeister, G. Donath, konnte ebenfalls evaluiert werden. Trotz geringer Salzbelastung steht der untersuchte Teilbereich gut und zeigt keine Gefügeschäden.

Die Untersuchung der Carbonatisierungstiefe im Tiefenprofil (bis in eine Tiefe von 3 cm) zeigt eine Carbonatisierung bis in eine Tiefe von etwas weniger als 1 cm. Das Ergebnis wird durch die Salzanalyse bestätigt. Danach erfolgte nach ca. 25 Jahren Standzeit nur oberflächennah eine durch Carbonatisierung bestimmte Festigkeitsentwicklung. Dahinter werden deutlich geringere Festigkeitswerte erwartet, die nur auf die Verzahnung der Portlanditkristalle im Zuschlag-Bindemittel-Gefüge zurückgeführt werden können. Es ist nicht davon auszugehen, dass die Carbonatisierung im Laufe der Jahre weiter voranschreitet, da die entsprechende Befeuchtung fehlt. Ob hydraulische Phasen Teil des Kalkmörtelgefüges sind und ebenfalls zur Festigkeit der Vierungsfuge beitragen, wurde nicht untersucht.

5 Öffentlichkeitsarbeit

Das Förderprojekt wurde nach Projektbeginn auf der Webseite des Bewilligungsempfängers (<https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/geotechnik/forschung/forschungsprojekte/angewandte-geologie>) präsentiert und dort laufend auf aktuelle Veranstaltungen (Workshops und Abschlusskolloquium) hingewiesen. Nach Projektabschluss wird der (über die Projektdatenbank des Hornemann-Instituts) öffentlich zugängliche Abschlussbericht auf dieser Seite verlinkt.

Ergebnisse des Projekts wurden einschließlich einer praktischen Demonstration der Applikation von Heißkalk in unterschiedlichen Zusammenhängen (Putz, Fugenmörtel, Heißkalkschlämme, Vergussmörtel) auf dem Abschlusskolloquium am 21./22.03. 2019 in der Ziegelei Hundisburg vorgestellt. Am Kolloquium nahmen ca. 120 Gäste aus Wissenschaft und Denkmalpflegepraxis aus Deutschland und der Schweiz teil. Die „Magdeburger Volksstimme“ widmete dem Kolloquium einen Pressebeitrag, der am 26. 03. 2019 erschienen ist.

Im zweiten Workshop in Dresden waren bereits die Restauratoren der Landesämter für Denkmalpflege in Sachsen und in Sachsen-Anhalt als „Multiplikatoren“ für die Verbreitung von Wissen über die Heißkalk-Technik in der Denkmalpflegepraxis als Teilnehmer gezielt eingeladen worden.

Wichtige Projektergebnisse wurden vom Projektbearbeiter der TU Dresden, T. Köberle, am 20. 06. 2019 auf der 5. Internationalen „Historic Mortars Conference“ (HMC) an der Universidad de Navarra in Pamplona (Spanien) vorgetragen (KÖBERLE et al. 2019).

Weiterhin wurde in einem kurzen Fachbeitrag (KÖBERLE & FENZKE 2019) in der Zeitschrift „Restaurator im Handwerk“ ein Überblick über das Förderprojekt der DBU und seine Inhalte gegeben.

Am Modellobjekt Kloster Buch wird eine Schautafel zur Erläuterung der Musterflächen mit Hinweisen auf das DBU-geförderte Projekt und seine Inhalte aufgestellt.

Weitere Publikationen zu fachlichen Ergebnissen sind vorgesehen.

6 Fazit

Entwicklung eines Weiterqualifizierungsangebotes

Nach zwei Workshops und einem Abschlusskolloquium kann nun ein erprobtes Konzept zur Weiterbildung in der Heißkalktechnik angeboten werden. Das Konzept spricht durch eine Mischung von Theorie und Praxis (ein Drittel zu zwei Drittel, an zwei Tagen) bewusst sowohl Handwerker und Restauratoren als auch Fachplaner und Architekten an. Damit soll gewährleistet werden, dass die Handwerker die Heißkalktechnik sicher beherrschen und anbieten können und dass die Fachplaner die Möglichkeiten und Grenzen derselben einschätzen und sie gezielt für entsprechende Problemstellungen einsetzen können.

Zu den für den Heißkalkmörtel bisher empirisch beschriebenen Eigenschaften lassen sich folgende Aussagen treffen:

Ein schnelles Ansteifen des Kalkmörtels, was einen Antrag größerer Putzschichten erlaubt, kann bestätigt werden.

Gute Haftzugfestigkeiten, wie eigentlich für den Bereich der Kalk-Zementmörtel typisch, können für diese Luftkalkmörtel bestätigt werden. Dies ermöglicht eine gute Anbindung an den Untergrund und eine Eignung für die Verwendung als Fugen- und Mauermörtel.

Ein hoher Porenraum wurde nachgewiesen, der Einfluss auf die Wasseraufnahme hat. Durch die gleichzeitige sehr gute Anbindung an den Untergrund bietet er damit auch gute Möglichkeiten zur Einlagerung von Salzen. Somit erscheint eine Eignung als Opferputz oder Entfeuchtungsputz möglich. Dabei werden keine Schadsalzionen durch den Mörtel eingetragen, was sich bei hydraulischen (zement- oder trassbasierten) Bindemitteln nicht vollständig ausschließen lässt. Der Porenraum führt zudem zu einem schnellen Transport der Schadsalze an die Oberfläche.

Erhöhte Druckfestigkeiten im Vergleich zu trocken gelöschten, kalt verarbeiteten Kalkmörteln konnten an Putzoberflächen nicht nachgewiesen werden, sie sind jedoch an Prismen in Versuchen im Labormaßstab mit den gleichen Rezepturen, aber einem anderen Sandzuschlag deutlich messbar. Unterschiedliche Expositionsbedingungen, wie Lagerung im konstanten Laborklima einerseits und eine längere Einwirkung des wechselnden Klimas im Außenraum könnten diese unterschiedlichen Ergebnisse erklären.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Heißkalkmörtel sehr empfindliche Systeme darstellen, die auf kleinste Änderungen der Rezeptur und der Mischungs- und Verarbeitungsmodalitäten mit Veränderungen der Eigenschaften reagieren. Aus diesem Grund sind Vorversuche mit den jeweils zu verarbeitenden Komponenten (Kalkart, Gesteinskörnung und Wassergehalt) unbedingt anzuraten. Dies gilt im Besonderen dann, wenn es darum geht Mörtel zu rezeptieren, die bei der Verarbeitung expandieren sollen. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die hier vorgestellten Rezepturen und die daraus analysierten Ergebnisse nicht ohne weiteres auf andere Heißkalkmischungen übertragen werden können.

Die zuletzt beschriebenen empfindlichen Reaktionen setzen von Seiten des Verarbeitenden ein hohes Maß an Erfahrung im Umgang mit Kalkmörtel voraus. Dies gilt umso mehr als die Systeme durch die hohe Temperaturentwicklung besondere Anforderungen an den Arbeitsschutz stellen.

Forschungsbedarf besteht noch in der Entwicklung von Rezepturen, die ein planbares Expandieren, beispielsweise für Fugen- oder Mauermörtel, ermöglichen. Vorversuche mit langsam reagierenden Branntkalken, sowie Kalkgranulaten oder auch Mischungen aus beiden erschienen vielversprechend. Ein weiteres Feld, das bisher nicht genauer untersucht wurde, das aber auch durch Vorversuche im zweiten Workshop getestet wurde und gute Ergebnisse vor allem im Hinblick auf Verarbeitbarkeit und zu applizierende Schichtdicke erbrachte, ist die Verwendung von Heißkalk als Tünche.

7 Literatur

- ALISON, H. (2018): Hot-mixed mortars: the new lime revival – in: Context, Institute of Historic Building Conservation, Cathedral Communications Limited, Bd. 154, S. 30 - 33
- BLÄUER, C., FRANZEN, C., VERGÈS-BELMIN (2012): Simple field tests in stone conservation – in: Proceedings of the 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, New York 22-26 October 2012, S. 1 - 9
- DACHROTH, W. R. (1992): Baugeologie in der Praxis, eine ingenieurtechnische Anleitung für Geowissenschaftler – Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, S. 1 - 531
- DEHIO, G. (1998): Handbuch der Deutschen Kunstdenkmäler. Sachsen II. Regierungsbezirke Leipzig und Chemnitz. Bearbeitet von B. Bechter, W. Fastenrath, H. Magirus u.a. – Deutscher Kunstverlag, München, S. 1 - 1172
- D’HAM, G., MEINHARDT, J., NIEMEYER, R. (2010): Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme mit Messröhrchen nach Karsten und Mirowski – in: AURAS, M.; MEINHARDT, J.; SNETHLAGE, R. (Hrsg.): Leitfaden Naturstein-Monitoring; IRB-Verlag, Stuttgart, S. 82 - 92
- DIN 18555-9:2010-04: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Teil 9: Bestimmung der Fugendruckfestigkeit von Festmörteln, S. 1 - 10
- DIN 38414-17:2017-01: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Teil 17: Bestimmung von extrahierbaren organisch gebundenen Halogenen (EOX), S. 1 - 17
- DIN EN 459-1:2010-12: Baukalk – Teil 1: Begriffe, Anforderungen und Konformitätskriterien, Deutsche Fassung, S. 1 - 47
- DIN EN 459-2:2010-12: Baukalk – Teil 2: Prüfverfahren, Deutsche Fassung, S. 1 - 67
- DIN EN 1015-11:2007-05: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk, Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel, Deutsche Fassung, S. 1 - 15

- DIN EN 1015-12:2000-06: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk, Teil 12: Bestimmung der Haftfestigkeit von erhärteten Putzmörteln, Deutsche Fassung, S. 1 - 7
- DIN EN 1097-5:2008-06: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 5: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, Deutsche Fassung, S. 1 - 49
- DIN EN 1097-6:2013-09: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 5: Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung, Deutsche Fassung, S. 1 - 11
- DIN EN 1995:1999-05: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung, Deutsche Fassung, S. 1 - 6
- DIN EN 16085:2012-10: Erhaltung des kulturellen Erbes – Verfahren der Probenahme an Materialien des kulturellen Erbes - Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung, S. 1 - 8
- DIN EN 16455:2014-12: Erhaltung des kulturellen Erbes – Auflösung und Bestimmung von löslichen Salzen in Naturstein und artverwandten Materialien des kulturellen Erbes; Deutsche Fassung, S. 1 - 9
- DIN EN 16682:2017-05: Erhaltung des kulturellen Erbes – Verfahren zur Bestimmung des Feuchte- bzw. Wassergehalts in Materialien des unbeweglichen kulturellen Erbes, Deutsche Fassung, S. 1 - 68
- DIN EN 27888:1993: Wasserbeschaffenheit; Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (ISO 7888:1985), Deutsche Fassung
- DIN EN ISO 14688-1:2018-05: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung, Deutsche Fassung, S. 1 - 30
- DOMBAUBERICHT (1995) Zeitraum 1994 bis 1995, Meißen
- DONATH, G. (1995) Heiße Fuge – in: Stuck, Putz, Trockenbau, Zeitschrift für Ausbau & Fassade, offizielles Organ des Deutschen Stuckgewerbeverbandes im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes. 12/95, S. 65
- EICHLER, F. (1955): Tabellen für das Bauwesen, Abschnitt Wärmeschutz, Feuchtigkeitsschutz, Schallschutz – Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin, S. 1 - 92
- EPPERS, S. (2010): Assessing the autogenous shrinkage cracking propensity of concrete by means of the restrained ring test (Die Bewertung der autogenen Schwindrissneigung von Beton mit Hilfe des Ring-Tests) – Dissertation an der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden, S. 1 - 178
- FENZKE, A. (2017): Kalk - Bindemittel für Farben und Mörtel. Teil 4: Heißkalkmörtel – in: Johannesberger Arbeitsblätter, Themenbereich 1.1, Beratungsstelle für Handwerk und Denkmalpflege, Propstei Johannesberg, Fulda, S. 1 - 10

- FENZKE, A. (2011): Vortrag zum Seminar „Historische Putztechniken“ im Freilandmuseum Bad Windsheim am 1. und 2. Juli 2011, www.denk-mal-fachwerk.de, abgerufen: 27.08.2019
- GRÜN, R. (1927): Der Zement, Herstellung, Eigenschaften und Verwendung – Verlag Julius Springer, Berlin, S. 1 - 173
- HANNOVERSCHE ANZEIGEN (1757): Vom Mauerkalk und wie daraus ein dauerhafter Mörtel zu bereiten – Nützliche Sammlungen vom Jahre 1757, S. 1392
- HEILBRONNER, R. & BERRETT, S. (2014): Image Analysis in Earth Science, Microstructures and Textures of Earth Materials – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 1 - 520
- HESSE, H. (2014): Der Heißkalkmörtel – Dokumentation materialtechnischer Eigenschaften mit Hilfe vergleichender Untersuchungen unterschiedlicher Kalkmörtelvarianten. – unveröffentlichte Bachelorarbeit, FH Potsdam (Studiengang Konservierung und Restaurierung von Wandmalerei und Architekturfassung), S. 1 - 105
- ISO 15901-1:2005-12: Evaluation of pore size distribution and porosimetry of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption – Part 1: Mercury porosimetry – Iso copyright office, Geneva, S. 1 - 18
- KIRCHNER, K., ZALMANZIG, J., (2011): Abriebversuch mit Pinsel; Bestimmung des Schälwiderstandes – in: AURAS, M., MEINHARDT, J.; SNETHLAGE, R., (2011): Leitfaden Naturstein-Monitoring. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, S. 54 - 64
- KLOTZ-WARISLOHNER, G. (1999): Versuche mit Heißkalkmörteln für die Nachstellung eines Kalkfußbodens im Kloster Thierhaupten – in: KLOTZ-WARISLOHNER, G., SAAR, M. (1999): Reparatur in der Baudenkmalpflege. Das Bayerische Bauarchiv Thierhaupten. – Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege 164, S. 126 - 134
- KÖBERLE, T.; ZÖTZL, M.; FENZKE, A.; SIEDEL, H. (2019): Hot applied lime mortar – assesment of a traditional technique used in modern restoration – in: Proceedings of the 5th Historic Mortar Conference, Pamplona/Spain, RILEM Publication S.A.R.L., Paris, S. 614 - 627
- KÖBERLE, T. & FENZKE, A. (2019): Heißkalk in Handwerk und Forschung. Ein Forschungsprojekt kombiniert Weiterbildung in einer historischen handwerklichen Technik mit der Erhebung von Materialkennwerten – in: Restaurator im Handwerk, Heft 2/2019, S. 78 - 79
- KRAUS, K. (2011): Laboruntersuchungen an bindemittelreichen Kalkmörteln – in: Historische Putztechniken, Theorie und Praxis in Erhaltung, Rekonstruktion und moderner Anwendung von traditionellen Kalkputztechniken. Unveröffentlichter Seminarband, Bad Windsheim, S. 1 - 13
- MARGALHA, G., VEIGA, R. SANTOS SILVA, A. & DE BRITO, J. (2011): Traditional methods of mortar preparation: The hot lime mix method – in: Cement & Concrete Composites 33, S. 796 - 804

- MEYER, W. (2013): Geologie der Eifel – Verlag Schweizerbart, Stuttgart, 4. Auflage, S. 1 - 704
- MEHLMANN, M. (1993): Bestimmung von chemisch-mineralogischen Kennwerten sowie Untersuchungsmethoden – in: KNÖFEL, D. & SCHUBERT, P. (Hrsg.): Mörtel und Steinergänzungstoffe in der Denkmalpflege, Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT-Verbundforschung zur Denkmalpflege, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 1 - 225
- NEULING, K. (2011): Begleitinformationen zum Vortrag „Restaurierung von Ausfachungen und von Gefacheputze“, <http://docplayer.org/26215237-Begleitinformationen-zum-vortrag-restaurierung-von-ausfachungen-und-von-gefacheputze.html>, abgerufen am 27.08.2019, S. 1 - 41
- SCHIELE, E. & BEHRENS, L. W. (1972): Kalk; Herstellung, Eigenschaften, Verwendung – Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf, S. 1 - 627
- SCHRAGE, N. (2016): Augenirritation und Augenverätzung - in: Lehnhardt, M.; Hartmann, B.; Reichert, B. (Hrsg.): Verbrennungschirurgie, Springer, Berlin Hamburg, S. 307 - 321
- SHORLIN, K. A.; DE BRUYN, J. R.; GRAHAM, M.; MORRIS, W. (2000): Development and geometry of isotropic and directional shrinkage-crack patterns – in: Physical review E, Statistical physics, plasmas, fluids, and related interdisciplinary topics, The American Physical Society, Bd. 61, Nr. 6, S. 6950 - 6957
- SIEDEL, H. (2013): Magnesium sulphate salts on monuments in Saxony (Germany): regional geological and environmental causes – in: Environ. Earth Sci. 69, S. 1249 - 1261
- SNOW, J. H. (2016): Hot-mixed lime mortars – Historic Environment Scotland, 2. Auflage <https://www.englished.scot/publications/publication/?publicationId=d49812ea-b515-4b33-a96c-a59500a5ef36>, abgerufen: 27.08.2019, S. 1 - 8
- STEIGER, M., NEUMANN, H.-H., GRODTEN, T., WITTENBURG, C., DANNECKER, W. (1998): Salze in Natursteinmauerwerk - Probenahme, Messung und Interpretation – in: SNETHLAGE, R. (Hrsg.): Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II, Stuttgart, S. 61 - 91
- TRÖGER, W. E. (1959): Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale, Teil 1 Bestimmungstabellen – Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 3. Auflage, S. 1 - 147
- TRÖGER, W. E. (1967): Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale, Teil 2 Textband – Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, S. 1 - 822
- VALEK, J. & MATAS, T. (2012): Experimental study of hot lime mixed mortars in comparison with lime putty and hydrate mortars – in: VALEK, J., HUGHES, J.J. & GROOT, C.J.W.P. (Hrsg.): Historic Mortars. Characterisation, Assessment and Repair. Springer, Dordrecht, S. 269 - 281

- WACHA, R. & PINTÉR, F. (2019): Warm applied Mortar (WAM) – A research into the historical technique of “Heiße Speis” and its use for plasters – in: Proceedings of the 5th Historic Mortar Conference, Pamplona/Spain, RILEM Publication S.A.R.L., Paris, S. 579 - 584
- WEDEKIND, W.; LÓPEZ-DONCEL, R. A.; RÜDRICH, J.; RIEFFEL, Y. (2016): Innovative treatments and materials for the conservation of the strongly salt-contaminated Michaelis Church in Zeitz, Germany – in: HUGHES, J. & HOWIND, T. (Hrsg): Science and Art: A Future for Stone, Proceedings of the 13th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, Vol. II, , S. 981 - 990
- WEYER, A.; ROIG PICAZO, R.; POP, D.; CASSAR, JA.; ÖZKÖSE, A.; JEAN-MARC VALLET, J.-M.; SRŠA, I. (2015): EwaGlos – European Illustrated Glossary of Conservation Terms for Wall Paintings and Architectural Surfaces. Englische Definitionen mit Übersetzung in Bulgarisch, Kroatisch, Französisch, Deutsch, Ungarisch, Italienisch, Polnisch, Rumänisch, Spanisch und Türkisch. – Schriften des Hornemann Instituts 17, Michael Imhof Verlag, Petersberg, S. 1 - 448
- WINDISCH, H. (2017): Thermodynamik – Ein Lehrbuch für Ingenieure – 6. Auflage, DeGruyter Oldenbourg, S. 1 - 370
- WISCHERS, G. & HALLAUER, O. (1966): Einfluß und Bestimmung der Eigenfeuchte von Betonzuschlagstoffen – in: Beton 16 (1966) 5, S. 207 - 211 und 16 (1966) 6, S. 249 - 253, zusammengefasst in: Betontechnische Berichte, S. 89 - 113
- WTA-MERKBLATT "FEUCHTEMESSUNG" (1999): WTA-Merkblatt 4-11-02/D: Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.
- WTA-MERKBLATT "MAUERWERKSDIAGNOSTIK" (1999): WTA-Merkblatt 4-5-99/D: Beurteilung von Mauerwerk, Mauerwerksdiagnostik. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.
- ZHANG, J. & SCHERER, G. W. (2011): Comparison of methods for arresting hydration of cement – in: Cement and Concrete Research, Bd. 41, S. 1024 - 1036
- ZÖTZL, M., MEINHARDT, J., KERSTEN, H., LÖTHER, T., FRANZEN, C., KALISCH, U. (2013): Das Sandkataster für die Nachstellung historischer Putz- und Mörteloberflächen – in: RESTAURO, 6, 2013, S. 45 - 51
- ZÖTZL, M., OELSNER, N. (2016): Naturwissenschaftliche Untersuchungen historischer Mörtel im Rahmen der Bauforschung in der Sakristei der St. Katharinenkirche in Zwickau – in: Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen e.V. (Hrsg.): Interdisziplinäre Forschung in der Denkmalpflege., S. 175 – 184

Unveröffentlichte Berichte

- BUBNICK, B. (2017) Kurzdokumentation Objekt: BV Schlosskomplex Mosigkau/ Chinesischer Pavillon, Auftrag 2529/2016, Außenputz/ Heißkalkmörtel. Baudokumentation vom 05.02.2017, S. 1 - 15

- KÖBERLE, T. (2017): Sandproben Zschaitz – Probenahmeprotokoll vom 09.08.2017, S. 1 - 3
- SCHMIDT, T. (2015): Stadt Grimma/ Ehemalige Klosterkirche St. Augustin/ Putz-Musterflächen. Beschreibung der Arbeitsschritte. Dokumentation zur Anlage von Putzmusterflächen, S. 1 - 15
- WEDEKIND, W. (2015): Michaeliskirche Zeitz, Salzreduzierung eines Pfeilers der Südfassade, Arbeitsbericht, S. 1 - 35
- ZÖTZL, M. (2011): Friedersdorf, Kirche, Untersuchungen zur Verfärbung von Putzoberflächen. IDK-Bericht HAL 47/2011, S. 1 - 2
- ZÖTZL, M. (2017a): Magdeburg, Kloster Unserer Lieben Frauen, Feuchteuntersuchungen im Bodenbereich. IDK-Bericht HAL 32/2017 vom 05.07.2017, S. 1 - 6
- ZÖTZL, M. (2017b): DBU-Projekt „Heißkalkmörtel“, Kloster Buch, Musterflächen, Voruntersuchungen zur Feuchte- und Salzbelastung. IDK-Bericht HAL 89/2017, S. 1 - 19
- ZÖTZL, M. (2017c): DBU-Projekt „Heißkalkmörtel“, Kloster Buch, Musterflächen, Voruntersuchungen an Heißkalkausgangsstoffen. IDK-Bericht HAL 90/2017, S. 1 - 8
- ZÖTZL, M. (2018a): DBU-Projekt „Heißkalkmörtel“, Grimma, Klosterkirche, Vor- und Nachuntersuchungen an Heißkalkmusterflächen. IDK-Bericht HAL 13/2018, S. 1 - 33
- ZÖTZL, M. (2018b): DBU-Projekt „Heißkalkmörtel“, Magdeburg, Kloster Unserer Lieben Frauen, Vor- und Nachuntersuchungen an Heißkalkmusterflächen. IDK-Bericht HAL 42/2018, S. 1 - 11
- ZÖTZL, M. (2018c): DBU-Projekt „Heißkalkmörtel“, Zeitz, Michaeliskirche, Strebepfeiler, Evaluierung bestehender Heißkalkrestaurierungen. IDK-Bericht HAL 53/2018, S. 1 - 9
- ZÖTZL, M. (2018d): DBU-Projekt „Heißkalkmörtel“, Schlosspark Mosigkau, Chinesischer Pavillon, Evaluierung bestehender Heißkalkrestaurierungen. IDK-Bericht HAL 60/2018, S. 1 - 7
- ZÖTZL, M. (2019a): DBU-Projekt „Heißkalkmörtel“, Kohren-Sahlis, Untersuchungen an Heißkalkmustern auf Ziegeloberflächen. IDK-Bericht HAL 32/2019, S. 1 - 6
- ZÖTZL, M. (2019b): DBU-Projekt „Heißkalkmörtel“, Meißen, Dom, Südarkade, Pfeiler, „Heiße Vierungsfuge“, Evaluierung bestehender Heißkalkrestaurierungen. IDK-Bericht HAL 33/2019, S. 1 - 6
- ZÖTZL, M. (2019c): DBU-Projekt „Heißkalkmörtel“, Magdeburg, Kloster Unserer Lieben Frauen, Untersuchungen an Heißkalk-Probekörpern. IDK-Bericht HAL 52/2019, S. 1 - 6
- ZÖTZL, M. & KERSTEN, H. (2016): Magdeburg, Kloster Unserer Lieben Frauen, Feuchte- und Salzuntersuchungen im Mauerwerk und Naturstein. IDK-Bericht HAL 48/2016 vom 25.10.2016, S. 1 - 35