



**Erarbeitung einer Technologie zur Sanierung von anthropogen umweltbedingten
Schäden an Denkmälern aus Tuffsteinen sowie modellhafte Anwendung am Beispiel der
Kirche in Brotterode**

**Abschlussbericht des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten
Forschungsprojektes AZ 33142/01**

**Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar
Zier, H.-W.; Grützner, T.**

Weimar, Januar 2020

Projektträger:

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

Projektbearbeiter:

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

Projektlaufzeit:

Juli 2016 – Oktober 2019

Projektpartner:

Institut für Steinkonservierung e. V.
Große Langgasse 29
55116 Mainz

Fachhochschule Erfurt – Fachrichtung Konservierung und Restaurierung
Altonaer Straße 25
99085 Erfurt

Projektunterstützer:

Evangelische Kirche von Kurhessen-Waldeck
Wilhelmshöher Allee 330
34131 Kassel

Evangelisch-Lutherische Kirchengemeinde Brotterode
Kirchstraße 9
98596 Brotterode-Trusetal

Thüringisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Erfurt (ThLDA)
Petersberg 12
99084 Erfurt

Planungsbüro für Steinkonservierung
Burgstraße 1
99894 Friedrichroda

Abschlussbericht DBU-Projekt AZ 331412/01

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	5
1.1	Ausgangssituation	5
1.2	Zielsetzung des Vorhabens	6
1.3	Umweltaspekt	6
2	Die Kirche in Brotterode	7
2.1	Objektbeschreibung, zeitliche und stilistische Einordnung	7
2.2	Standortsituation	8
3	Thüringer Rhyolithuff – Geologie und Eigenschaften	9
4	Untersuchungen zur Erfassung der aktuellen Situation an der Kirche in Brotterode	11
4.1	Probenahme und Auswahl	11
4.2	Die Gefügestruktur des Rhyolithuffes	18
4.3	Die Ermittlung materialspezifischer Eigenschaften des Rhyolithuffes	34
4.3.1	Untersuchungen zur Ermittlung des Wasseraufnahmeverhaltens	34
4.3.2	Ermittlung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	36
4.3.3	Untersuchungen zum thermisch-hygrischen Dehnungsverhalten	37
4.3.4	Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten	38
4.4	Untersuchungen zum Bestand und zur Belastungssituation der Verfugmörtel	40
5	Überlegungen zu den Ursachen der Schädigungen und Erarbeitung einer Instandsetzungskonzeption für den Rhyolithuff	47
5.1	Verwitterungsverhalten des Rhyolithuffes	47
5.2	Entwicklung einer Konservierungsmethodik	48
6	Entwicklung von Materialien im Labormaßstab	49
6.1	Festigungs- und Klebemittel auf Basis von EP-Harzen	49
6.2	Schlämmen	53
6.3	Ergänzungsmörtel	65
6.4	Lasuren	71
7	Erprobung der Materialien an Testflächen an der Kirche in Brotterode	73
7.1	Vorbereiten von Testflächen	73
7.2	Lokale Festigung bzw. festigenden Klebungen von Steinoberflächen mit Epoxidharz	76
7.3	Kleben und Anbinden von Schalen	77
7.4	Aufbringen von Schlämmen auf Steinoberflächen	78
7.5	Ergänzungen von Fehlstellen mit Restauriermörteln	79
7.6	Lasur der geschlammten Werkstückoberflächen	79
8	Maßnahmefestlegungen für die Arbeiten an der Musterachse	84
8.1	Reinigung	84
8.2	Festigung	84
8.3	Kleben von Rissen und Schalen	85
8.4	Schlämmen von Oberflächen	85
8.5	Ergänzungen mit Restauriermörteln	86
8.6	Auftrag von Retuschen / Lasuren	87
9	Realisierung der Maßnahmen an der Musterachse	88
10	Monitoring	91
11	Zusammenfassung der Arbeitsergebnisse und Evaluierung an dem Modellobjekt	97
12	Öffentlichkeitsarbeit	98
13	Fazit	98

ANLAGE I: Kartierung der Probenahmebereiche und Testflächen

ANLAGE II: Datenblätter Epoxidharze

Vorwort

Ziel des Forschungsprojektes war die Erarbeitung von Konservierungstechnologien zur Behandlung anthropogen umweltgeschädigter Tuffsteine, die im Thüringer Wald als lokaler Baustoff Verwendung fanden. Der im Projekt relevante Naturstein, ein dichter Rhyolithtuff aus dem Rotliegenden, ist gekennzeichnet durch ein sehr problematisches Verwitterungsverhalten:

Im Gefüge sehr dicht, bildet sich eine dünne, poröse oberflächige Verwitterungszone, die durch Abschälungen und Abblätterungen gekennzeichnet ist, und kontinuierlich nach innen fortschreitet. Die Schädigungen sind am Modellobjekt, einer 1898 – 1900 in Brotterode errichteten Kirche, durch ein 1984 in Betrieb genommenes naheliegendes Braunkohleheizkraftwerk, stark intensiviert worden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollte eine auf das Steinmaterial abgestimmte Konservierungsstrategie entwickelt werden, die auch auf Natursteine mit ähnlicher Genese, Gefügestruktur und Verwitterungsverhalten – hierfür stehen beispielsweise nordhessische Tuffe und Schalsteine aus dem Lahn-Dill-Gebiet – übertragen werden kann.

Grundlage der Technologieentwicklung waren umfangreiche Untersuchungen zum Materialbestand, zu den Schädigungsformen sowie – darauf aufbauend – die Klärung des Verwitterungsprozesses im Gesteinsmaterial. Dafür kamen unterschiedliche Untersuchungsmethoden, wie Mikroskopie, nasschemische Verfahren, Ultraschalluntersuchungen, Röntgenfluoreszenzanalysen sowie Massenspektroskopie in Verbindung mit Laserablation zum Einsatz. Diese Methoden und deren Ergebnisse werden im Untersuchungsbericht umfassend dargestellt.

Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurde ein auf das Tuffsteinmaterial abgestimmtes Konservierungskonzept entwickelt. Es fußt auf einer Kombination von lokaler oberflächiger Festigung, Hinterfüllungen und Ergänzungsmörteln. Kernstück dieser Maßnahmenkombination war jedoch die Entwicklung einer Schlämme, die zugleich als Schutz- wie als Verschleißschicht auf der Steinoberfläche wirksam wird.

Die Technologie- und Materialentwicklungen wurden in einem schrittweisen Prozess unter Laborbedingungen, an Testflächen an dem Kirchengebäude in Brotterode und an einer Musterachse realisiert.

Bestandteil des Berichtes ist die Darstellung der Methodenentwicklung, der Realisierung sowie des begleitenden Monitorings.

1 Einführung

1.1 Ausgangssituation

In der Vergangenheit sind für die Errichtung von Gebäuden vor allem regional vorhandene und leicht gewinnbare Baustoffe, die nur über kurze Strecken zu transportieren waren, verwendet worden. Erst später – mit Entwicklung der Transportmöglichkeiten (z.B. Eisenbahn) – kam es zu einer stetigen Zunahme einer überregionalen Verbreitung und Verwendung verschiedenster Baustoffe.

Aufgrund des Kostenaspektes, Transportkosten waren im Vergleich zu den Gewinnungskosten ein ebenso preisbestimmender Faktor, wurden vor der erwähnten Verfügbarkeit entsprechender Transportmittel auch die offensichtlichen Nachteile örtlicher Baumaterialien in Kauf genommen. So sind in den Kammbereichen des Thüringer Waldes angrenzenden Ortschaften auch schwer zu bearbeitende vulkanische Tuffe mit problematischer Verwitterungsneigung verbaut worden.

Regional anstehender Rhyolithtuff im Kerngebiet des Thüringer Waldes ist beispielsweise großflächig in den Sichtfassaden der Kirche in Brotterode eingesetzt.

Die Tuffsteine sind im Zusammenhang mit vulkanischen Aktivitäten und den damit verbundenen Ablagerungen entstanden. Große Eigenschaftsunterschiede sind entstehungsbedingt vorhanden und es können lagenweise andere Sedimente (Tone, Sande) in den Lagerstätten vorkommen. Wegen guter Verfügbarkeit wurden sie regional nicht nur in Thüringen, sondern in deutlich größerem Umfang auch in verschiedenen Regionen Deutschlands abgebaut und eingesetzt.

In den vergangenen Jahren wurden Bauwerke in Hessen und Sachsen, an denen ähnliche Tuffe und Schalsteine verbaut wurden und vergleichbare Schädigungen auftraten, Gegenstand verschiedener Projekte, die die Entwicklung und Erprobung von Konservierungstechniken zum Inhalt hatten./16/34/

Allerdings sind die gesteintechnischen Eigenschaften und Verwitterungsphänomene der nordhessischen und sächsischen Tuffe vom an der Kirche in Brotterode verbauten sehr verschieden. Infolgedessen konnten die bereits vorliegenden Forschungsergebnisse und daraus entwickelten konservierungsmethodischen Ansätze nicht bzw. nur sehr bedingt berücksichtigt werden.

Auch sind im konkreten Fall des an der Kirche in Brotterode eingesetzten Rhyolithtuffes die hier als Schadfaktoren wirksamen anthropogenen Einflüsse besonders deutlich:

An den Außenfassaden der Kirche in Brotterode wurden bereits 1989 /17/ starke umweltbedingte Veränderungen nachgewiesen. Berichtet wird über großflächige starke Schädigungen an den bewitterten Seiten der Kirche infolge von thermischen und hygrischen Beanspruchungen der Gesteine, die durch die extreme Exposition im Kerngebiet des Thüringer Waldes begünstigt werden. Weiterhin wurden Einflüsse von Luftschadstoffen – insbesondere schwefelhaltige Verbindungen, die zu Gipseinlagerungen in den oberflächennahen Steinstrukturen führten, nachgewiesen.

1984 wurde in Hauptwindrichtung zur Kirche (südwestliche Ortslage in Brotterode) ein Braunkohleheizkraftwerk in Betrieb genommen /17/. Bekannt ist durch Untersuchungen der MFPA Weimar außerdem, dass in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts durch den Hausbrand mit schwefelreicher Kohle über Jahrzehnte Gips auf Bauwerksoberflächen auch direkt in Ortslagen der Erzeugung abgelagert wurde.

Die in /17/ beschriebenen Schäden konnten auch bei einer Begehung im Juni 2015 /31/ festgestellt werden. Es ist davon auszugehen, dass sich die Ausmaße der Schäden in den letzten 25 Jahren weiter verstärkt haben.

1.2 Zielsetzung des Vorhabens

Ausgehend von den bereits vorliegenden Erfahrungen an aus Tuffstein errichteten Bauwerken in Hessen sollten im DBU-Forschungsprojekt neue technologische Ansätze, die zur großflächigen Sanierung von geschädigten Außenwandoberflächen von Sichtmauerwerk aus Rhyolithtuff geeignet sind, entwickelt und erprobt werden.

Zunächst wurden relevante kleinflächige Probeachsen, die im Rahmen abgeschlossener Projekte an Objekten in Hessen angelegt wurden, untersucht und bewertet.

Die modellhafte Erarbeitung von Lösungswegen für eine konservatorische und restauratorische Bearbeitung von vulkanischen Tuffgesteinen sollte aber schwerpunktmäßig am Brotteroder Rhyolithtuff erfolgen. Die praktische Erprobung der Lösungswege wurde anschließend modellhaft an Außenwandflächen der Kirche in Brotterode vorgenommen.

Es wurde angestrebt, die entwickelten Technologien auch an anderen, von Gefüge, Struktur und Mineralbestand her ähnlichen Rhyolithtuffen anwendbar zu gestalten. Kriterien für die Bewertung der Eignung der technologischen Ansätze wurden ermittelt und vorgegeben.

1.3 Umweltaspekt

Häufig sind die regionalen Steinbrüche, die Gewinnungsstätten der Tuffsteine waren, nicht mehr vorhanden, mit vertretbarem Aufwand nicht zugänglich, verschüttet und / oder renaturiert. Neuaufschlüsse wären sehr kostenaufwendig und würden häufig starke Eingriffe in das natürliche Umfeld bedeuten. Alte aufgegebene Steinbrüche stellen oft besondere und schützenswerte Biotope dar.

Großflächige ungleichmäßige Rückwitterungen an geschädigten Fassadenflächen erfordern beim Erreichen eines gewissen Ausmaßes Maßnahmen, die Gefahren (z.B. herabfallende Steinstücke) für die Nutzer verhindern sollen.

Durch Einsetzen neuer Konservierungstechnologien sollte die Möglichkeit geschaffen werden, vorhandene Bestände an den Gebäuden weitestgehend zu bewahren und zu sichern. Dadurch würde neues Material für spätere tiefergreifendere restauratorische und / oder andere bauliche Eingriffe und gleichzeitig natürliche Ressourcen, die zur Herstellung des dann zusätzlich erforderlichen Materials notwendig wären, eingespart. Gleichzeitig würde bei Denkmalobjekten der Originalbestand gesichert und weitestgehend erhalten.

2 Die Kirche in Brotterode

2.1 Objektbeschreibung, zeitliche und stilistische Einordnung

Die evangelische Kirche St. Nicolai in Brotterode wurde als neogotische Saalkirche in den Jahren 1898 – 1900 erbaut. Der Neubau wurde am Ort einer zuvor abgebrannten Vorgängerkirche errichtet. Der barocke Vorgängerbau aus dem Anfang des 18. Jahrhunderts war im Zusammenhang mit dem großen Stadtbrand am 10. Juli 1895 in Brotterode, dem nahezu der gesamte Ort zum Opfer fiel, zerstört worden./17/



Abbildung 1: Die 1895 abgebrannte alte Kirche in Brotterode. (Abbildung aus /4/)



Abbildung 2: Abbruch der Kirchenruine (Abbildung aus /4/)



Abbildung 3: Ansicht der jetzigen Kirche von Süden



Abbildung 4: Ansicht der Nordfassade der jetzigen Kirche

Zur Bedeutung und bau- bzw. kunstgeschichtlichen Einordnung sei im Folgenden auf die Ausführungen des Thüringischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologie verwiesen:

„... für den Entwurf zeichnete der Schmalkalder Kreisbauinspektor Brzozowski verantwortlich, Ausführung und Bauleitung lag in den Händen ortsansässiger Architekten und Handwerker.

Der in der Tradition der Thüringer Dorfkirchen errichtete Saalbau mit Querhaus, eingezogenem, gerade geschlossenem Chor und viergeschossigem Turm im Westen hat im Inneren die bauzeitliche Ausstattung komplett erhalten.

Die in historisierenden Formen erbaute, werksteinsichtige Kirche gehört mit ihrer städtebaulichen Präsenz, durch das Gestaltungskonzept wie den Materialien zu den wichtigen wilhelminischen Kirchenbauten der Zeit in Thüringen; im Gestaltungsanspruch – durch die Verwendung verschiedener Natursteine – und in der handwerklichen Ausführung, hier besonders in der Steinbearbeitung, ist die Kirche mit den in etwa

zeitgleichen Kirchenbauten von Steinach (F. Schwechten, 1898/99) und Lauscha (J - Zeißig 1910/11) vergleichbar.“/32/

Der neue Kirchenbau wurde auf den noch vorhandenen Grundmauern des abgebrannten Vorgängerbaues errichtet. Für das aufgehende massive Mauerwerk fand eine Mischbauweise Anwendung: Die Fassadenflächen wurden als unregelmäßiges Quadermauerwerk aus einem örtlichen Rhyolithtuff errichtet und zwar als selbsttragende Schale vor Ziegelmauerwerk. Eckquaderungen und Gewände bestehen aus einem hell gelbgrauen Sandstein aus dem Schmalkalder Gebiet. Die Kirche ist unverputzt und als solche bereits ursprünglich konzipiert worden. Sie ist damit das einzige Gebäude im Ort, bei welchem als Sichtmauerwerk in der Fassade das Rhyolithtuffmaterial verbaut wurde. Es entstammt einem jetzt aufgelassenen Bruch nordöstlich des Ortes.

Warum gerade der Rhyolithtuff als Fassadenbaumaterial Verwendung fand, ist nicht geklärt. Möglicherweise sind verschiedene Gründe dafür verantwortlich:

- Das Material war in einem gemeindeeigenen Steinbruch vorhanden. Dies reduzierte die Kosten für Gewinnung und Transport des Baumaterials.
- Die angestrebte Materialsichtigkeit der Kirche und der in Verbindung mit dem hellen Sandstein dazu reizvolle Kontrast des dunklen Rhyolithtuffes ließ die Verwendung dieses Materials unter gestalterischen Aspekten als geeignet erscheinen.
- Vielleicht ist im Einsatz des örtlich anstehenden Materials auch als Symbol des Wiederaufbaus „aus eigener Kraft“ zu sehen.

Im Laufe ihrer etwa 120-jährigen Standzeit wurden am Gebäude der Kirche relativ wenige bauliche Veränderungen vorgenommen. Problematisch erwies sich allerdings bereits nach relativ kurzer Zeit die komplizierte Dachform, die vielen Anschlussflächen zum Mauerwerk und die Tatsache, dass, der kurzen Bauzeit geschuldet, offensichtlich nicht gänzlich und ausreichend getrocknetes Bauholz für den Dachstuhl Verwendung fand. So mussten in der Vergangenheit beispielsweise bereits die Giebelaufmauerungen abgenommen und der Dachanschluss verändert werden.

Ab 2014 erfolgte die Instandsetzung des stark geschädigten Dachwerkes.

2.2 Standortsituation

Die Kirche befindet sich im Nordosten der Kleinstadt Brotterode-Trusetal. Die Ortschaft selbst liegt 600 m ü. NN, die Kirche wiederum befindet sich 50 m über der Ortslage./17/

Durch die geographische Lage der Ortschaft (Höhenlage am Südhang im Thüringer Wald) herrschen dort besondere klimatische Bedingungen, die vor allem durch lange und kalte Winter sowie verhältnismäßig kühle Sommer geprägt sind. Darüber hinaus treten aufgrund der topographischen Lage Brotterodes im Staubereich des Thüringer Waldes verstärkt Niederschläge auf.

Die Kirche selbst ist aufgrund ihrer exponierten Lage erhöhter Wind- und Schlagregenbelastung ausgesetzt. Die unverbaute Hanglage ermöglicht eine direkte Besonnung und damit verbundene Aufheizung der süd- und westseitigen Fassadenabschnitte.

1984 wurde im Südwesten des Ortes eine Verbrennungsanlage für Braunkohle erbaut, die heute in dieser Form nicht mehr existiert. Die in der Hauptwindrichtung befindliche Kirche war damit erhöhter Belastung durch Schadstoffe (insbesondere Schwefeldioxid) ausgesetzt./28/

3 Thüringer Rhyolithtuff – Geologie und Eigenschaften

Tuffe sind vulkanische Eruptivgesteine. Als Tuffe werden Gesteine bezeichnet, die überwiegend aus vulkanischer Asche und Pyroklasten bestehen.

Um die Vielfalt der dadurch charakterisierten Gesteine einzugrenzen, bedient man sich verschiedener Gliederungssysteme, die diese entsprechend Genese, Mineralbestand und Korngrößen einteilen.

Tuffe entstanden überwiegend durch starken Vulkanismus und damit verbundene pyroklastische Ströme. Im eruptiven Prozess wurden Fremdgesteine mitgeschleudert und zusammen mit dem Auswurfmaterial abgelagert. Im Zuge einer Verfestigung durch beispielsweise thermale und hydrothermale Prozesse verbinden sich die in die Ablagerungen eingebundenen Fremdgesteine (Pyroklasten, bis 64 mm Korngröße als „Lapilli“, darüber hinaus als „Bomben“ bezeichnet) innerhalb geologischer Zeiträume mit der Aschenmatrix. Derartige Ablagerungen können stark porös bis dicht sein und daher stark unterschiedliche gesteintechnische Eigenschaften aufweisen.

In Deutschland finden sich Tuffe aus ganz unterschiedlichen geologischen Zeiträumen vor allem in Mitteldeutschland in einem von Ost nach West führenden breiten Streifen. Sächsische und Thüringer Tuffe sind geostratigraphisch dem Perm (ca. 299 - 252 Mio. Jahre) zuzuordnen. Die Hessischen Tuffe sind zumeist wesentlich jünger und entstammen überwiegend dem Tertiär (ca. 25 – 7 Mio. Jahre).

Vor allem die sächsischen Tuffe wurden in der Vergangenheit vielfach als Baumaterial eingesetzt. Wichtige Gewinnungsstätten waren beispielsweise Gebiete der Vorerzgebirgssenke um Chemnitz (Zeisigwald, Hilbersdorf) sowie die nordwestsächsische Senke (Rochlitz, Rüdigsdorf, Buchheim)./34/

In Thüringen wurde Tuff im Thüringer Wald, beispielsweise am Nesselberg, in Frankenhain, bei Ilmenau sowie in kleineren Brüchen im Bereich der Kammlagen abgebaut.

Die sächsischen und thüringischen Tuffe sind hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zumeist „saure“ (rhyolithische) Tuffe.

Die thüringischen Tuffe sind typische Aschentuffe. Abgelagerte vulkanische Aschen sind unter atmosphärischen Bedingungen wenig stabil. Sie müssen einen Umwandlungs- und Verfestigungsprozess durchlaufen, in dem die Aschen in Tonminerale (Illit, Chlorit, Smektit) umgewandelt werden. Weitere Minerale können durch Diagenese und Verwitterung entstehen. Im Falle des Brotteröder Materials machen diese Bestandteile ca. 65 M.% aus. Etwa 30 % sind Einsprenglinge aus Quarz, Alkalifeldspat, Plagioklas und Pyroklasten. Diese rühren ursächlich aus mitgerissenem Material her, welches in der Grundmasse aus kaum kristallisierten bzw. glasartigen Aschen eingebettet ist.

Die sichtbare Porosität des Brotteröder Rhyolithtuffes beträgt etwa 5 % des Gesamtvolumens. Diese ist hauptsächlich an ein offenes Rissystem gebunden. /26/

Die Tonminerale bestimmen makroskopisch das Farbspektrum des Materials, welches von einem grauen Rötlich-Violett bis zu einem kräftigen Blaugrün, teilweise Türkis, reicht. Die Komponenten sind flaserig gelängt. Es lassen sich dunkle Laminarstrukturen innerhalb der Grundmasse erkennen, die wiederum Ausgangspunkt für Rissbildungen darstellen. Innerhalb der Matrix lassen sich darüber hinaus allerdings kaum Poren erkennen.

Das für den Neubau der Brotteröder Kirche verwendete Material entstammt einem Steinbruch nahe der Ortslage. Der Steinbruch nordöstlich von Brotterode am Südwesthang des Großen Jagdberges in der „Kalten Heide“ war vermutlich bereits seit langem Gewinnungsort für Steinmaterial.

Im Rahmen der Erstellung des „Natursteinkatasters Thüringen“ /26/ wurden gesteintechnische Daten des Brotteröder Rhyolithtuffes ermittelt. In Tabelle 1 sind diese anderen Rhyolithtuffen sowie Gesteinen aus dem Großraum des Thüringer Waldes gegenübergestellt.

Tabelle 1: Eigenschaften ausgewählter Gesteine im Vergleich mit dem Brotteroder Rhyolithtuff (Tabelle aus /28/, Seite A3.7)

Bezeichnung	Stamm- magma	Strati- graphie	Roh- dichte g/cm ³	w-Wert kg/m ² h ^{0,5}	μ-Wert	Porosität Vol.-%	hydr. Dehnung mm/m	Druck- festigkeit Mpa	Dynam. E-Modul Gpa
Brotteroder Rhyolithtuff ¹	Rhyolith	Perm		0,23	88-146				
Brotteroder Rhyolithtuff ²	Rhyolith	Perm	2,30	0,6		12,5	1,05 - 2,07	77	22,4
Weilmünster-Schalstein, Typ "gelb" ³	Basalt	Devon			48-52	5,6-7,4	0,315- 0,44		
Ettringer Tuff ⁴	Phonolith	Quartär	1,68	11,1		23	1,39	18	6,1
Weiberner Tuff ⁴	Phonolith	Quartär	1,41	15,5		32,05	0,73	16	5,6
Sandstein Madelungen und Seeberg ⁵		Trias	2,20	104		12,35	0,19	58-93	18,0-27,3
Granit Trusetal und Henneberg ⁶		Ober- karbon	2,61			1,71	0,21	178	42,1
Basalt Vacha ⁷		Tertiär	3,10			1,00	0,11	303	117,8

1 Messungen MFA Weimar

2 Katzschmann, Lutz; Aselmeyer, Gunther; Auras, Michael: Natursteinkataster Thüringen, Institut f. Steinkons. e.V., Bericht 23/2006, S. 73

3 Sattler, Ludwig: Zur Entwicklung des Schalsteinprojektes - Voruntersuchungen am Dom und am Heidenportal, in: Die Konservierung des Heidenportales am Wetzlarer Dom, Institut für Steinkonservierung e.V., Bericht 27-2007, S. 32

4 Steindlberger, Enno: Vorkommen, Eigenschaften und Verwitterung nordhessischer Tuffe, in: Konservierungskonzepte zum Erhalt von nordhessischem Tuffstein an historischen Bauwerken, Tagungsband zum DBU-Projekt AZ 18981-45, 2005, S. 11

5 Katzschmann et. al., S. 154

6 ebd., S. 62

7 ebd., S. 158

4 Untersuchungen zur Erfassung der aktuellen Situation an der Kirche in Brotterode

4.1 Probenahme und Auswahl

An verschiedenen Fassadenbereichen der Kirche Brotterode erfolgte die Entnahme von Probenmaterial. Es wurden zwei Arten von Proben gewonnen:

- Oberflächenproben (Schalen, Oberflächenauflagerungen)
- Bohrkernproben

Aufgrund der gesteintechnischen Eigenschaften war ein Trockenbohren zur Gewinnung von Bohrkernen nicht möglich.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Entnahmebereiche der Proben, deren Bezeichnung und Beschreibung wiedergegeben.

Tabelle 2: Probenbezeichnung und -lokalisierung (Probenahme Kirche Brotterode)

Probenbezeichnung	Probenart	Beschreibung	Entnahmeort	Entnahmetiefe
BR/K/01a	oberflächige Gesteinsschale	rötlich-violette Steinvarietät	Kirche, Werksteinmauerwerk Westfassade Turm, 270 cm ü OKE	0-1 cm
BR/K/01b	oberflächige Gesteinsschale (unter BR/K/01a)	rötlich-violette Steinvarietät	Kirche, Werksteinmauerwerk Westfassade Turm, 270 cm ü OKE	1-2 cm
BR/K/02	oberflächige Gesteinsschale	grünliche Steinvarietät	Kirche, Werksteinmauerwerk Westfassade Turm, 220 cm ü OKE	0-1 cm
BR/K/03	oberflächige Gesteinsschale	grüne Steinvarietät	Kirche, Werksteinmauerwerk, Fase des Sockelgesimses Südfassade Turmanbau, 110 cm ü OKE	0-1 cm
BR/K/04	oberflächige Abschuppungen	rötlich-violette Steinvarietät	Kirche, Werksteinmauerwerk, Nordseite nördlicher Turmanbau, 170 cm ü OKE	0-0,5 cm
BR/K/05	Oberflächige Gesteinsprobe	rötlich-violette Steinvarietät	Kirche, Werksteinmauerwerk, Nordseite nördlicher Turmanbau, 135 cm ü OKE	0-1,5 cm
BR/K/06a	oberflächige Gesteinsschale	rötlich-violette Steinvarietät	Kirche, Werksteinmauerwerk, Südseite, 110 cm ü OKE	0-1 cm
BR/K/06b	stark destruierte Zone unter BR/K/06a	rötlich-violette Steinvarietät	Kirche, Werksteinmauerwerk, Südseite, 110 cm ü OKE	1-1,3 cm
BR/K/07a	oberflächige Gesteinsschale	grünliche Steinvarietät	Kirche, Werksteinmauerwerk, Südseite, 110 cm ü OKE	0-1 cm
BR/K/07b	stark destruierte Zone unter BR/K/07a	grünliche Steinvarietät	Kirche, Werksteinmauerwerk, Südseite, 110 cm ü OKE	1-1,2 cm
BR/K/11	Bohrkern	rötlich-violette Steinvarietät	Kirche, Werksteinmauerwerk Nordfassade, Turmnordanbau, 140 cm ü OKE	0-29 cm
BR/K/12	oberflächige Gesteinsschale	grünliche Steinvarietät	Kirche, Werksteinmauerwerk, Westgiebel, 300 cm ü OKE	0-1 cm
BR/K/13	Bohrkern, Oberfläche leicht abschuppend	rötlich-violette Steinvarietät	Kirche, Nordfassade, Werksteinmauerwerk Turmnordanbau, 170 cm ü OKE	0-29 cm
BR/K/14	Bohrkern	grünliche Steinvarietät	Kirche, Nordfassade, Westgiebel Kirchenschiff, 155 cm ü OKE	0-29 cm
BR/K/15	Bohrkern	rötlich-violette Steinvarietät	Kirche, Werksteinmauerwerk, Südfassade über Sockel, 150 cm ü OKE	0-29 cm
BR/K/16	Bohrkern	rötlich-violette Steinvarietät	Kirche, Werksteinmauerwerk Sockel, Südfassade, 75 cm ü OKE	0-29 cm

Die Probenahmebereiche sind in der Anlage des Abschlussberichtes in Fassadenansichten kartiert.



Abbildung 5: Entnahmestelle der Probe BR/K/01a



Abbildung 6: Entnahmestelle der Probe BR/K/01b



Abbildung 7: Entnahmestelle der Probe BR/K/02



Abbildung 8: Entnahmestelle der Probe BR/K/03



Abbildung 9: Entnahmestelle der Probe BR/K/04



Abbildung 10: Entnahmestelle der Probe BR/K/05



Abbildung 11: Entnahmestelle der Probe BR/K/06a



Abbildung 12: Entnahmestelle der Probe BR/K/06b



Abbildung 13: Entnahmestelle der Probe BR/K/07a



Abbildung 14: Entnahmestelle der Probe BR/K/07b



Abbildung 15: Entnahmestellen der Proben BR/K/11 (rechts) und BR/K/13 (links im Bild)



Abbildung 16: Bohrlochstirn der Kernbohrung BR/K/11: Gut erkennbar sind der Hinterfüllmörtel der Rhyolithtuffschale und die Hintermauerung mit Ziegelmauerwerk.



Abbildung 17: Bohrlochstirn der Bohrung BR/K/13 mit Abbruchfläche des Bohrkernes in 29 cm Tiefe



Abbildung 18: Entnahmestelle der Probe BR/K/12



Abbildung 19: Entnahmestelle der Probe BR/K/14



Abbildung 20: Bohrlochstirn der Bohrung BR/K/14 mit Hinterfüllmörtel hinter der Rhyolithtuffschale



Abbildung 21: Entnahmestellen der Proben BR/K/15 (oben) und BR/K/16 (unten)



Abbildung 22: Bohrlochstirn der Bohrung BR/K/15 mit Abbruchfläche des Bohrkernes



Abbildung 23: Bohrlochstirn der Bohrung BR/K/16 mit Hinterfüllmörtel hinter der Rhyolithtuffschale

Darüber hinaus wurde für vergleichende Materialuntersuchungen und für die Entwicklung und Erprobung von Restaurierungstechnologien und -materialien weiteres Rhyolithtuffmaterial aus einem Steinbruch beschafft. Dies war auch wegen der begrenzten Möglichkeiten von Materialentnahmen am Objekt erforderlich.

Der Steinbruch nordöstlich von Brotterode am Südwesthang des Großen Jagdberges in der „Kalten Heide“ war - wie erwähnt - bereits Gewinnungsort für die an der Brotteroder Kirche verbauten Rhyolithtuffe. Aus dem aufgelassenen Bruch konnten ca. 30 Gesteinsproben beschafft werden, hauptsächlich Bruchstücke aus dem Abraum neben dem Steinbruch. Es wurden rötlich-violette und grünfarbene Steinproben entnommen.

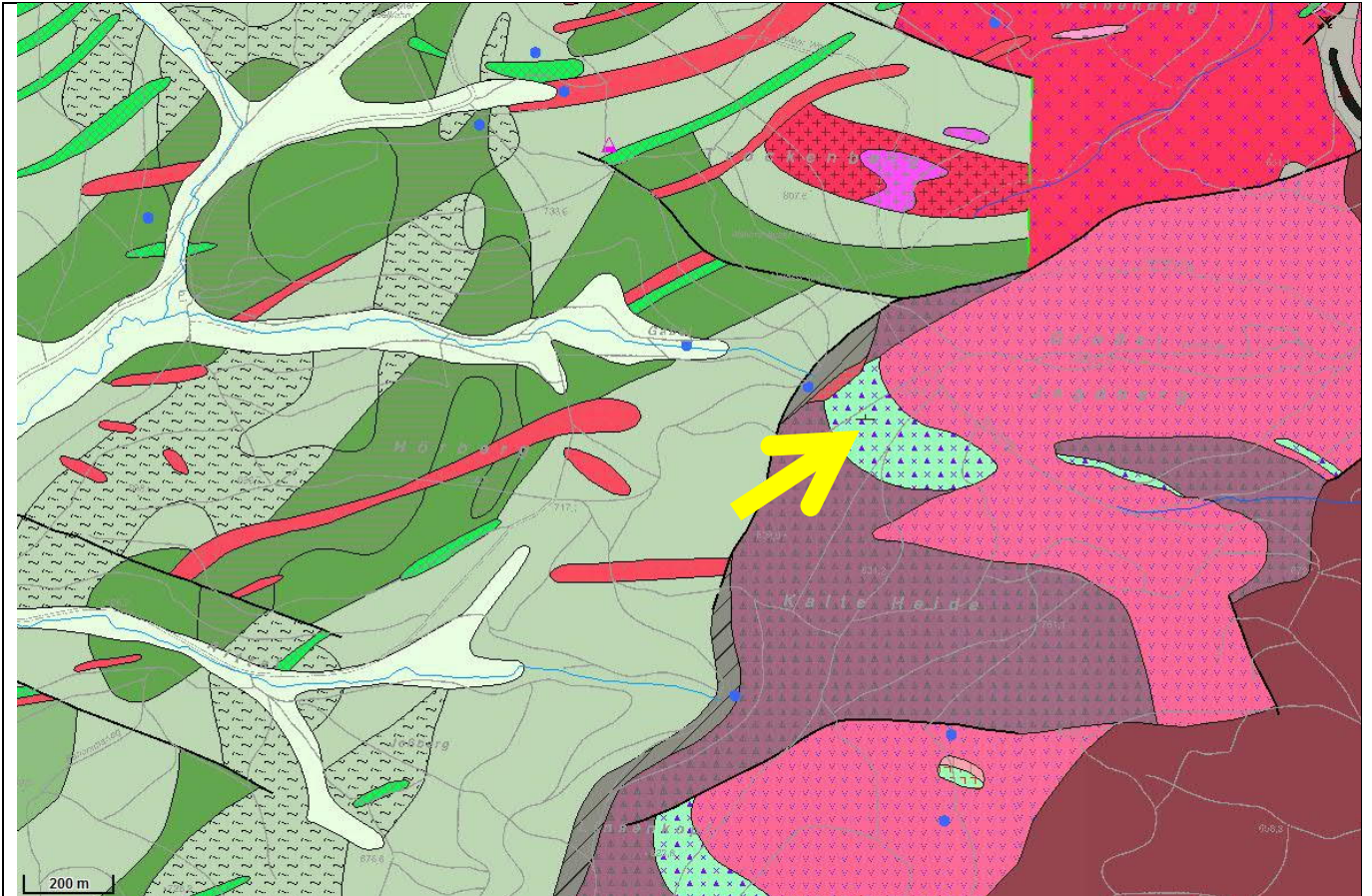


Abbildung 24: Ausschnitt aus der Geologischen Karte des Gebietes nordöstlich von Brotterode. Der Pfeil kennzeichnet die Lage des Steinbruches (Graphik aus /25/).



Abbildung 25: Steinbruchgelände in der „Kalten Heide“



Abbildung 26: Abraum unmittelbar neben dem Steinbruchgelände



Abbildung 27: Gewonnenes Probenmaterial aus dem Steinbruch

Für die materialtechnischen Untersuchungen wurden aus dem aus dem Steinbruch gewonnenen Material Bohrkern gewonnen (D=100 mm). Diese sind in der nachfolgenden Tabelle wiedergegeben.

Tabelle 3: Proben aus dem Steinbruch Brotterode

Probenbezeichnung	Probenart	Beschreibung	Entnahmeort	Bohrkernlänge
BR/B/01	Bohrkern	rötlich-violette Steinvarietät	ehemaliger Steinbruch, Abraum	8 cm
BR/B/02	Bohrkern	grünliche Steinvarietät	ehemaliger Steinbruch, Abraum	
BR/B/03	Bohrkern	grünliche Steinvarietät	ehemaliger Steinbruch, Abraum	10 cm
BR/B/04	Bohrkern	grünliche Steinvarietät	ehemaliger Steinbruch, Abraum	8 cm
BR/B/05	Bohrkern		ehemaliger Steinbruch, Abraum	
BR/B/06	Bohrkern	rötlich-violette Steinvarietät	ehemaliger Steinbruch, Abraum	10 cm
BR/B/07	Bohrkern	rötlich-violette Steinvarietät	ehemaliger Steinbruch, Abraum	15 cm

4.2 Die Gefügestruktur des Rhyolithuffes

An zuvor ausgewählten Bohrkernproben von der Fassade der Kirche bzw. aus Steinbruchmaterial erfolgten makroskopische sowie mikroskopische Untersuchungen zur Beurteilung der Gefügeeigenschaften, insbesondere im Hinblick auf die Verwitterungsprozesse des Gesteins. Die mikroskopischen Untersuchungen wurden an An- und Dünnschliffen durchgeführt.



Abbildung 28: Vorderseite des Bohrkernes BR/K/13 (rötlich-violette Varietät) mit durch Abwitterung aufgerauter und leicht abschuppender Oberfläche

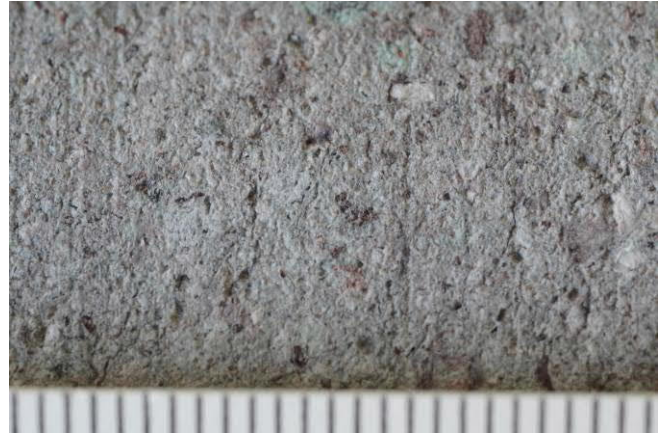


Abbildung 29: Offenbar ungeschädigte Wandungsfläche des Bohrkernes BR/K/13 aus dem inneren Bereich



Abbildung 30: Wandungsfläche des Bohrkernes BR/K/13 im unmittelbaren Oberflächenbereich (links). Gut erkennbar sind die Aufrauung der angeschnittenen Oberfläche sowie oberflächenparallele Schwächezonen.



Abbildung 31: Vorderseite des Bohrkernes BR/K/11 (grünliche Varietät) mit durch Abwitterung aufgerauter Oberfläche



Abbildung 32: Offenbar ungeschädigte Wandungsfläche des Bohrkernes BR/K/11 aus dem inneren Bereich

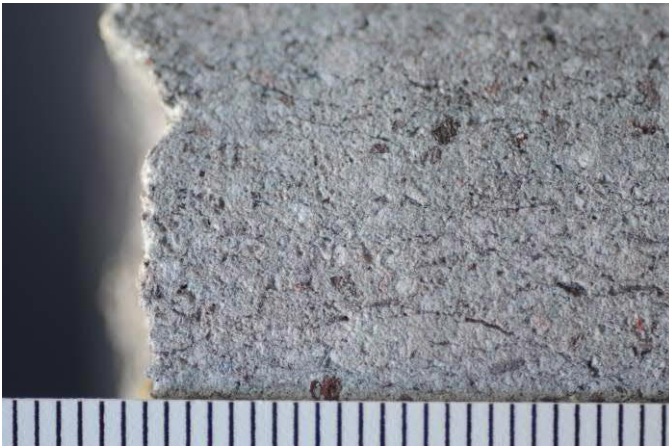


Abbildung 33: Wandungsfläche des Bohrkernes BR/K/11 im unmittelbaren Oberflächenbereich (links). Hier sind neben der Oberflächenaufräuhung auch eine fortschreitende Rissbildung im Gefüge erkennbar.



Abbildung 34: Vorderseite des Bohrkernes BR/K/16 (rötlich-violette Varietät) mit abschuppender Oberfläche



Abbildung 35: Wandungsfläche des Bohrkernes BR/K/16 im unmittelbaren Oberflächenbereich (links). Deutlich sichtbar ist die Gefügeschwächung in der oberflächennahen Zone, die sich in einer Rissbildung äußert.

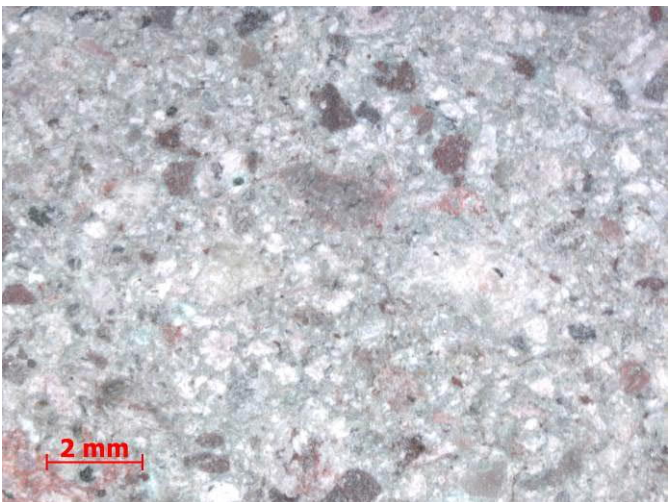


Abbildung 36: Anschlifffläche eines rötlich-violetten Rhyolithtuffes von der Kirche Brotterode unter dem Mikroskop

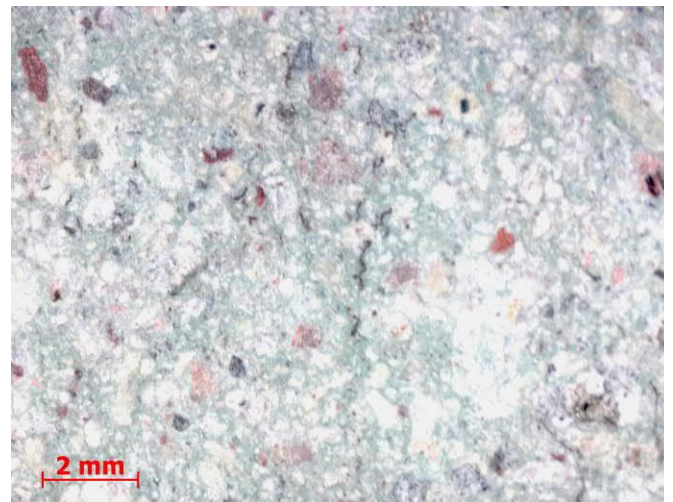


Abbildung 37: Anschlifffläche eines grünlichen Rhyolithtuffes von der Kirche Brotterode unter dem Mikroskop



Abbildung 38: Gesteinsprobe BR/K/01a (Schale) von der Kirche Brotterode, Ansicht der Vorderseite



Abbildung 39: Gesteinsprobe BR/K/01a (Schale), Makroskopische Ansicht der Vorderseite mit erkennbar zerklüfteter, von Rissen durchzogener Oberfläche und starker biogener Besiedelung.

Vermutlich aufgrund der schnellen Abkühlung der Aschen entstehen im erkalteten Gesteinsmaterial Schwächezonen, die sich zu Rissen öffnen. Aufgrund der Genese des Rhyolithtuffes besitzt das Material eine Gefügetextur, die einen schichtigen, eingeregeltten Rissverlauf induziert. Die Risse werden durch Löse- und Transportprozesse wieder geschlossen, stellen aber weiterhin eine Schwachstelle im Gefüge dar. Deutlich sind diese dunklen Laminarstrukturen im Gefüge aufgrund ihrer Färbung erkennbar.

Auffallend ist, dass der Rhyolithtuff an der bewitterten Oberfläche ein charakteristisches Verwitterungsbild entwickelt: Entsprechend der Einbaulage der deutlich geschichteten Steine bilden sich mehrlagige Schalen bis in Dezimetergröße oder abgeflachte Schuppen. Beiden Korrosionsformen ist gemein, dass diese durch sich öffnende Risse im Gefüge induziert werden. Die Spalten entstehen in den dunklen Laminarstrukturen, die sich hin zu Rissen öffnen. Dieser Vorgang verläuft nahezu ausschließlich in der obersten oberflächenparallelen Gesteinsschicht, etwa bis 3...10 mm unter die Oberfläche reichend und parallel mit der Verwitterungsfront in das Gesteinsinnere vordringend.

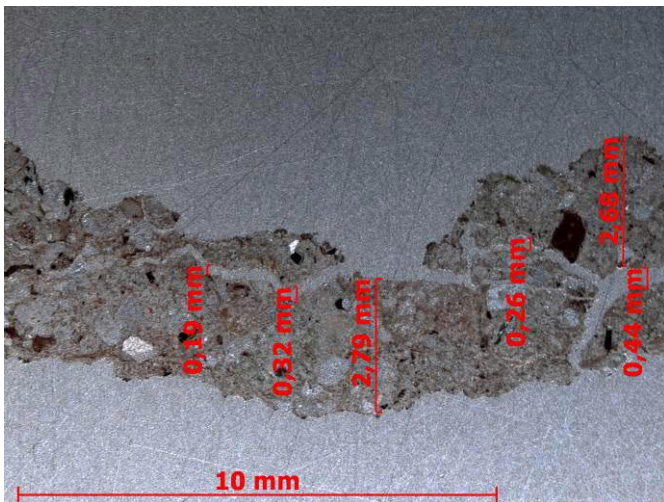


Abbildung 40: Gesteinsprobe BR/K/01a, Mikroskopaufnahme, Dünnschliff des Querschnittes der Schale mit erkennbar starker Zerklüftung und Rissbreiten bis fast 0,5 mm. Die Schalenoberseite ist im Bild oben.

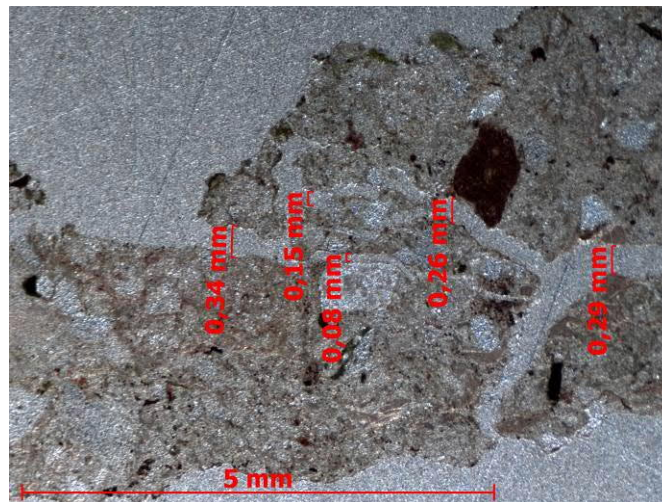


Abbildung 41: Gesteinsprobe BR/K/01a, Vergrößerter Ausschnitt aus Abbildung 40 zur Verdeutlichung des Rissystems. Oben ist die durch biogene Besiedelung grün gefärbte Oberfläche gut erkennbar.

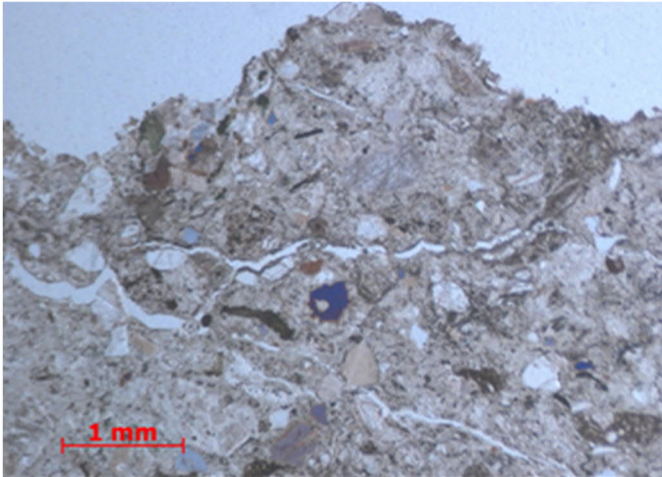


Abbildung 42: Gesteinsprobe BR/K/01a, Mikroskopaufnahme, Dünnschliff des Querschnittes der Schale mit durchgehendem Rissnetzsystem. Die Schalenoberseite ist im Bild oben. Polarisatoren II

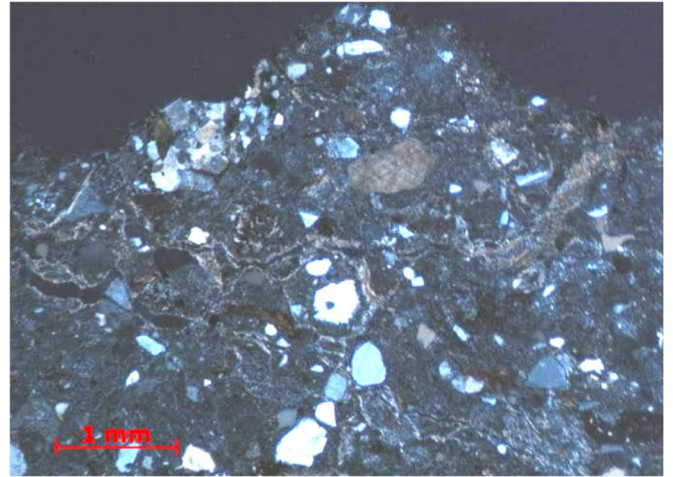


Abbildung 43: Gesteinsprobe BR/K/01a, Gleicher Ausschnitt wie Abbildung 42, Polarisatoren +: Gut erkennbar sind bräunliche Laminarstrukturen, welche die Schwächezonen darstellen, aus denen sich dann die Rissysteme entwickeln.



Abbildung 44: Gesteinsprobe BR/K/03 (grüne Steinvarietät, Schale), Ansicht der Oberseite mit extrem starker biogener Besiedelung

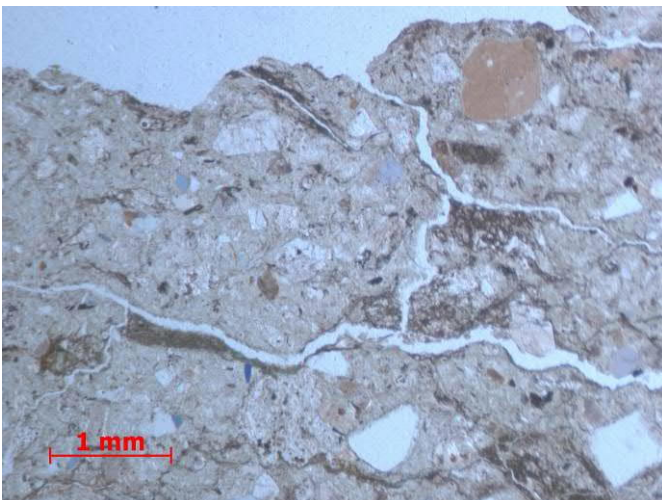


Abbildung 45: Gesteinsprobe BR/K/03, Mikroskopaufnahme, Dünnschliff des Querschnittes der Schale mit durchgehendem Rissnetzsystem. Polarisatoren II

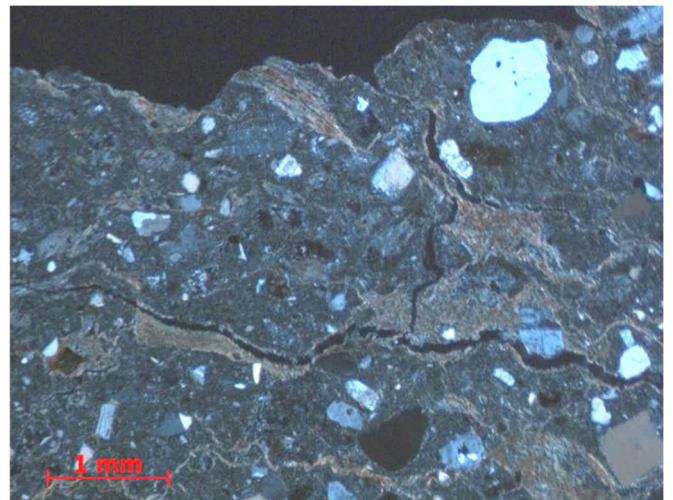


Abbildung 46: Gesteinsprobe BR/K/03, Gleicher Ausschnitt wie Abbildung 45, Polarisatoren +: Die bräunlichen Laminarstrukturen sind hier noch deutlicher erkennbar. Sie durchziehen netzförmig die gesamte Gesteinsmatrix. Die Risse entwickeln sich entlang dieser Strukturen.



Abbildung 47: Gesteinsprobe BR/K/06a (rötlich-violette Steinvarietät, Schale), Ansicht der Oberseite



Abbildung 48: Gesteinsprobe BR/K/06a, Mikroskopaufnahme, Dünnschliff des Querschnittes der Schale mit starker Zerklüftung und Rissbreiten bis 0,3 mm. Der in der oberen Bildmitte erkennbare Pyroklast-Einschluss weist eine umlaufende Rissflanke auf. Die Schalenoberseite ist im Bild oben. Polarisatoren II

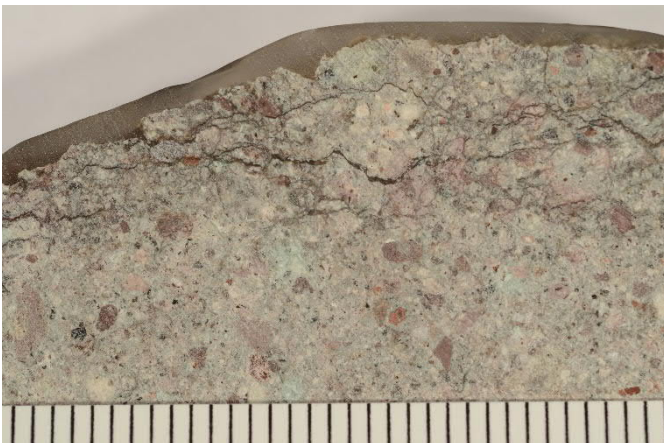


Abbildung 49: Gesteinsprobe BR/K/15-1 (rötlich-violette Steinvarietät), Querschnitt im Oberflächenbereich mit der ca. 5...10 mm starken Risszone. Darunter ist das Gefüge augenscheinlich ungeschädigt.

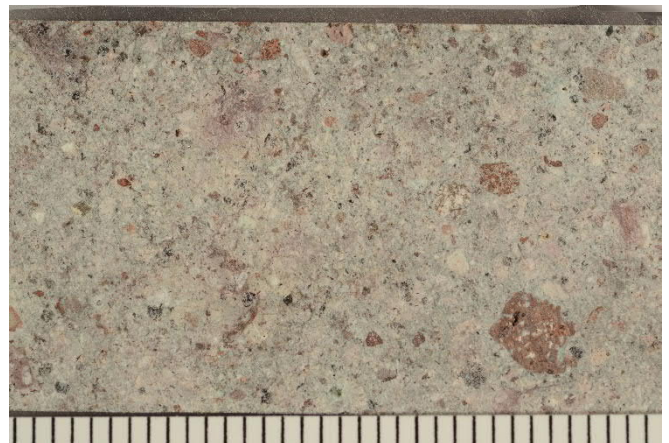


Abbildung 50: Gesteinsprobe BR/K/15-2, Querschnitt, unmittelbar unterhalb BR/K/15-1 entnommen (Oberflächenrichtung oben): Es sind keine Indizien von Gefügeschäden erkennbar



Abbildung 51: Gesteinsprobe BR/G10 mit deutlich erkennbaren dunklen Laminarstrukturen, konzentriert im linken Bereich mit der grünlichen Matrix (Bildunterkante 30 mm)

Teilweise wiesen Oberflächenbereiche des verbauten Rhyolithtuffes dunkle, dünne, gefügenachbildende Überzüge auf, die in mehreren Schichten übereinanderlagen und offensichtlich im Zusammenhang mit den dunklen Laminarstrukturen stehen.



Abbildung 52: Oberflächenprobe BR/K/P1b von Rhyolithtuff mit starkem schwarzbraunem Überzug (Bildunterkante ca. 80 mm)

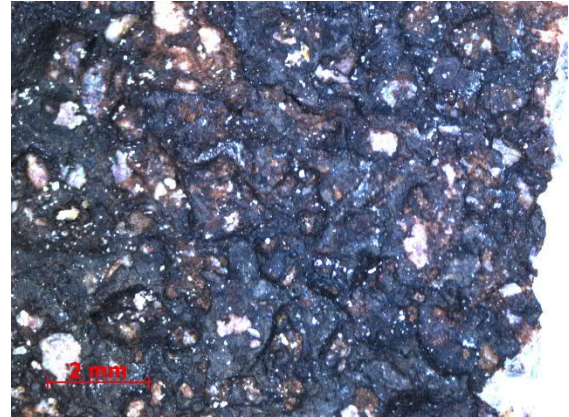


Abbildung 53: Mikroskopaufnahme der Oberflächenprobe aus Abbildung 52: Gut erkennbar ist die Oberflächennachbildung des dünnen Überzuges.

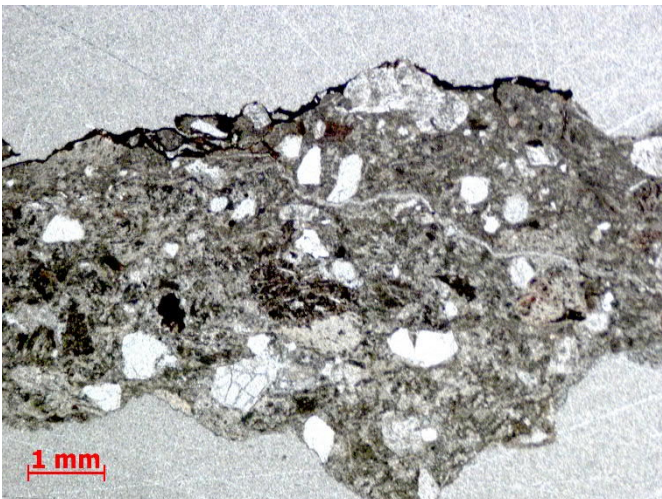


Abbildung 54: Dünnschliff eines Teiles der Oberflächenprobe BR/K/P1b mit deutlich erkennbarem dünnen strukturnachbildenden Überzug.

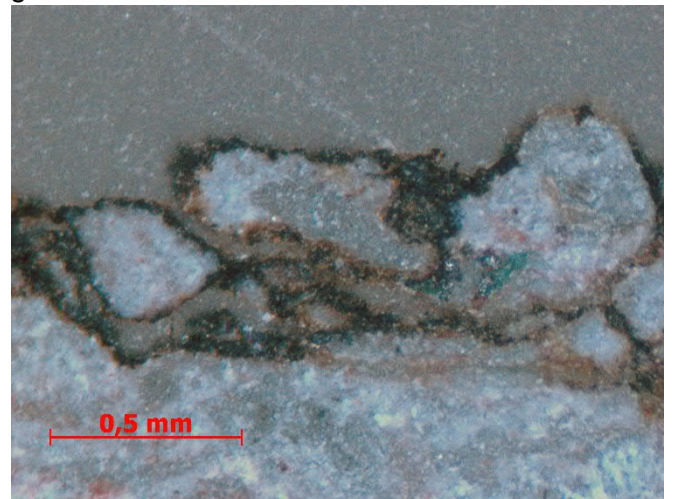


Abbildung 55: Detailausschnitt aus Abbildung 54; Der dünne Überzug umhüllt die äußeren Kornlagen des Rissnetzsystems der Steinoberfläche vollständig.

Untersuchungen mit einem Massenspektrometer, gekoppelt mit einer Laserablationseinrichtung (Quadrupol ICP-MS (Fabrikat iCAP RQ, ThermoFisher Scientific) und Laser (LSX-213 G2+, Teledyne Cetac)) sollten die Elementverteilungen in interessierenden Gefügebereichen darstellen und damit Hinweise auf die Zusammensetzung der dunklen Laminarstrukturen bzw. dunklen Oberflächenüberzüge liefern.

Die LA-ICP-MS („Laser Ablation – Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry“) ist eine empfindliche Analysenmethode zur schnellen Multi-Elementbestimmung im Spuren- und Ultraspurenbereich an festen Probenmaterialien und technischen Produkten. Das zu untersuchende Probenmaterial wird mittels einer fokussierten Laserstrahlung ablatiert und mit einem Trägergas (Argon) in die induktiv gekoppelte Plasmaionenquelle eines ICP-MS transportiert. Im ca. 8000 °C heißen Plasma werden die winzigen Pro-

benteilchen atomisiert und positiv ionisiert, beschleunigt und in das Hochvakuum eines Massenspektrometers verbracht. Dort werden sie nach ihrem Masse-/Ladungsverhältnis und Energie-/Ladungsverhältnis getrennt und zeitaufgelöst detektiert. Die entstehenden Laserkrater sind nur wenige μm groß. /24/ Mittels der Laserablation lassen sich Einzelmessungen (Spots) vornehmen, aber auch Linien abfahren und Flächen scannen (Mapping). Der Ablationsbereich lässt sich bis auf etwa $10 \mu\text{m}$ fokussieren. Somit ist eine sehr gute Trennschärfe der Messung möglich. Detektieren lassen sich mit dem zur Verfügung stehenden Gerät Elemente etwa ab der Ordnungszahl 11 (Natrium).

Untersucht wurden in entsprechend präparierten Gesteinsproben folgende Gefügebereiche:

- Steinmaterial mit deutlicher dunkler Rissstruktur
- Steinmaterial unmittelbar unter einer bewitterten Oberflächenzone mit einer deutlichen dünnen schwarzbraun gefärbten Schicht an der Oberfläche
- Steinmaterial im Wechsel zwischen violettbrauner und grüner Matrix



Abbildung 56: Teilbereich der Anschliffprobe BR/G10 mit Kennzeichnung des linienförmigen Ablationsbereiches (Pfeil), orthogonal zum Verlauf der dunklen Ader in der ansonsten helleren Matrix, Maß der Bildunterkante ca. 1,5 mm Die Messung beschränkte sich auf die Detektion von Isotopen der Elemente Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe, Cr und Ba.

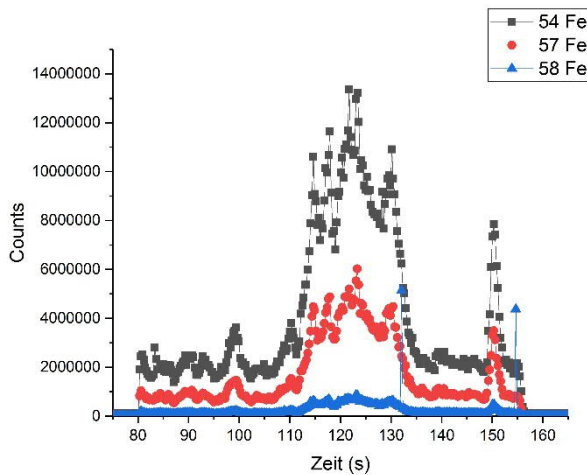


Abbildung 57: Signalintensität der 3 Eisenisotope Fe54, Fe57 und Fe58 im Verlauf der Ablationslinie. Deutlich erkennbar ist die starke Zunahme des Eisengehaltes im Bereich der Ader (t = 110...130 s).

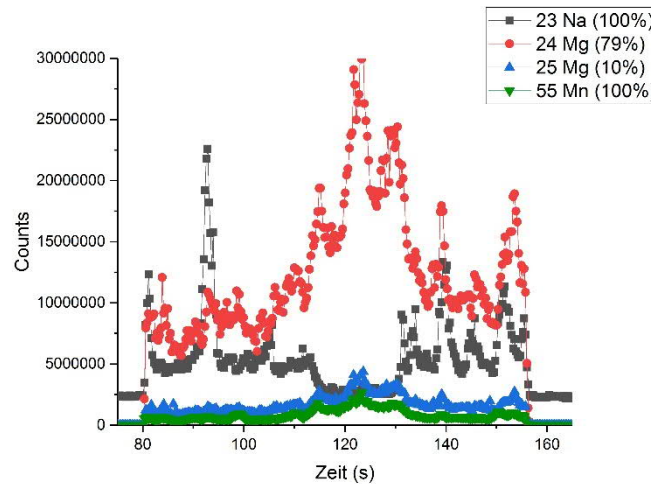


Abbildung 58: Signalintensität von Isotopen der Elemente Natrium, Magnesium, Mangan. Im Bereich der Ader ist eine deutliche Zunahme des Magnesiumgehaltes erkennbar (t=110...130 s).

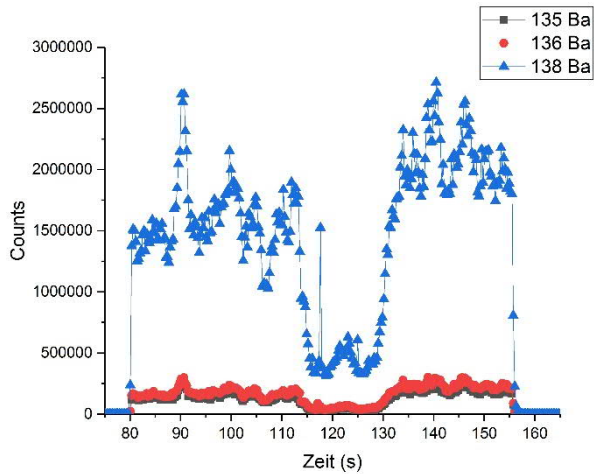


Abbildung 59: Signalintensität der drei Bariumisotope Ba135, Ba136, Ba137 im Verlauf der Ablationslinie. Die Ader ist deutlich ärmer an Ba138 (t = 110...130 s).

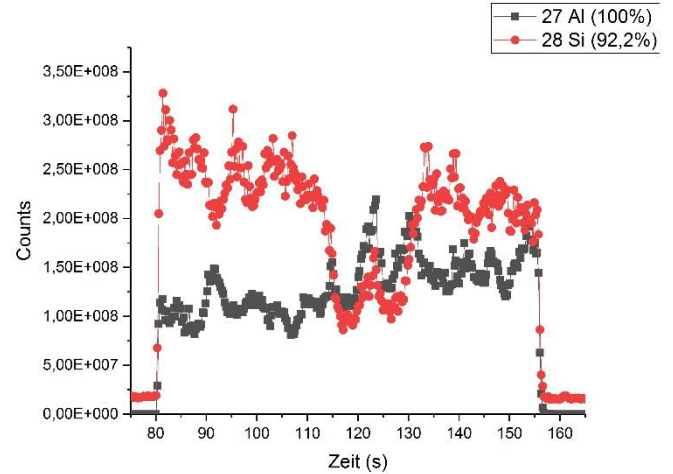


Abbildung 60: Signalintensität von Isotopen von Aluminium und Silizium: Der Bereich der Ader ist siliziumärmer.

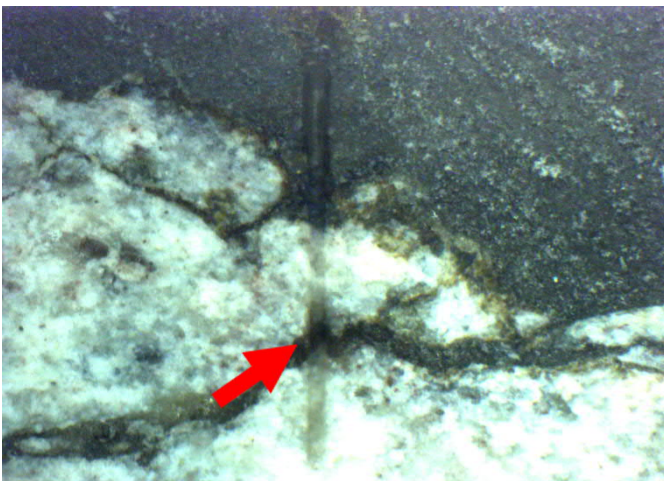


Abbildung 61: Teilbereich der Anschliffprobe BR/K/P1b mit Kennzeichnung des linienförmigen Ablationsbereiches (Pfeil), die oberflächige dunkle Auflagerung und die darunter befindliche dunkle Ader überstreichend, Maß der Bildunterkante ca. 1,5 mm Die Messung beschränkte sich auf die Detektion von Isotopen der Elemente Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe, Cr und Ba.

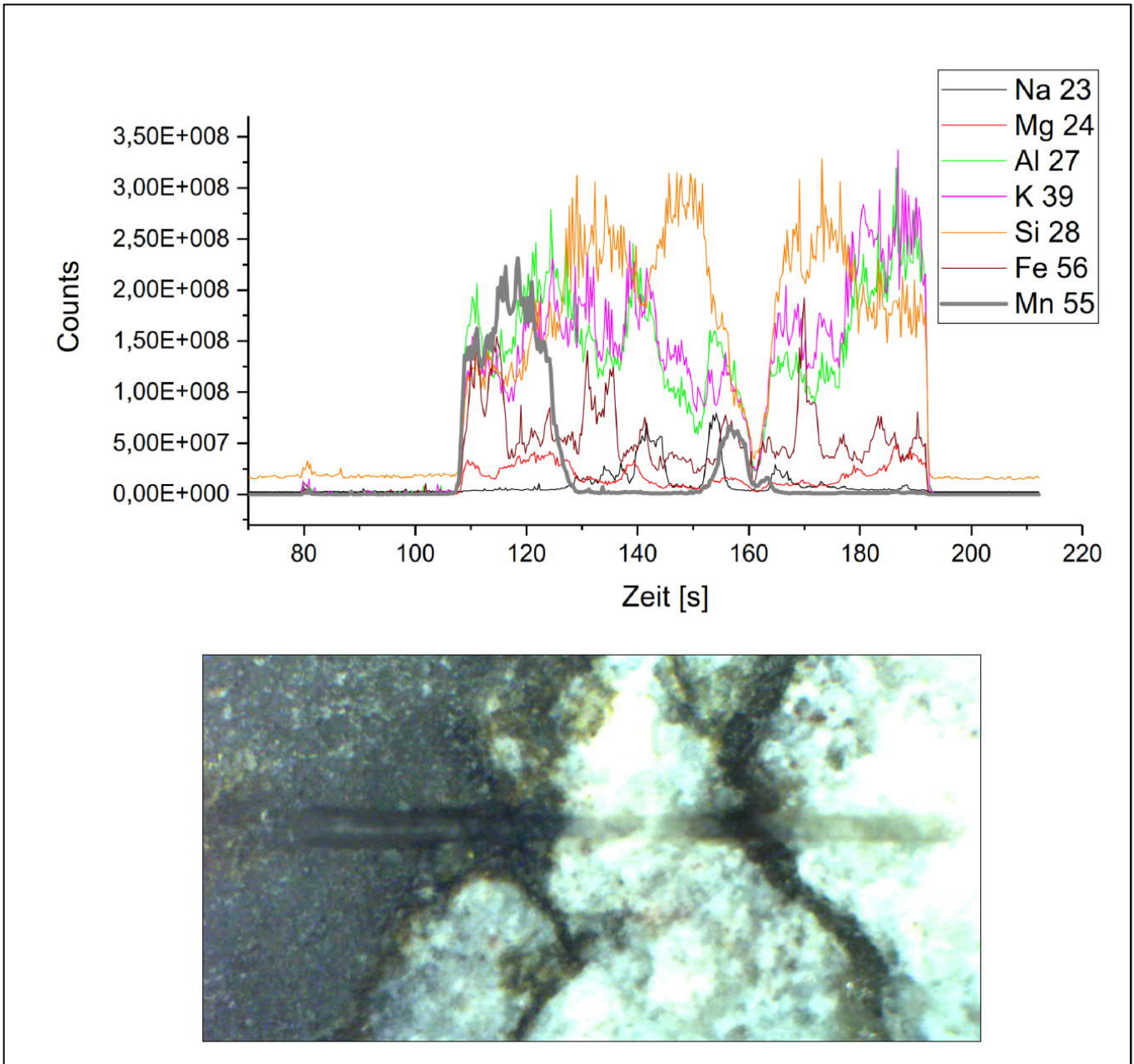


Abbildung 62: Gegenüberstellung des linienförmigen Ablationsbereiches, größenformatiert auf die Zeitachse des darüber liegenden Diagrammes der Signalintensität von ausgewählten Isotopen. Deutlich zu erkennen ist die Kohärenz der Signalintensität des Isotops Mn 55 mit den dunklen gefügenachbildenden Auflagerungen.

In zwei weiteren für die Bewertung der Gefügestrukturen relevanten Bereichen erfolgte eine flächige Bestimmung der Isotope (Mapping).

Der erste untersuchte Bereich war eine von einer Ader durchzogene Fläche, die außerdem deutlich unterscheidbare Mineralaggregate und Matrixzonen aufwies sowie eine sich von oben nach unten von grün in violettgrau verändernde Färbung der Grundmasse.

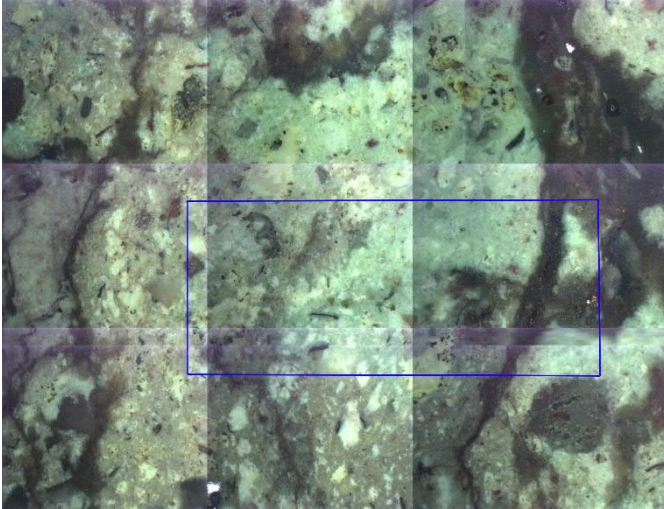


Abbildung 63: Teilbereich der Anschliffprobe BR/G10 mit Kennzeichnung der Ablationsfläche, Maß der Bildunterkante ca. 7 mm
Die Messung beschränkte sich auf die Detektion von Isotopen der Elemente Na, Mg, Al, Mn, Fe, S, P und Zn.

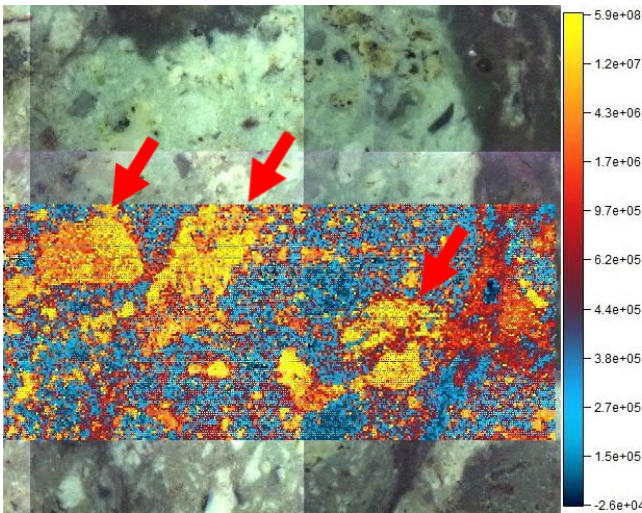


Abbildung 64: Elementverteilung von Na23. Eine starke Anreicherung ist in den markierten Mineralaggregaten erkennbar – ein Hinweis auf Natronfeldspäte

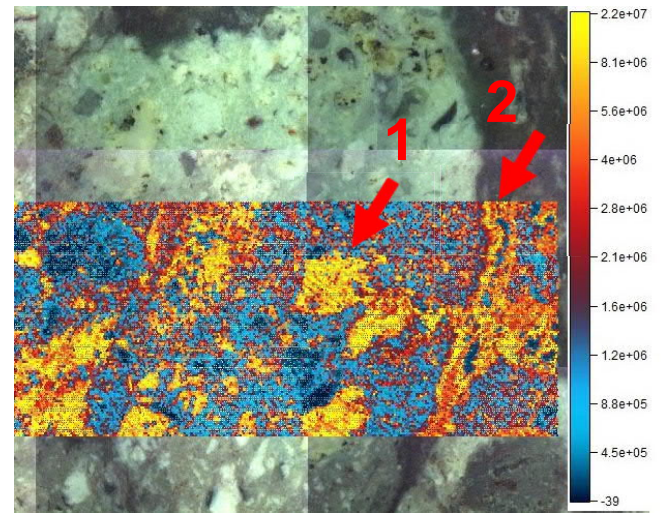


Abbildung 65: Elementverteilung von Mg24. Mit „1“ markiert ist ein magnesiumreicher Feldspat. Hohe Magnesiumkonzentrationen finden sich auch im Bereich der Laminarstruktur („Ader“ rechts im Bild („2“).

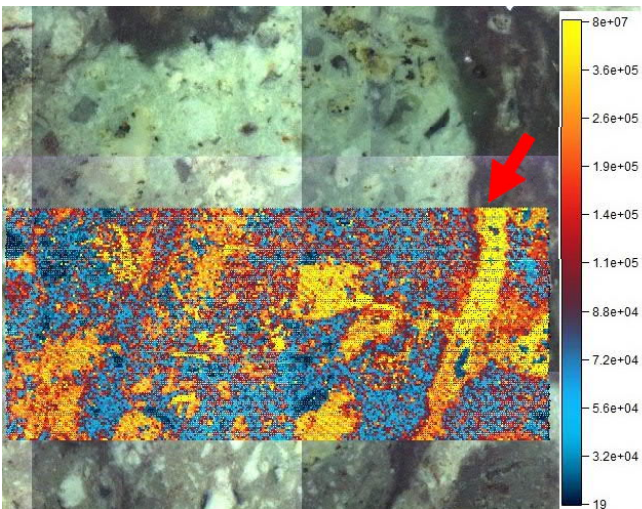


Abbildung 66: Elementverteilung von Mn55. Eine hohe Mangankonzentration findet sich in der Laminarstruktur „Ader“ - Pfeilmarkierung).

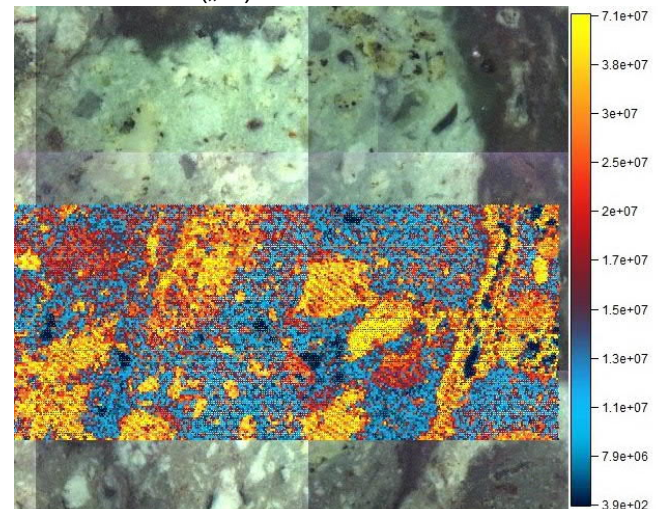


Abbildung 67: Elementverteilung von Al27: Die Konzentrationsverteilung deckt sich in wesentlichen Bereichen mit der von Mg24 (Abbildung 65).

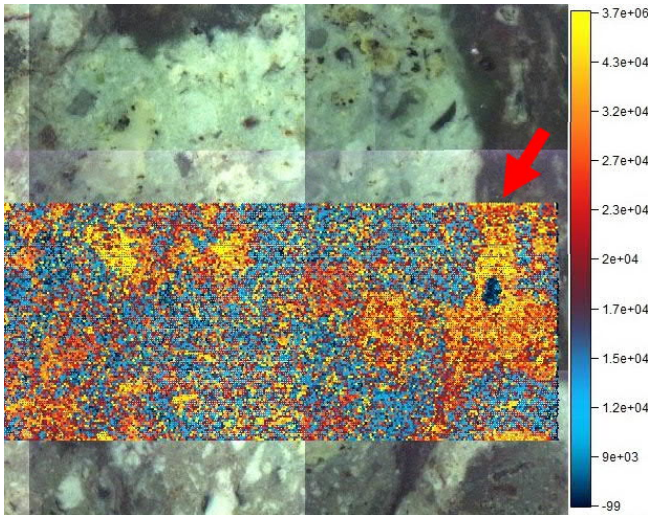


Abbildung 68: Elementverteilung von Zn64: Hohe Zinkkonzentrationen finden sich im Bereich der markierten Laminarstruktur („Ader“)

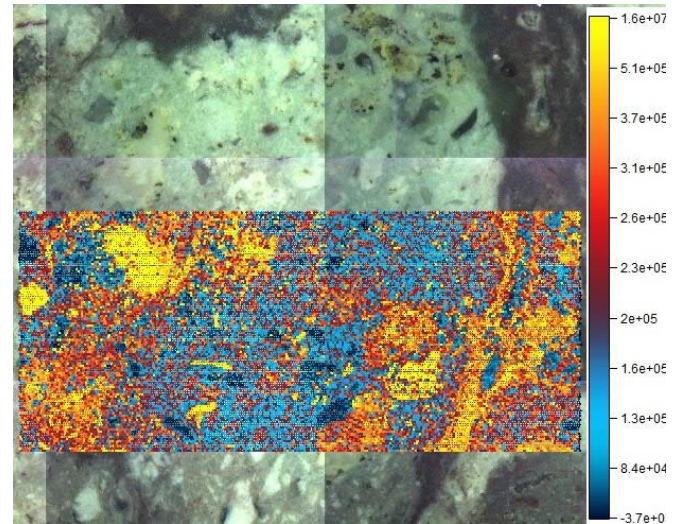


Abbildung 69: Elementverteilung von Fe54: Eisen konzentriert sich in den optisch dunklen Bereichen des Scans – sowohl innerhalb der Matrix als auch der Laminarstruktur (Ader) – Vgl. Abbildung 63.

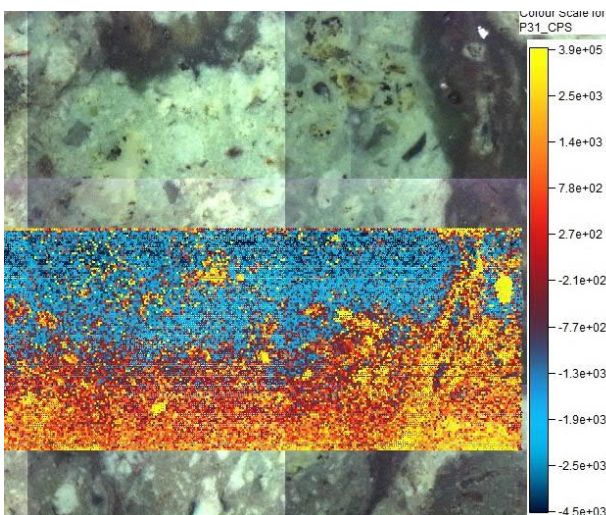


Abbildung 70: Elementverteilung von P31: Offenbar konzentriert sich das detektierte Phosphor isotop im Bereich der Laminarstruktur und der rötlich gefärbten Matrixbereiche im Scan unten.

Ein weiterer Scan wurde in der Oberflächenzone eines Rhyolithuff-Anschliffes von der gereinigten Fassade der Kirche Brotterode durchgeführt (Verwitterungsoberfläche mit dunklem wüstenlackartigem Überzug und darunter verlaufender Laminarstruktur = Ader).

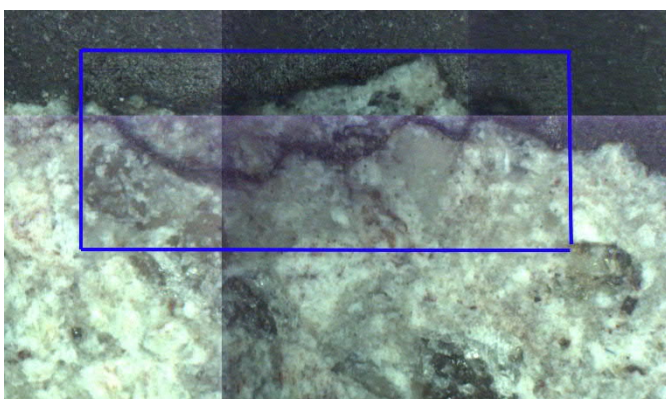


Abbildung 71: Teilbereich der Anschliffprobe BR/P1a mit Kennzeichnung der Ablationsfläche, Maß der Bildunterkante ca. 3 mm
Die Messung beschränkte sich auf die Detektion von Isotopen der Elemente Na, Mg, Al, Mn, Fe, S, P und Zn.

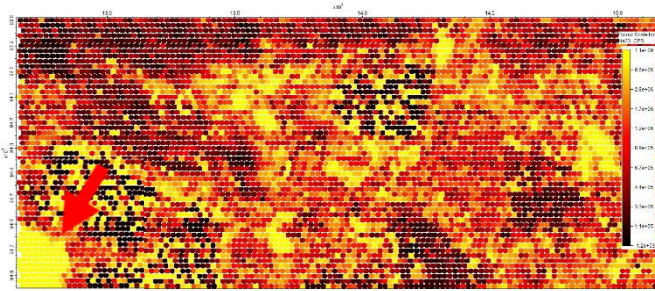


Abbildung 72: Elementverteilung von Na23. Eine signifikante Anreicherung von Na ist im Bereich der Oberfläche und der Aderung nicht erkennbar. In der Abbildung unten links (Pfeil) ein Natronfeldspat.

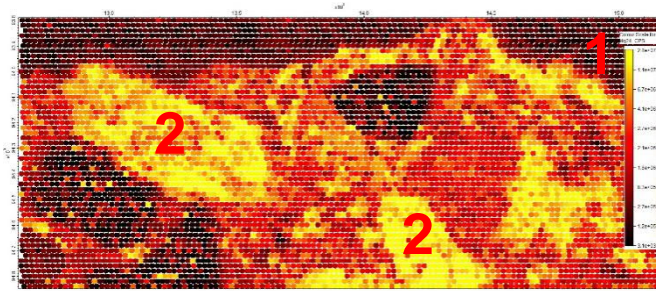


Abbildung 73: Elementverteilung von Mg24. Eine leichte Anreicherung von Mg ist im Oberflächenbereich erkennbar (1), darüber hinaus sind stark magnesiumhaltige Feldspäte detektiert (2).

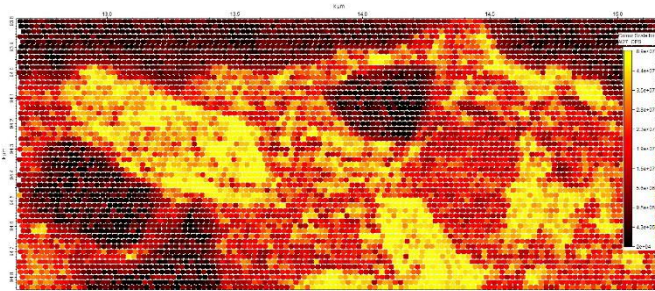


Abbildung 74: Elementverteilung von Al27. Die starken Elementanreicherungen von Aluminium sind nahezu deckungsgleich mit den detektierten Mg24 in Abbildung 73. Die dunklen Kristallite sind Quarze.

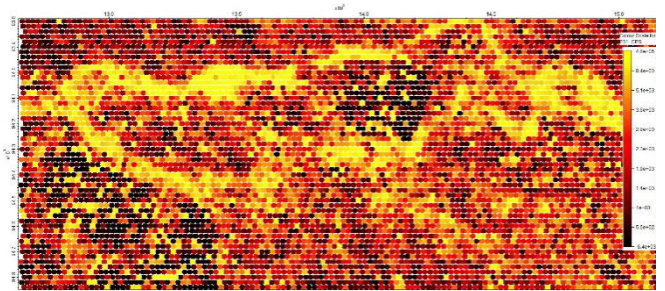


Abbildung 75: Elementverteilung von P31: Phosphor konzentriert sich entlang der Oberflächenauflagerungen und der dunklen Laminarstruktur.

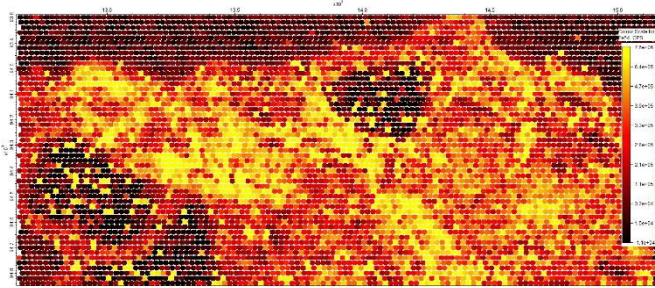


Abbildung 76: Elementverteilung von Fe54: Die Konzentration von Fe54 bildet, wenn auch schwächer ausgeprägt, die Verteilung von Al und Mg ab.

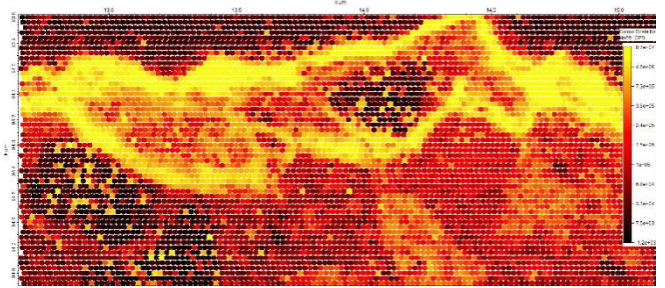


Abbildung 77: Elementverteilung von Mn55: Mangan konzentriert sich eindeutig in dem schwarzen Oberflächenbelag und der Laminarstruktur.

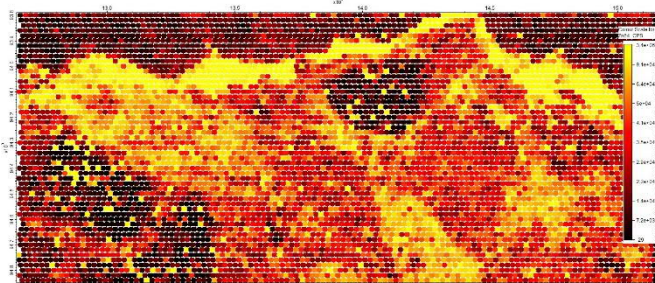


Abbildung 78: Elementverteilung von Zn64. In Oberflächenbelag ist eine deutliche Aufkonzentration von Zn vorliegend.

Zur Untersetzung der mittels LA-ICP-MS gewonnen Erkenntnisse und Verifizierung erfolgten an einer weiteren Rhyolithtuffprobe Untersuchungen zur Elementverteilung mittels ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope). Die Untersuchungen wurden an dem Gerät Thermo Fisher Scientific Helios G4 UX durchgeführt. Detektiert wurde der Anteil an Rückstreuелеktronen über eine gescannte Rechteckfläche

(Quantitatives Elementmapping). Darüber hinaus wurden prozentuale Elementverteilungen an vorher festgelegten ausgewählten Punkten ermittelt. Die Auswertung erfolgte über die Analysensoftware Oxford Instruments.

Die Rhyolithtuffprobe wurde poliert und mit Kohlenstoff bedampft.

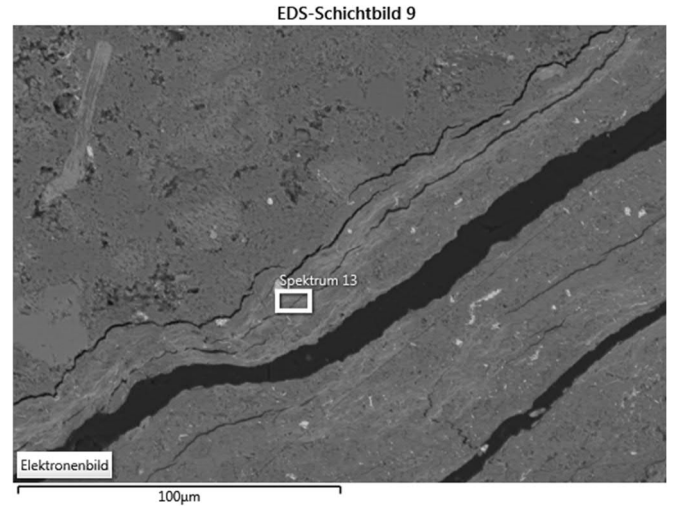
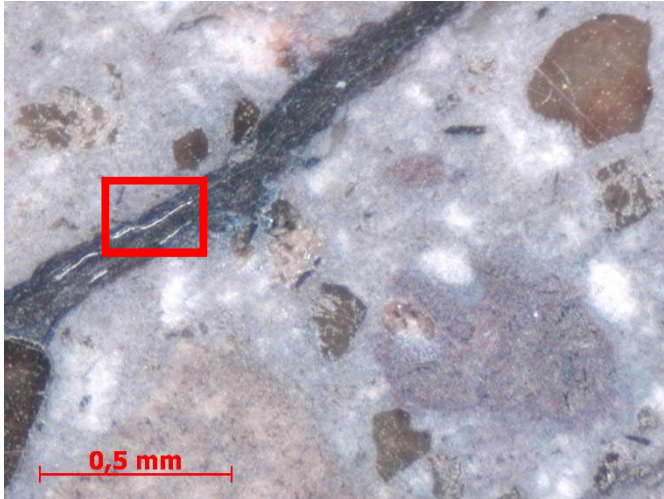


Abbildung 79: Teilbereich der polierten Rhyolithtuffprobe mit Kennzeichnung des Scanningbereiches im Anschluss helle Gefügematrix – dunkle Laminarstruktur (s. Abbildung 80).

Abbildung 80: Aufnahme des Rückstreubildes der mittels quantitativen Elementmappings untersuchten Oberfläche. Die dunklen rissartigen Strukturen sind mit Einbettharz gefüllte Schrumpfrisse innerhalb der Laminarstruktur. In der weiß umrandeten Fläche erfolgte die quantitative Bestimmung der Elementverteilung (s. Abbildung 92).

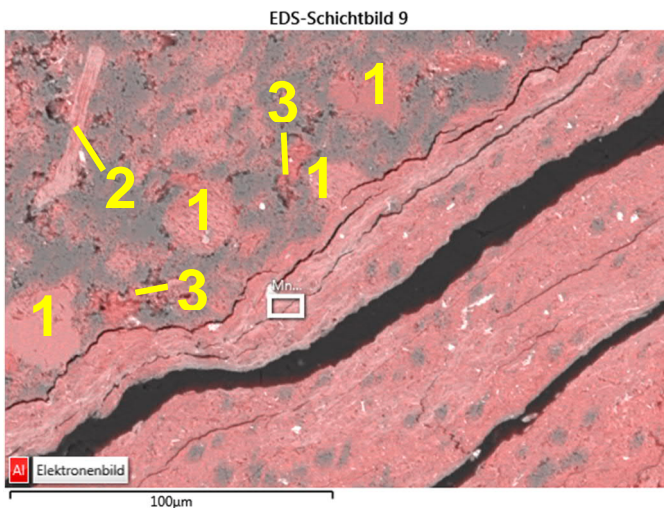


Abbildung 81: Elementverteilung von Aluminium: Eine deutliche Anreicherung ist im Bereich der Laminarstruktur erkennbar sowie vereinzelt in der angrenzenden Gesteinsmatrix. Hier werden dadurch vor allem Feldspäte (1), Schichtsilikate (2) und tonige Bestandteile (3) gekennzeichnet.

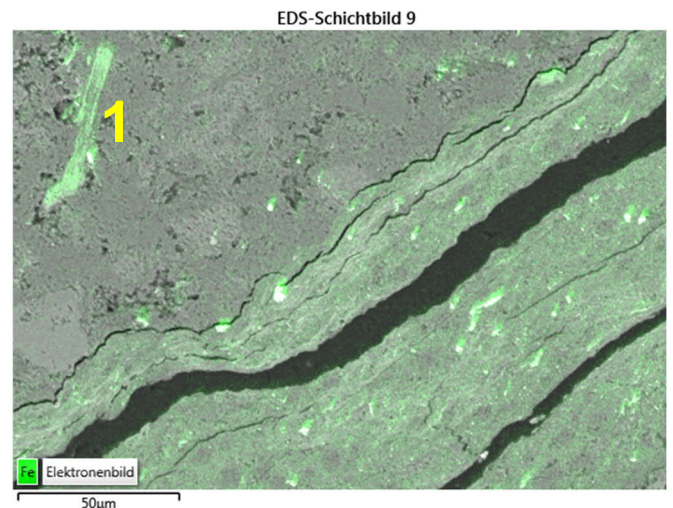


Abbildung 82: Elementverteilung von Eisen. Eine leichte Anreicherung von Fe ist im Bereich der Laminarstruktur vorliegend sowie im Schichtsilikateinsprengsel in der Grundmasse (1). Darüber hinaus sind kleine punktförmige Eisenanreicherungen vorhanden (bereits in Abbildung 80 als helle Punkte erkennbar).

EDS-Schichtbild 9

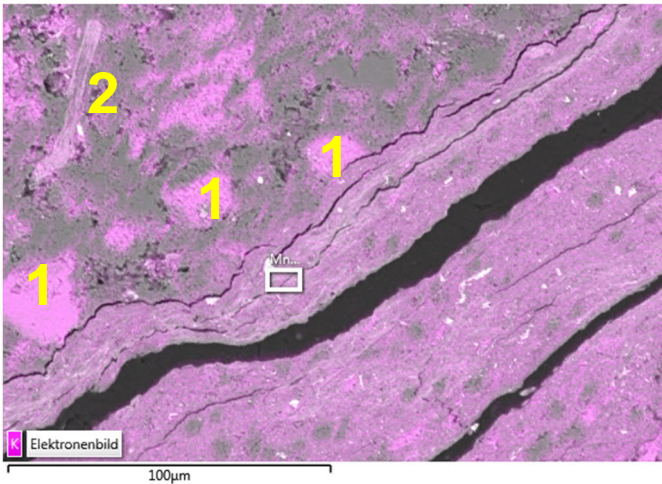


Abbildung 83: Elementverteilung von Kalium. Kalium ist in der Laminarstruktur angereichert sowie (in deutlich höherem Anteil) als Bestandteil der Orthoklaseinsprenglinge (1) und des Schichtsilikates (2) in der Grundmasse.

EDS-Schichtbild 9

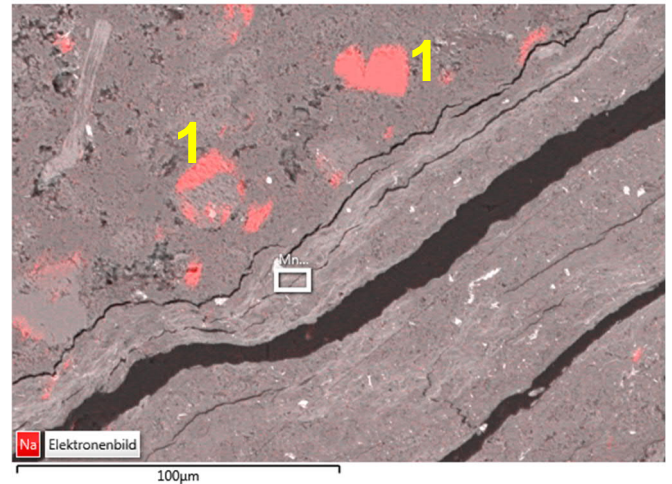


Abbildung 84: Elementverteilung von Natrium. Natrium ist im gescannten Bereich überwiegend als Bestandteil der Natronfeldspateinsprenglinge (1) nachgewiesen worden. Es ist offenbar in der Laminarstruktur nicht vorhanden.

EDS-Schichtbild 9

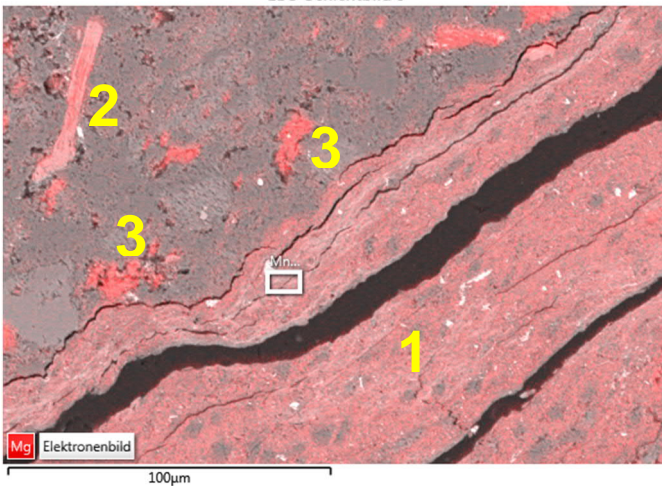


Abbildung 85: Elementverteilung von Magnesium. Magnesium tritt gehäuft innerhalb der Laminarstruktur auf (1), darüber hinaus im Schichtsilikateinsprengling (2) sowie in den vermutlich tonigen Bestandteilen (3) in der Gefügematrix.

EDS-Schichtbild 9

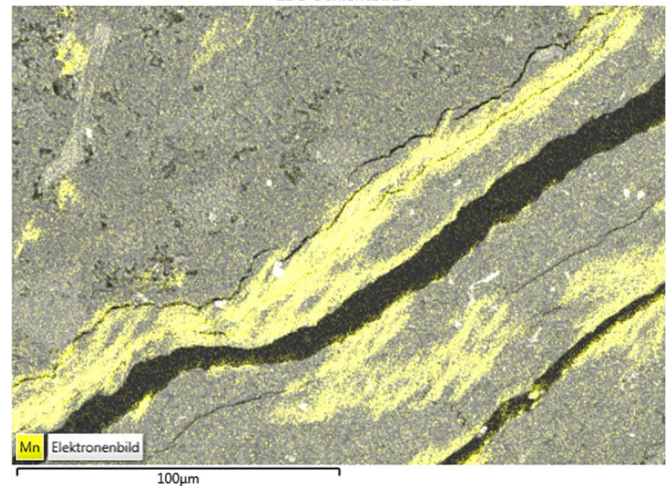


Abbildung 86: Elementverteilung von Mangan. Mangan konzentriert sich innerhalb der Laminarstruktur.

EDS-Schichtbild 9

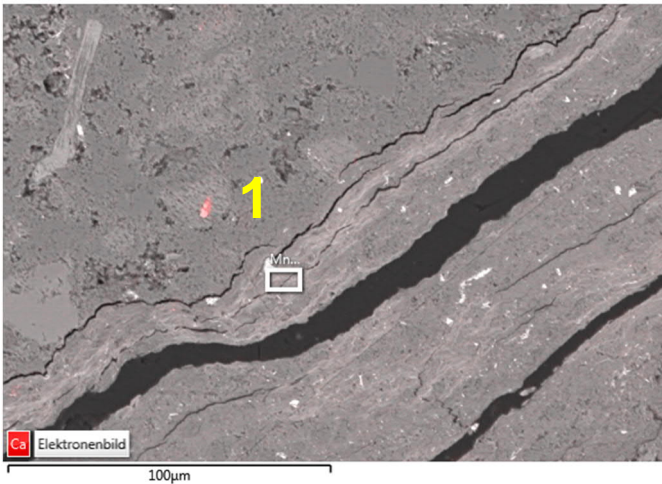


Abbildung 87: Elementverteilung von Calcium, welches nur in einem winzigen Einsprengsel vorhanden ist (1).

EDS-Schichtbild 9

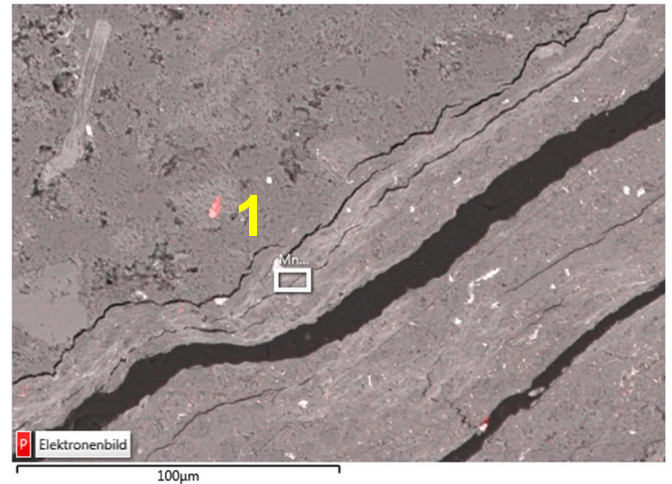


Abbildung 88: Elementverteilung von Phosphor, welche den Einsprengsel (1) als ein Calciumphosphat (Apatit?) charakterisiert.

EDS-Schichtbild 9

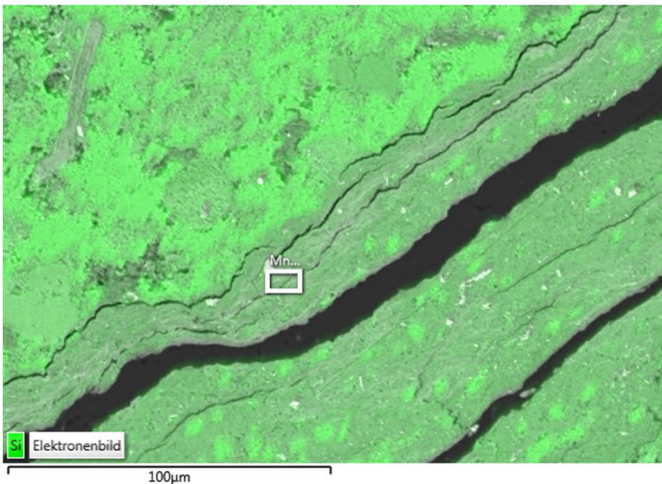


Abbildung 89: Elementverteilung von Silicium. Silicium ist Bestandteil der dichten Grundmasse außerhalb der Laminarstruktur, welche nur punktförmige kleine Siliciumanreicherungen aufweist.

EDS-Schichtbild 9

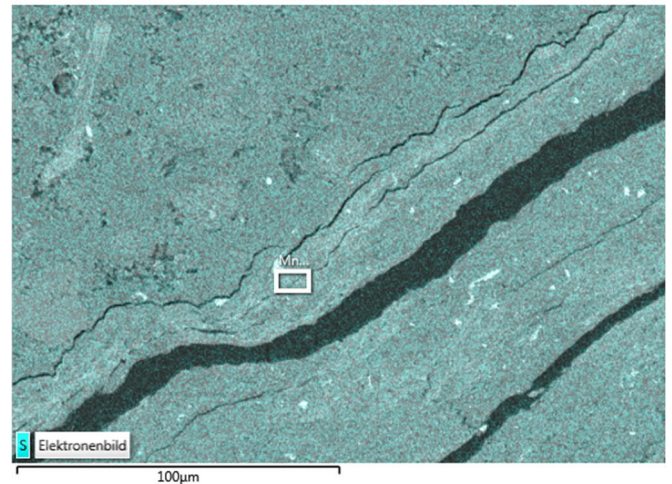


Abbildung 90: Elementverteilung von Schwefel, welches im gesamten Scanbereich nahezu gleichförmig verteilt detektiert wurde.

Zusätzlich wurde die quantitative Verteilung einiger wesentlicher Elemente innerhalb der flaserigen Laminarstruktur ermittelt.

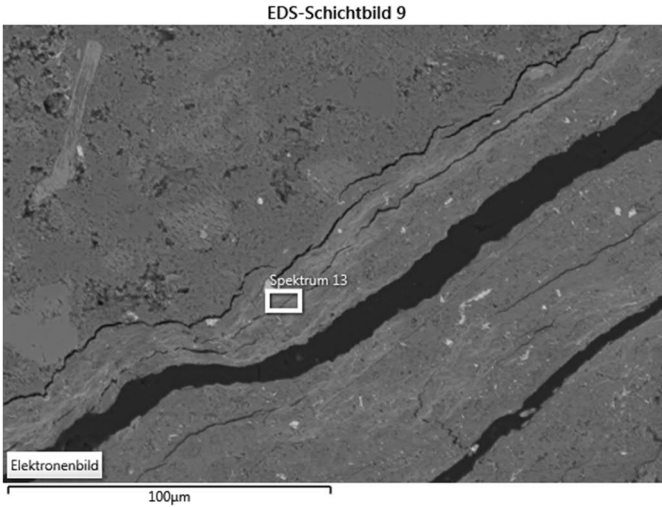


Abbildung 91: Aufnahme des Rückstreubildes der mittels quantitativen Elementmappings untersuchten Oberfläche. Innerhalb der weiß umrahmten Fläche (in der Laminarstruktur) erfolgte die quantitative Bestimmung der Elementverteilung.

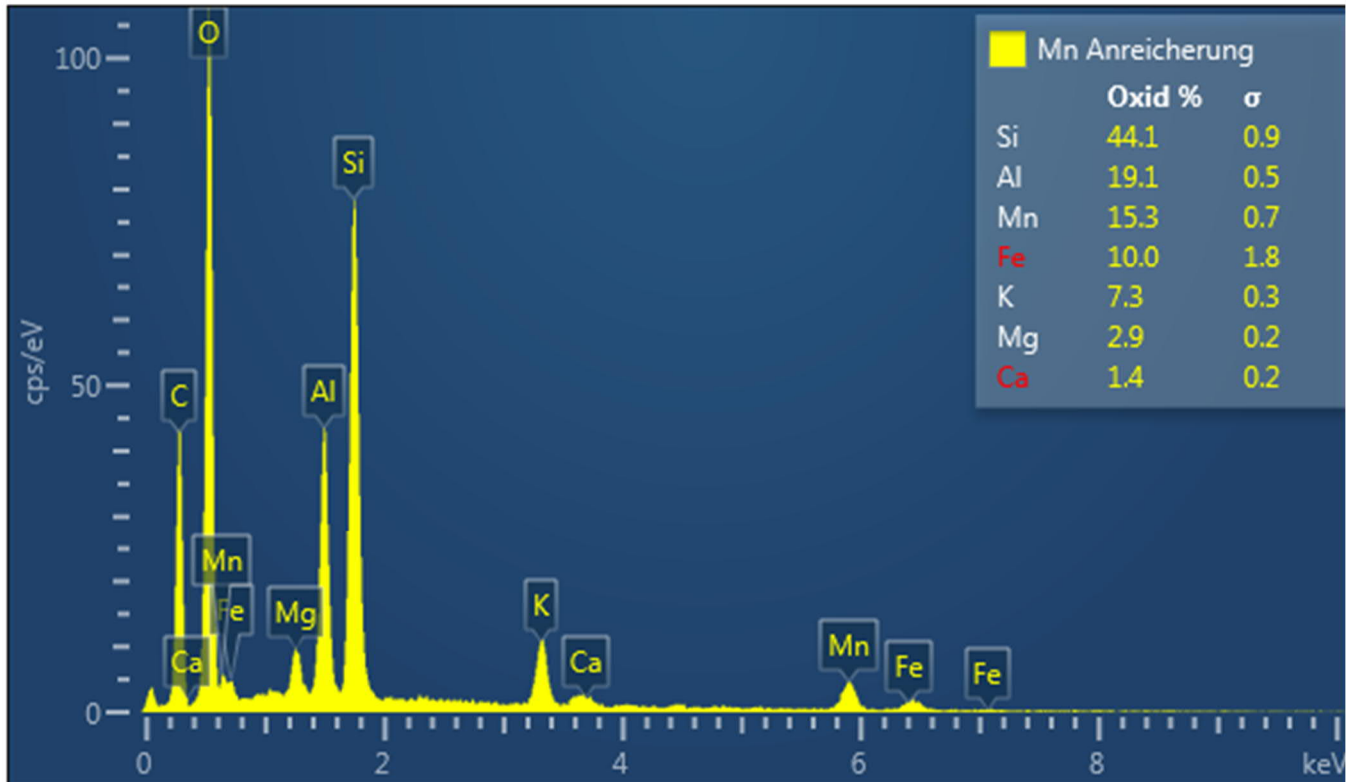


Abbildung 92: Quantitative Elementverteilung des in Abbildung 91 markierten Bereiches innerhalb der Laminarstruktur.

Innerhalb der silikatreichen Matrix finden sich vergleichsweise hohe Konzentrationen an Aluminium und Magnesium, was auf Vorhandensein von Feldspat- und Glimmerbestandteilen bzw. deren tonige Verwitterungsprodukte schließen lässt.

In Auswertung der Untersuchungen ist weiterhin erkennbar, dass auch Manganverbindungen ein Bestandteil sowohl der flaserigen Laminarstrukturen im Gefüge als auch der oberflächennachbildenden Überzüge sind. Diese Verbindungen sind offensichtlich in Gegenwart von Wasser bzw. bei Feuchttransportvorgängen mobil. Möglicherweise handelt es sich dabei um Birnessit und / oder Romanechit. Birnessit ist häufiger

Bestandteil der sogenannten „Wüstenlacke“ und ein Phylломanganat. Es ist mit einer Härte von nur 1,5 (Mohs) sehr weich und wirkt deshalb wie eine Trennschicht im Gefüge, was die zu beobachtenden Rissbildungen entlang dieser Zonen erklären könnte.

4.3 Die Ermittlung materialspezifischer Eigenschaften des Rhyolithtuffes

4.3.1 Untersuchungen zur Ermittlung des Wasseraufnahmeverhaltens

An aus den Rhyolithtuffproben gewonnenen Bohrkernscheiben erfolgten Untersuchungen zur Ermittlung des Wasseraufnahmeverhaltens durch Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN EN ISO 15148 /12/. Dazu wurden vorausgewählte Bohrkernscheiben zuvor in Scheiben gesägt. An diesen seitlich mittels Paraffin abgedichteten Scheiben wurden die Untersuchungen durchgeführt.

Die Proben waren zuvor bei 20 °C und 65 % rH bis zur Ausgleichsfeuchte getrocknet worden.

Die gemessenen Werte der kapillaren Wasseraufnahme sind in nachfolgender Tabelle 4 sowie im Diagramm 1 wiedergegeben.

Tabelle 4: Kapillare Wasseraufnahmekoeffizienten von Proben aus Rhyolithtuff von der Kirche Brotterode und aus dem Steinbruch

Probenbezeichnung	Lokalisierung	Beschreibung	Wasseraufnahmekoeffizient W_w in $\text{kg/m}^2\text{h}^{0,5}$
BR/K/11-1	Kirche Brotterode, Nordfassade, Turmnordanbau, 140 cm ü OKE	Rhyolithtuff rötlich-violett, Bohrkernscheibe Oberfläche (0-4,5 cm), Oberfläche korrodiert, Wasseraufnahme über die Oberfläche	0,19
BR/K/13-1	Kirche Brotterode, Nordfassade, Turmnordanbau, 170 cm ü OKE	Rhyolithtuff rötlich-violett, Bohrkernscheibe Oberfläche (0-4 cm), Oberfläche korrodiert und abschuppend, Wasseraufnahme über die Oberfläche	0,23
BR/K/13-3	Kirche Brotterode, Nordfassade, Turmnordanbau, 170 cm ü OKE	Rhyolithtuff rötlich-violett, Bohrkernscheibe (Entnahmetiefe 7-10 cm), Oberflächen ungeschädigt	0,26
BR/K/14-1	Kirche Brotterode, Nordfassade, Westgiebel, 155 cm ü OKE	Rhyolithtuff grünlich, Bohrkernscheibe Oberfläche (0-4,5 cm), Oberfläche korrodiert, Wasseraufnahme über die Oberfläche	0,18
BR/B/4-1	Steinbruch	Rhyolithtuff grünlich, Bohrkernscheibe Oberfläche (0-2,5 cm), Oberfläche korrodiert, Wasseraufnahme über die Oberfläche	0,18

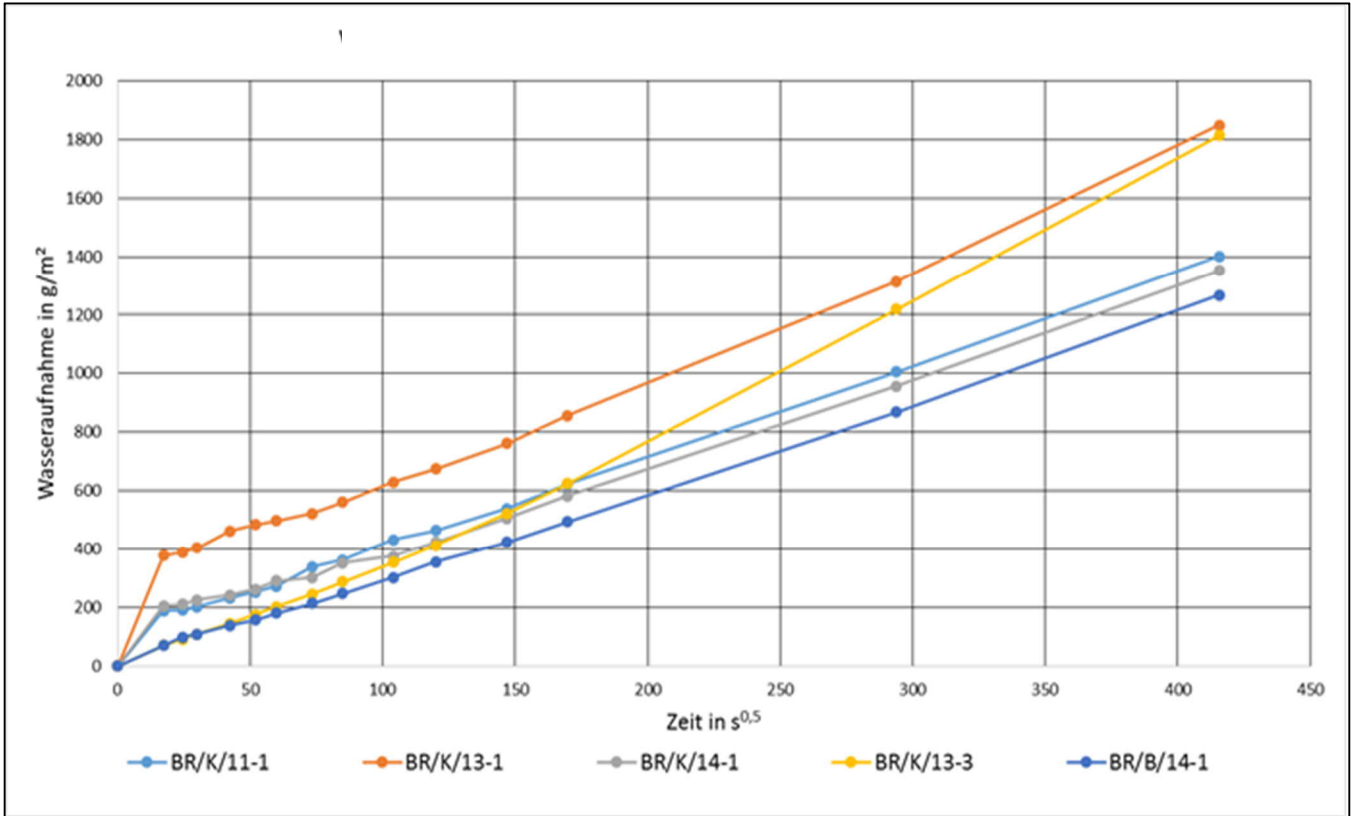


Diagramm 1: Wasseraufnahme ausgewählter Bohrkernscheiben



Abbildung 93: Vorderseite des Bohrkernes BR/K/11



Abbildung 94: Vorderseite des Bohrkernes BR/K/13



Abbildung 95: Vorderseite des Bohrkernes BR/K/14

Die Wasseraufnahmefähigkeit der Materialproben ist vergleichsweise gering. Der Wasseraufnahmekoeffizient der untersuchten Proben entspricht in seiner Größenordnung von etwa 0,18...0,26 kg/m²h^{0,5} etwa den aus der Literatur bekannten Werten des Hessischen Schalsteins (vgl. Tabelle 1).

Die im Diagramm 1 erkennbar stärkere Wasseraufnahme im unmittelbaren Anfangsbereich der Zeitachse bei den Proben BR/K/11-1, BR/K/13-1 und BR/K/14-1 lässt sich durch die korrodierte Oberfläche und deren ungleich höheres Wasseraufnahmevermögen, bedingt durch die ein ausgeprägtes Rissssystem stark gelockerte Gefügestruktur erklären.

4.3.2 Ermittlung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Zur Ermittlung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ wurden Bohrkernscheiben Untersuchungen nach dem Trockenbereichsverfahren nach DIN EN ISO 12572 /10/ unterzogen. Als Sorbens diente Calciumchlorid.

Die ermittelten Werte sind in der nachfolgenden Tabelle 5 wiedergegeben.

Tabelle 5: Wasserdampfdiffusionszahl μ und äquivalente Luftschichtdicke s_d von Rhyolithtuffproben

Probe	Lokalisierung	Beschreibung	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	Wasserdampfdiffusions-äqu. Luftschichtdicke s_d in m
BR/K/14/1	Kirche Brotterode, Nordfassade, Westgiebel, 155 cm ü OKE	Rhyolithtuff grünlich, Bohrkernscheibe Oberfläche (0-4,5 cm), Oberfläche	122	5,8
BR/K/11/1	Kirche Brotterode, Nordfassade, Turmnordanbau, 140 cm ü OKE	Rhyolithtuff rötlich-violett, Bohrkernscheibe Oberfläche (0-4,5 cm), Oberfläche korrodiert	119	4,8
BR/K/11/3	Kirche Brotterode, Nordfassade, Turmnordanbau, 140 cm ü OKE	Rhyolithtuff rötlich-violett, Bohrkernscheibe (7,5-10,5 cm Tiefe	88	2,7
BR/K/13/1	Kirche Brotterode, Nordfassade, Turmnordanbau, 170 cm ü OKE	Rhyolithtuff rötlich-violett, Bohrkernscheibe Oberfläche (0-4 cm), Oberfläche korrodiert und abschuppend	146	6,1

Damit liegen die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen des Brotteroder Rhyolithtuffs deutlich über denen anderer Tuffgesteine (Hilbersdorfer Rhyolithtuff: 12,5; Rochlitzer Rhyolithtuff: 13,3 (/21/, S. 55); Weilmünsterer Schalstein: 26-31 (/22/, S. 32).

4.3.3 Untersuchungen zum thermisch-hygrischen Dehnungsverhalten

An aus Bruchsteinen geschnittenen Prismen (40x40x160 mm³) der rötlich-violetten Rhyolithuffvarietät sowie an von der Fassadenfläche der Kirche entnommenen Oberflächenschalen (ebenfalls rötlich-violett) erfolgten Untersuchungen zum thermisch-hygrischen Dehnungsverhalten. Dafür wurden die Proben jeweils bei 60 % und 90 % rH einer schrittweisen Temperaturerhöhung bis 75 °C ausgesetzt und die dabei entstehenden Längenänderungen ermittelt.

Die Prüfungen erfolgten in der Klimakammer Vötsch VC4100. Die Längenänderungen wurden mit einem kalibrierten Messschieber ermittelt.

Die Längenänderungen gibt die nachfolgende Tabelle 6 wieder:

Tabelle 6: Lineare Längenänderungen von Prüfkörpern bei thermisch-hygrischer Beanspruchung

	Längendehnung in mm/m			
	60 % rH			
	20 °C	40 °C	60 °C	75 °C
Prüfprisma 1	0,00	0,20	0,47	0,62
Prüfprisma 2	0,00	0,22	0,48	0,58
Oberflächenschale	0,00	0,33	0,71	0,90
	90% rH			
	20 °C	40 °C	60 °C	75 °C
	Prüfprisma 1	0,00	0,67	1,07
Prüfprisma 2	0,00	0,66	0,97	1,25
Oberflächenschale	0,00	1,33	1,79	1,94



Abbildung 96: Prismen aus Rhyolithuff zur Bestimmung der thermisch-hygrischen Längenänderungen

Die Ergebnisse korrelieren mit den Ergebnissen von Untersuchungen zur hygrischen Dehnung in /26/, S. 72. Dort wurden nach 24-stündiger Wasserlagerung von zuvor bei 50% rH konditionierten Proben Dehnungen von 1,05 (parallel zur Lagerfläche) bzw. 2,07 mm/m (senkrecht zur Lagerfläche) nachgewiesen.

An der Oberflächenschale erfolgte außerdem eine Messung der thermischen Dehnung mittels eines faseroptischen Sensorsystems (FOS). Für die faseroptischen Messungen wurde ein kohärentes Frequenzbereichsreflektometer (ODFR) vom Typ „ODiSI B“ (Polytec GmbH) genutzt.

In der nachfolgenden Tabelle 7 sind die Messdaten wiedergegeben.

Tabelle 7: Lineare Längenänderungen bei thermischer Beanspruchung (Oberflächenschale, FOS)

	Längendehnung in mm/m			
	21 °C	40°C	60°C	80,00
Oberflächenschale	0,00	0,90	1,12	1,24

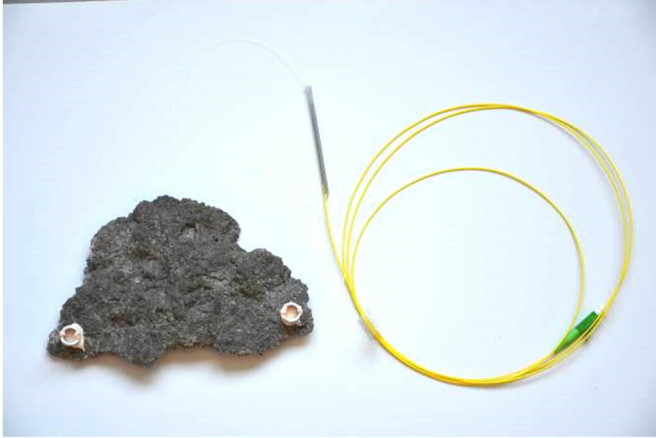


Abbildung 97: Oberflächenschale mit fixierter Glasfaser



Abbildung 98: Screenshot der Auswertesoftware Luna Technologies

4.3.4 Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten

An Bohrkernproben von Rhyolithtuffmaterial wurden die achsabhängigen Ultraschallgeschwindigkeiten ermittelt. Die Messungen erfolgten mit dem Ultraschallgerät Geotron USG20 und dem Scopemeter Fluke 192b, Geberfrequenz 20 kHz, in verschiedenen Achsen.

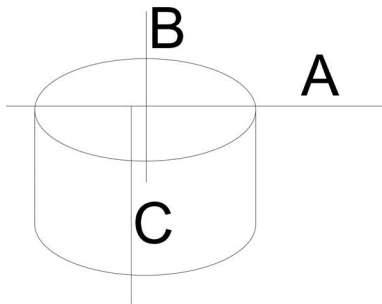


Abbildung 99: Lokalisierung der Messachsen für die Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeiten

Tabelle 8: Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeiten an verschiedenen Rhyolithuffproben

Probe	Lokalisierung	Beschreibung	Abst. v.d. OfI. (bei A und B) in cm	US-Geschwindigkeit in Messrichtung in km/s (Mittel aus 2 Messungen)		
				A	B	C
BR/K/13-2	Kirche, Nordfassade, Werksteinmauerwerk Turmnordanbau, 170 cm ü OKE, Bohrkernscheibe aus 5-7 cm Tiefe des Bohrkernes	rötlich-violette Steinvarietät	6,0	3,71	3,76	3,83
BR/K/13-4	wie BR/K/13-2, Bohrkernscheibe aus 11-13 cm Tiefe des Bohrkernes	rötlich-violette Steinvarietät	12,0	3,84	3,62	3,29
BR/K/13-5	wie BR/K/13-2, Bohrkernscheibe aus 14-17 cm Tiefe des Bohrkernes	rötlich-violette Steinvarietät	15,0	3,84	3,62	3,29
BR/K/13-6	wie BR/K/13-2, Bohrkernscheibe aus 17-28 cm Tiefe des Bohrkernes	rötlich-violette Steinvarietät	18,0	3,84	3,62	3,29
BR/K/13-6	wie BR/K/13-2, Bohrkernscheibe aus 17-28 cm Tiefe des Bohrkernes	rötlich-violette Steinvarietät	23,0	3,65	3,91	3,06
BR/K/14-2	Kirche, Nordfassade, Westgiebel Kirchenschiff, 155 cm ü OKE, Bohrkernscheibe aus 4,5-7,5 cm Tiefe des Bohrkernes	grünliche Steinvarietät	6,0	3,85	3,32	3,73
BR/K/14-4	wie BR/K/14-2, Bohrkernscheibe aus 10,5-13,5 cm Tiefe des Bohrkernes	grünliche Steinvarietät	12,0	3,22	3,84	3,99
BR/K/14-5	wie BR/K/14-2, Bohrkernscheibe aus 13,5-24 cm Tiefe des Bohrkernes	grünliche Steinvarietät	19,0	3,19	3,94	3,86
BR/K/16	Kirche, Werksteinmauerwerk Sockel, Südfassade, 75 cm ü OKE, Bohrkernlänge 29 cm, Bohrkern in 2 Teile zerbr.	rötlich-violette Steinvarietät	1,0	3,45		1,92
			3,0	3,51	3,84	
			9,0	3,65	3,88	
			17,0	3,69	3,89	2,98
			22,0	3,76	3,99	
Bohrkern	Bohrkern aus Bruch, unbezeichnet, rötlich, bei 10 cm Tiefe Rissbildungen		5,0	3,76	3,18	
			10,0	2,63		

Eine Achsabhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeiten konnte nur bei den Scheiben der Bohrkernprobe BR/K/13 festgestellt werden. Die Geschwindigkeit in der Bohrkernachse lag etwa 10% unter der der senkrecht dazu gemessenen Geschwindigkeiten.

Die Bohrkernprobe BR/K/16 zeigte bei Messung parallel zur Oberfläche einen geringen Anstieg der Ultraschallgeschwindigkeiten ab Oberfläche Tiefenrichtung. Es ist zu vermuten, dass dies mit einer Auflockerung der Oberflächenzone und damit einhergehender Verringerung der Ultraschallgeschwindigkeit in Zusammenhang steht. Die Probe ist durch oberflächenparallele Rissbildung gekennzeichnet. Der Stein wurde demnach senkrecht zur „Lagerrichtung“ verbaut.

Wie erwartet starke Auswirkungen auf die Ultraschallgeschwindigkeit haben Risse im Gesteinsmaterial. Dies wird besonders deutlich an der geringen gemessenen Geschwindigkeit einer Probe aus dem Steinbruch, die durch starke innere Rissbildung gekennzeichnet ist (Bohrkern, unbezeichnet) sowie der bereits erwähnten Probe BR/K/16. Die geringen Ultraschallgeschwindigkeiten in Achsrichtung des Bohrkernes liegen mit großer Wahrscheinlichkeit in den zumeist senkrecht zur Messachse verlaufenden Rissen im Stein begründet.

4.4 Untersuchungen zum Bestand und zur Belastungssituation der Verfugmörtel

Das aufgehende Mauerwerk ist mit einem sehr harten zementhaltigen Mörtel verfugt worden. Offensichtlich handelt es sich dabei noch um den ursprünglichen Mörtel. Die Mörteloberfläche war mit einem Fugeneisen o.ä. geglättet und bündig zu den angrenzenden Steinflanken abgezogen worden. Fehlstellen in den Steinflanken wurden mit dem Mörtel beim Verfugen geschlossen.

Der Mörtel besitzt eine graubraune Färbung, etwas heller als die violettgraue Varietät des Rhyolithtuffes. Durch Löse- und Transportprozesse erscheint seine Oberfläche im angewitterten Zustand allerdings gelblich. Gleichzeitig ist durch Abwitterung die Mörteloberfläche angeraut.

Für den Verfugmörtel wurden als Gesteinskörnungen vorwiegend gerundete Sande, überwiegend Quarzkörnungen eingesetzt.

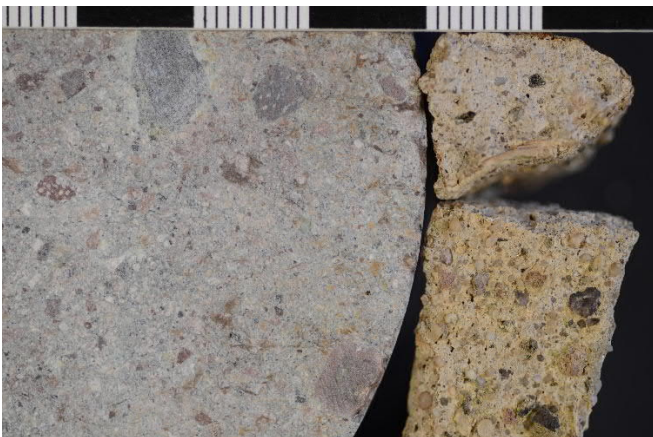


Abbildung 100: Vergleich zwischen dem verbauten Rhyolithtuff (Bohrkernscheibe, rötliche Varietät, im Bild links) und dem Verfugmörtel (oben Bruchfläche, unten gelblich verfärbte Oberfläche).



Abbildung 101: Anschliffprobe einer Verfugmörtelprobe (Mikroskopaufnahme) mit dichter Matrix des Mörtels. Die Oberflächenzone (oben) ist erkennbar zweilagig: Oberflächlich ist eine dunkle, ca. 0,2...0,3 mm starke, vermutlich gipshaltige Schicht erkennbar, darunter eine etwas stärkere gelblich verfärbte Zone.

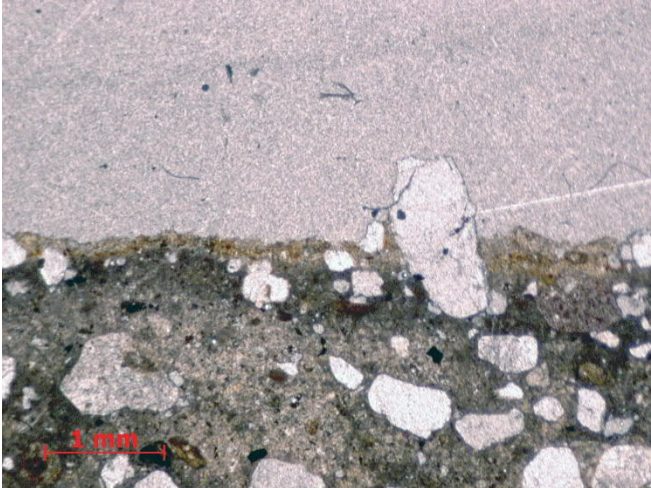


Abbildung 102: Dünnschliff einer Verfugmörtelprobe (Mikroskopaufnahme): Die rückgewitterte Oberflächenzone des Mörtels ist gelb gefärbt.

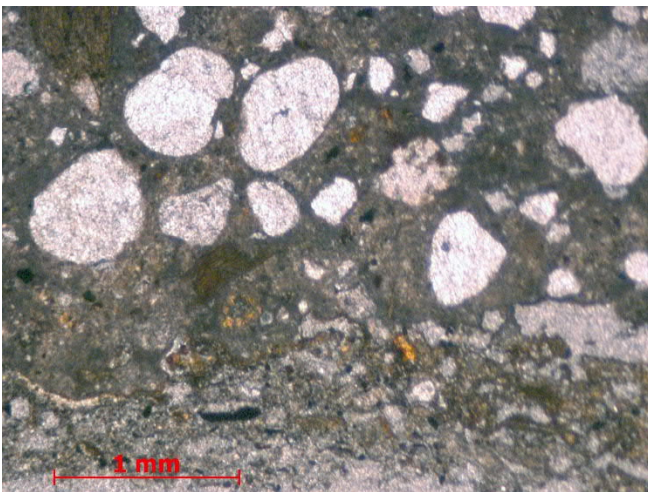


Abbildung 103: Dünnschliff einer Verfugmörtelprobe (Mikroskopaufnahme): Unten im Bild ist angrenzendes Rhyolithuffmaterial sichtbar. Gut zu erkennen sind die hellen Gesteinskörnungen des Mörtels.

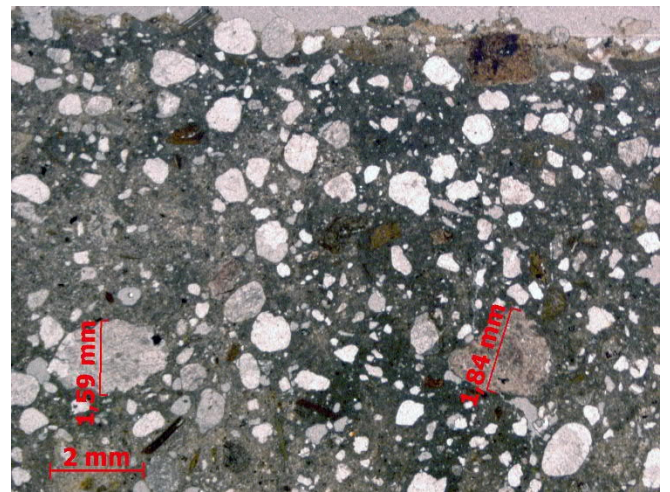


Abbildung 104: Dünnschliff einer Verfugmörtelprobe (Mikroskopaufnahme): Die hellen Gesteinskörnungen sind überwiegend feiner, die bunten Einzelkörner erreichen Größen bis ca. 2 mm Siebdurchgang.

Zur Feststellung von Größenordnung und Verteilung löslicher Salze im Fugensystem des Fassadenmauerwerks wurden Bohrmehlproben gewonnen. Die Probenahmebereiche sind in Abbildung 105 - Abbildung 109 wiedergegeben.

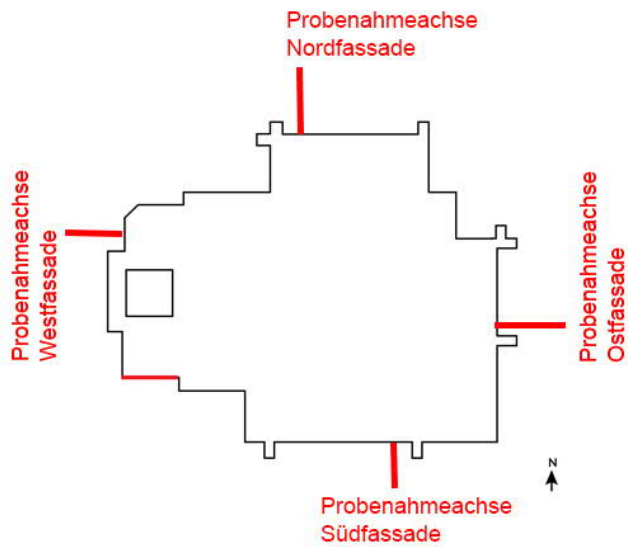


Abbildung 105: Probenahmeachsen für die Entnahme der Bohrmehlproben (Grundrisssskizze: Planungsbüro für Steinkonservierung in der Denkmalpflege)

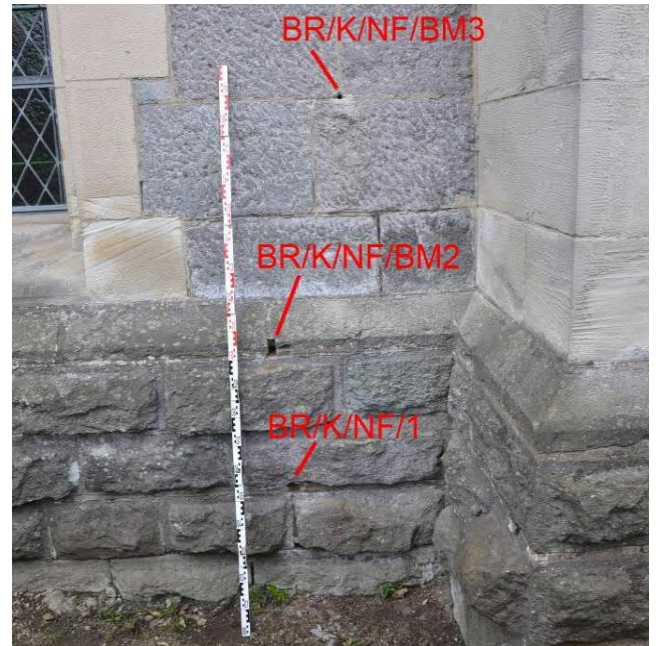


Abbildung 106: Probenahmestellen an der Nordfassade



Abbildung 107: Probenahmestellen an der Ostfassade



Abbildung 108: Probenahmestellen an der Südfassade (Ausschnitt Messbild Planungsbüro für Steinrestaurierung in der Denkmalpflege)

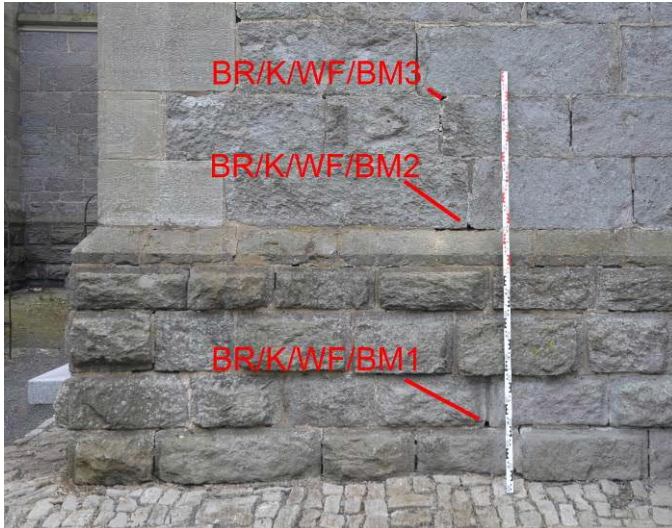


Abbildung 109: Probenahmestellen an der Westfassade

Angaben zur Charakterisierung der Probenahmebereiche enthält Tabelle 9.

Tabelle 9: Charakteristik der Probenahmebereiche

Probenbezeichnung	Entnahmeort	Entnahnehöhe	Entnahmetiefe	Beschreibung	Anmerkungen
BR/K/NF/BM1.1	Nordfassade	45 cm ü OKE	0-2 cm	Fugendeckmörtel, sehr hart, vmtl. zementgebunden	Stückprobe
BR/K/NF/BM1.2	Nordfassade	45 cm ü OKE	2-7 cm	Fugenmörtel, KM, sehr nass	Bohrmehlprobe
BR/K/NF/BM1.3	Nordfassade	45 cm ü OKE	10-12 cm	Fugenmörtel, KM, sehr nass	Bohrmehlprobe
BR/K/NF/BM2.1	Nordfassade	100 cm ü OKE	0-2 cm	Fugendeckmörtel, sehr hart, vmtl. zementgebunden	Stückprobe
BR/K/NF/BM2.2	Nordfassade	100 cm ü OKE	2-5 cm	Fugenmörtel, KM, sehr entfestigt, sehr feucht	Lockermaterial
BR/K/NF/BM2.3	Nordfassade	100 cm ü OKE	10-15 cm	Fugenmörtel, KM, entfestigt, lehmig, feucht	Lockermaterial
BR/K/NF/BM3.1	Nordfassade	185 cm ü OKE	0-1 cm	Fugendeckmörtel, sehr hart, vmtl. zementgebunden	Stückprobe
BR/K/NF/BM3.2	Nordfassade	185 cm ü OKE	2-7 cm	Fugenmörtel, KM, relativ trocken	Bohrmehlprobe
BR/K/NF/BM3.3	Nordfassade	185 cm ü OKE	10-15 cm	Fugenmörtel, KM, relativ trocken	Bohrmehlprobe
BR/K/OF/BM1.2	Ostfassade	40 cm ü OKE	5-10 cm	Fugenmörtel, vmtl. kalkgebunden, sehr entfestigtes Material, Fuge im tieferen Bereich teilweise offen	Lockermaterial
BR/K/OF/BM2.1	Ostfassade	130 cm ü OKE	0-2 cm	Fugendeckmörtel, sehr hart, vmtl. zementgebunden	Stückprobe
BR/K/OF/BM2.2	Ostfassade	130 cm ü OKE	2-8 cm	Fugenmörtel, KM, sehr entfestigt, fast Erde	Lockermaterial
BR/K/OF/BM2.3	Ostfassade	130 cm ü OKE	10-15 cm	Fugenmörtel, KM, sehr entfestigt, fast Erde	Lockermaterial
BR/K/OF/BM3.1	Ostfassade	190 cm ü OKE	0-2 cm	Fugendeckmörtel, sehr hart, vmtl. zementgebunden, löst sich vom Untergrund	Stückprobe
BR/K/OF/BM3.2	Ostfassade	190 cm ü OKE	2-6 cm	Fugenmörtel, KM, sehr weich	Bohrmehlprobe
BR/K/OF/BM3.3	Ostfassade	190 cm ü OKE	10-15 cm	Fugenmörtel, KM, sehr weich	Bohrmehlprobe
BR/K/SF/BM1.1	Südfassade	20 cm ü OKE	0-2 cm	Fugendeckmörtel, sehr hart, vmtl. zementgebunden	Stückprobe
BR/K/SF/BM1.2	Südfassade	20 cm ü OKE	8-13 cm	Erde!	Lockermaterial
BR/K/SF/BM2.1	Südfassade	93 cm ü OKE	0-2 cm	Fugendeckmörtel, sehr hart, vmtl. zementgebunden	Stückprobe
BR/K/SF/BM2.2	Südfassade	93 cm ü OKE	2-3 cm	Fugenmörtel, KM, sehr entfestigt	Bohrmehlprobe
BR/K/SF/BM2.3	Südfassade	93 cm ü OKE	8-13 cm	Fugenmörtel, KM, sehr entfestigt	Bohrmehlprobe
BR/K/SF/BM3.1	Südfassade	168 cm ü OKE	0-2 cm	Fugendeckmörtel, sehr hart, vmtl. zementgebunden	Stückprobe
BR/K/SF/BM3.2	Südfassade	168 cm ü OKE	5-10 cm	Fugenmörtel, KM, etwas fester	Bohrmehlprobe
BR/K/SF/BM3.3	Südfassade	168 cm ü OKE	10-15 cm	Fugenmörtel, KM, etwas fester	Bohrmehlprobe
BR/K/OF/BM1.1	Ostfassade	40 cm ü OKE	0-2 cm	Fugendeckmörtel, sehr hart, vmtl. zementgebunden	Stückprobe
BR/K/WF/BM1.1	Westfassade	25 cm ü OKE	0-2 cm	Fugendeckmörtel, sehr hart, vmtl. zementgebunden, offene Fuge	Stückprobe
BR/K/WF/BM1.2	Westfassade	25 cm ü OKE	2-5 cm	Erde!	Bohrmehlprobe
BR/K/WF/BM1.3	Westfassade	25 cm ü OKE	10-15 cm	Fugenmörtel, KM, entfestigt	Bohrmehlprobe
BR/K/WF/BM2.1	Westfassade	120 cm ü OKE	0-2 cm	Fugendeckmörtel, sehr hart, vmtl. zementgebunden	Stückprobe
BR/K/WF/BM2.2	Westfassade	120 cm ü OKE	2-5 cm	Fugenmörtel, KM, sehr entfestigt, sehr feucht	Lockermaterial
BR/K/WF/BM2.3	Westfassade	120 cm ü OKE	10-15 cm	Fugenmörtel, KM, sehr entfestigt, sehr feucht	Lockermaterial
BR/K/WF/BM3.1	Westfassade	180 cm ü OKE	0-2 cm	Fugendeckmörtel, sehr hart, vmtl. zementgebunden	Stückprobe
BR/K/WF/BM3.2	Westfassade	180 cm ü OKE	2-10 cm	Fugenmörtel, KM, Fuge dahinter offen	Bohrmehlprobe

Um erste Aussagen zu Salzgehalten zu erhalten, wurden elektrochemische Messungen in Eluaten aus den Proben durchgeführt.

Als Maß für die Größenordnung von Gehalten an löslichen Salzen in den Proben kann die elektrische Leitfähigkeit im Eluat verwendet werden. Die elektrische Leitfähigkeit korreliert mit der Summe der Ladungsträger in der Lösung.

Hohe elektrische Leitfähigkeiten entstehen aber auch in Eluaten mit hohen pH-Werten. Deshalb wurden die pH-Werte ebenfalls gemessen. Sehr hohe pH-Werte in den Eluaten signalisieren z. B. das Vorhandensein von zementhaltigen Mörteln oder noch nicht oder unvollständig carbonatisierten Kalkmörteln.

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse der elektrochemischen Messungen in Eluaten geben Hinweise auf mögliche Belastungen mit wasserlöslichen Salzen in den untersuchten Profilen an.

In den nachfolgenden Tabellen sind die pH-Werte und die elektrischen Leitfähigkeiten in den Eluaten aus den Materialproben über den mittleren Entnahmetiefen der Proben für die hier untersuchten Probenahmestellen dargestellt. Berechnet wird die „mittlere Tiefe“ als arithmetischer Mittelwert aus der minimalen und maximalen Tiefe der Probenahme für die jeweilige Teilprobe.

Mit hohen Salzbelastungen muss, unter den hier gewählten Aufschlussbedingungen, ab etwa 0,3 mS/cm und mit extrem hohen Belastungen ab etwa 0,5 mS/cm gerechnet werden.

Zur Eluatherstellung sind die bei 105°C getrockneten und < 125 µm aufgemahlene Mörtelproben mit der 20fachen Menge destillierten Wassers versetzt worden. Die Eluationsdauer betrug 24 Stunden. Während dieser Zeit wurden die Proben mehrfach aufgeschüttelt.

Nach 24 Stunden sind zur Abschätzung der Größenordnung möglicher Salzbelastungen zunächst der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit bei 25°C im Eluat gemessen worden.

Anschließend wurden in einer repräsentativen Probenauswahl Chlorid, Sulfat und Nitrat mit Anionen-Chromatographie bestimmt und Calcium, Magnesium, Natrium sowie Kalium mittels ICP-OES.

Folgende Untersuchungsverfahren kamen zur Anwendung:

- Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser – DIN 38414-4:1984-10 (in Anlehnung)
- Bestimmung des pH-Wertes – DIN 38404-5:2009-07
- Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit – DIN EN 27888:1993-11
- Bestimmung der gelösten Anionen mittels IC – DIN EN ISO 10304-1:2009-07
- Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektroskopie (ICP-OES) – DIN EN ISO 11885:2009-09

Tabelle 10: pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit (LF) in Eluaten aus Mörtelproben sowie wasserlösliche An- und Kationen (in M.-%) [Belastungsstufe nach Tabelle 11]

Probe	pH-Wert	LF mS/cm	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
			Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%
BR/K/NF/BM1.1	11,51	2,32	0,220	1,317	0,073	0,032	0,019	1,107	0,002
BR/K/NF/BM1.2	10,43	1,17							
BR/K/NF/BM1.3	9,67	1,02	0,020	0,105	1,020	0,044	0,034	0,527	0,005
BR/K/NF/BM2.1	11,73	1,62							
BR/K/NF/BM2.2	9,18	0,28							
BR/K/NF/BM2.3	8,93	0,18	0,003	0,004	0,062	0,032	0,025	0,057	0,030
BR/K/NF/BM3.1	8,71	1,92							
BR/K/NF/BM3.2	8,89	0,59							
BR/K/NF/BM3.3	9,29	0,67	0,007	0,030	0,393	0,029	0,025	0,044	0,272
BR/K/OF/BM1.1	11,15	1,91	0,188	1,192	0,150	0,023	0,021	0,837	0,003
BR/K/OF/BM1.2	8,85	0,76	0,012	0,051	0,674	0,030	0,029	0,301	0,012
BR/K/OF/BM2.1	11,54	1,30							
BR/K/OF/BM2.2	9,04	0,21							
BR/K/OF/BM2.3	8,85	0,16							
BR/K/OF/BM3.1	11,31	1,02							
BR/K/OF/BM3.2	10,32	0,58							
BR/K/OF/BM3.3	8,64	0,53							
BR/K/SF/BM1.1	11,23	2,02							
BR/K/SF/BM1.2	8,88	0,35							
BR/K/SF/BM2.1	11,42	1,40							
BR/K/SF/BM2.2	9,13	0,39							
BR/K/SF/BM2.3	8,84	0,35							
BR/K/SF/BM3.1	9,10	1,47							
BR/K/SF/BM3.2	8,86	0,42							
BR/K/SF/BM3.3	8,97	0,34							
BR/K/WF/BM1.1	11,14	2,12							
BR/K/WF/BM1.2	8,85	0,28							
BR/K/WF/BM1.3	8,83	0,18							
BR/K/WF/BM2.1	12,25	5,36	0,033	0,334	0,094	0,023	0,011	1,822	0,001
BR/K/WF/BM2.2	9,81	0,52							
BR/K/WF/BM2.3	8,50	0,51	0,005	0,008	0,402	0,023	0,017	0,168	0,015
BR/K/WF/BM3.1	9,65	0,18							
BR/K/WF/BM3.2	8,42	0,55							

Tabelle 11: Belastungsstufen mit bauschädlichen Salzen - hier auf lösliche Anionen bezogen (nach: C. Arendt & J. Seele: „Feuchte und schädliche Salze in Gebäuden“, Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinfelden-Echterdingen, 2000)

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

5 Überlegungen zu den Ursachen der Schädigungen und Erarbeitung einer Instandsetzungskonzeption für den Rhyolithtuff

5.1 Verwitterungsverhalten des Rhyolithtuffes

Rhyolithtuff ist durch den Auswurf vulkanischer Aschen entstanden. Im Gegensatz zum „Rhyolith“, welcher durch langsames Erhärten von Laven und Magma entsteht, ist Rhyolithtuff einem schnellen Erkaltungsprozess unterworfen. Im Rhyolithtuff finden sich – wie im Rhyolith – Quarze und Feldspäte aus mitgerissem Material, welche in einer Grundmasse aus kaum kristallisierten bzw. glasartigen Aschen eingebettet sind. Diese bilden eine Gesteinsmatrix, die – wie beim Brotteröder Rhyolithtuff – sehr dicht, aber auch stark porös sein kann.

Abgelagerte vulkanische Aschen sind unter atmosphärischen Bedingungen wenig stabil. Sie müssen einen Umwandlungs- und Verfestigungsprozess durchlaufen, in dem die Aschen in Tonminerale (Illit, Chlorit, Smektit) umgewandelt werden. Weitere Minerale können durch Diagenese und Verwitterung entstehen. Die Tonminerale bestimmen das Farbspektrum des Rhyolithtuffes, welches von grün, rot bis violett reicht. Darin eingelagert sind die comagmatischen Komponenten wie Bimsstein, Lavafragmente, Quarz- und Feldspatkristalle.

Vermutlich aufgrund der schnellen Abkühlung der Aschen entstehen im erkalteten Gesteinsmaterial entlang von Vorzugsstrukturen im Gefüge Schwächezonen, die sich zu Rissen öffnen. Aufgrund der Genese des Rhyolithtuffes besitzt das Material eine Gefügetextur, die einen schichtigen, eingeregelteten Rissverlauf induziert.

Die Risse werden durch Löse- und Transportprozesse mit mobilen, löslichen Mineralbestandteilen verfüllt, stellen aber weiterhin eine Schwachstelle im Gefüge dar. Deutlich sind diese Laminarstrukturen im Gefüge aufgrund ihrer Dunkelfärbung erkennbar. Sie sind zwischen 0,05 bis 0,4 mm breit.

Die Rissstrukturen bestehen offensichtlich teilweise aus quellfähigen Tonmineralien, durch Löse- und Transportprozesse in Verbindung mit Wasser, angereichert mit Schwermineralien, ggf. auch unter Beteiligung von Mikroorganismen.

Auffallend ist, dass der Rhyolithtuff an der bewitterten Oberfläche ein charakteristisches Verwitterungsbild entwickelt: Entsprechend der Einbaulage der deutlich geschichteten Steine bilden sich mehrlagige Schalen bis in Dezimetergröße oder abgeflachte Schuppen. Beiden Korrosionsformen ist gemein, dass diese durch sich öffnende Risse im Gefüge induziert werden. Die Spalten entstehen wiederum in den dunklen Laminarstrukturen, die sich somit als Schwächezonen darstellen. Die Laminarstrukturen unterliegen durch Quellprozesse bei stärkerem Zutritt von Feuchte und nachfolgender Trocknung wiederholter Quellung und Kontraktion und reißen schließlich auf. Dabei entstehen Schalen und Ablätterungen entsprechend des Verlaufes der Gefügestrukturen zur Verwitterungsoberfläche.

Dieser Vorgang verläuft nahezu ausschließlich in der obersten oberflächenparallelen Gesteinsschicht, etwa bis 3...10 mm unter die Oberfläche reichend und parallel mit der Verwitterungsfront in das Gesteinsinnere vordringend.

Aufgrund der erwähnten Löse- und Transportprozesse erfolgt offensichtlich auch eine Umlagerung von Schwermetallen im Steingefüge. Diese reichern sich auf den die Rissflanken bildenden Steinoberflächen innerhalb der Verwitterungszone an und bilden die beobachteten signifikanten dunklen, gefügenachbildenden Überzüge. Der Nachweis von Eisen und Mangan in diesen Bereichen konnte mittels LA-ICP-MS sowie Mikro-RFA geführt werden (s. unter 0).

5.2 Entwicklung einer Konservierungsmethodik

Ausgehend von den gesteintechnischen Eigenschaften und vom Verwitterungsverhalten des Rhyolithtuffes waren folgende Grundüberlegungen hinsichtlich der konservatorischen Vorgehensweise maßgebend:

- Die Verwitterung des Rhyolithtuffes erfolgt unter Anwesenheit von Wasser. Das Material besitzt eine erhöhte Porosität durch die nachgewiesene Gefügebrauchlockung im Oberflächenbereich entlang der Laminarstrukturen. Es müssen geeignete Maßnahmen getroffen werden, die Wasseraufnahmefähigkeit des Rhyolithtuffes zu reduzieren.
- Die Wasseraufnahme des verbauten Materials wird nicht vollständig zu verhindern sein. Wasser wird auch künftig bspw. über das Fugensystem in die Fassade eingebracht werden. Konservatorische Maßnahmen müssen deshalb auch der Möglichkeit eines gerichteten Feuchtestromes zur Oberfläche hin, der zur Trocknung des Materials führt, Rechnung tragen. Die Ausbildung einer wasserabweisenden, hydrophob wirkenden Oberflächenschicht darf nicht erfolgen.
- Rissbildungen im Oberflächenbereich führen zu Schalenbildungen. Schalen können sich lösen und, wenn sie aus großer Höhe herabfallen, Personen gefährden. Aus diesem Grund müssen lokale Anbindungen gefährdeter Bereiche realisiert werden können. Das Anbinden muss mit einem Material erfolgen, welches auch in der Lage ist, die offenen Spalten und Risse zu überbrücken. Es ist eine Kombination aus Festigungen und Klebungen durch Einsatz eines geeigneten Klebharzes anzustreben.
- Es wird nicht möglich sein, sämtliche Abschalungen bzw. Abblätterungen im Oberflächenbereich wieder an den Untergrund anzubinden. Hier ist die Möglichkeit einer Entfernung dieser nicht konservierbaren Oberflächenschichten vorzusehen und zu optimieren.
- Die gestalterische Wirkung der steinsichtigen Fassade, die durch die verbauten unterschiedlichen Steinvarietäten in von leuchtend Blaugrün zu Altrosa / Caput-Mortuumfarben changiert, darf durch die konservatorischen Maßnahmen nicht wesentlich beeinträchtigt werden.

In Berücksichtigung dieser Anforderungen wurde in Abstimmung und im Einvernehmen mit dem Bauherrn, den Denkmalbehörden und dem beteiligten Restaurator folgende konservatorische Vorgehensweise vorgeschlagen:

- Reinigung der Oberflächen mit einem abrasiv wirkenden trockenen Reinigungssystem (Trockenstrahlverfahren).
- Lokale Festigungen mit einem speziellen modifizierten Klebharz
- Reduzierung der Wasseraufnahme der angewitterten Steinoberflächen durch Aufbringen einer speziell eingestellten Schlämme. Die Schlämme hat weiterhin die Aufgabe, den geschwächten Gefügeverband unmittelbar an der Oberfläche zu stabilisieren. Gleichzeitig muss diese Schlämme in ihrer Struktur dem Duktus des Steinmaterials angepasst sein.
- Starke Formverluste müssen durch geeignete Restauriermörtel ergänzt werden. Der Einsatz von Vierungen soll möglichst gering gehalten werden. Die Restauriermörtel müssen den Eigenschaften sowohl des Steinmaterials als auch der Schlämme angepasst werden.

Die zu entwickelnden Konservierungsmethoden müssen durch Restaurierungsfirmen am Bauwerk umsetzbar sein, d.h., der Gesichtspunkt einer Praxisrelevanz ist hier wesentlich.

6 Entwicklung von Materialien im Labormaßstab

6.1 Festigungs- und Klebemittel auf Basis von EP-Harzen

In der Steinkonservierung bewährte Festigungsmittel, wie Kieselsäureester, versagen bei der vorliegenden Problemstellung einer festigenden Klebung der durch Risse geschädigten Oberflächenzone des Rhyolithuffes, da sie von ihrem Reaktionsmechanismus her nicht in der Lage sind, diese Rissbreiten zu überbrücken. Hierzu sind jedoch spezielle Reaktionsharze in der Lage.

Der Vorteil von Epoxidharzen liegt – neben einer vergleichsweise einfachen Anwendbarkeit – in den Variationsmöglichkeiten bezüglich Reaktionszeit, Viskosität, einer hohen Klebekraft, auch bei starker Verdünnung und dem sehr guten Penetrationsvermögen. Es handelt sich dabei im Hinblick auf Material und Technologie um ein ausgereiftes und auch in der Natursteinkonservierung bewährtes System.

Der bestehende Nachteil einer geringeren UV-Stabilität bzw. Vergilbungsneigung ist dagegen für den angestrebten Anwendungsfall weniger relevant.

Es wurden verschiedene Epoxidharze des Herstellers WEBAC-Chemie GmbH (Fahrenberg 22, 22885 Barsbüttel/Hamburg) hinsichtlich ihrer materialtechnischen und Verarbeitungseigenschaften getestet. Die untersuchten Epoxidharzprodukte und eine Auswahl ihrer materialtechnischen Eigenschaften sind in der nachfolgenden Tabelle 12 wiedergegeben.

Tabelle 12: Materialtechnische Eigenschaften der untersuchten Epoxidharze
(Datenblätter der Produkte s. ANLAGE II)

Produkt	Zugfestigkeit 7d, 21°C (ISO 527) in N/mm ²	Reißdehnung (47d, 21°C, ISO 527) in %	Mischviskosität bei 12 °C (angelehnt an ISO 3219) in mPas	Verarbeitungszeit bei 12°C (angelehnt an ISO 9514) in min
webac 4180 N	1,8	20	55	110
webac 4170	17	6	220	85
webac 4120P	40	1,6	450	100

Von den in Tabelle 12 aufgeführten Epoxidharzen wurden Zugfestigkeit und Reißdehnung geprüft (Universalprüfmaschine Z100). Dafür wurden Prüfkörper mit Querschnitten von ca. 5x10 mm² hergestellt. Die Prüfung der Zugfestigkeit erfolgte an 10 - 30 Tage alten Proben.

Darüber hinaus erfolgten Untersuchungen zur Charakterisierung der Haft- und Abrisseigenschaften von Epoxidharz in Verbindung zu Naturstein. Dafür wurden Natursteinprismen (Oberdorlaer Muschelkalk, 50x50x30 mm³) hergestellt und in den Spalt zwischen jeweils zwei dieser Prismen Epoxidharz (rein und mit Cristobalitsand 0,3-0,9 mm versetzt) gegossen. Die Ergebnisse der Haftzugprüfungen an den Verbundkörpern sind in Tabelle 14 wiedergegeben.



Abbildung 110: Prüfkörper für Zugversuche aus Epoxidharz webac 4180 N



Abbildung 111: Prüfkörper zur Bestimmung der Haftzugfestigkeit an Naturstein (Quader 50x50x30 cm aus Oberdorlaer Muschelkalk)

Tabelle 13: Ergebnisse der Prüfung der Zugfestigkeit und Reißdehnung ausgewählter Epoxidharze

Produkt	Probenalter in Tagen	Zugfestigkeit in N/mm ²	Standardabweichung der Zugfestigkeit in N/mm ²	Reißdehnung in %
webac 4180 lv	30	1,7	0,1	67
webac 4180 N	30	1,4	0,4	58
webac 4170	20	30,5	2,1	30
webac 4120P	10	11,3	3,6	7,65

Arithmetisches Mittel aus jeweils 4 Probekörpern

Tabelle 14: Ergebnisse der Prüfung der Haftzugfestigkeit von Epoxidharz-Verbundkörpern

Versuchsanordnung	Spaltbreite	Anzahl der Proben	Mittelwert Haftzugfestigkeit in N/mm ²
Kalksteinprismen, dazwischen vollflächiger Verguss von webac 4170	0,5 mm	2	1,68
Kalksteinprismen, dazwischen vollflächig webac 4170, versetzt mit Cristobalitsand 0,3-0,9 mm	5 mm	3	1,53

Eine gezielte Beeinflussung der Viskosität des Epoxidharzes konnte durch Zugabe eines Verdickers erzielt werden. Dies war wichtig, um die Fließeigenschaften des Harzes für Klebungen und Hinterfüllungen von Schalen einstellen zu können. Verwendet wurde dafür das Epoxidharz webac 4170 (Mischviskosität lt. Herstellerangaben 95 mPas bei 23 °C) und ein werkseitig vorgesehener Verdicker (webac ST300 auf Basis pyrogener Kieselsäure). Bei Mischungsreihen zeigte sich, dass eine Zugabe von 4 M-% ST300 ein für die Verarbeitbarkeit und das Fließverhalten geltendes Optimum darstellt.

Auf Dünnschliffen von Querschnitten geschädigter Rhyolithuffmaterialien war erkennbar, dass ein sich in Richtung Oberfläche hin verstärkendes Rissssystem Ursache für die verwitterungstypischen Abschuppungen und Abschaltungen ist. Die Risse sind im Material bereits angelegt und stellen Schwächezonen im Gefüge dar. Bestünde die Möglichkeit, diese feinen Risse zu schließen, so wäre dies für die Untergrundkonsolidierung vor einem Schlämmenauftrag günstig. Aus diesem Grund wurden Testreihen mit Epoxidharz webac 4180 (welches ohnehin die niedrigste Viskosität aller im Rahmen des Forschungsprojektes untersuchten Epoxidharz-Produkte besitzt) und einem herstellerkonformen Verdünnungsmittel (Verdünner webac) angelegt.

Die ersten Versuche sollten klären, inwieweit eine Oberflächenfestigung eine Beeinträchtigung der Oberflächenfarbigkeit und -struktur bewirkt. Dazu wurden Verdünnungsreihen des Epoxidharzes webac 4180N mit dem systemkonformen Verdünner webac angelegt und auf Rhyolithuffoberflächen aufgestrichen. Ein Teil der Aufstrichflächen wurde nachgewaschen bzw. im frischen Zustand abgetupft.

Es wurden Harz-Verdünner-Mischungen mit 5, 10, 20, 30 und 50 Vol.-%-Anteilen Harz-Härter-Gemisch getestet. Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass ab einer Verdünnung von 20 Vol.-% und darunter keine farblichen Beeinträchtigungen (Dunklungen) der Steinoberfläche nach einem einmaligen Epoxidharzauftrag mehr auftraten, sowohl im nachgewaschenen als auch abgetupften Zustand.

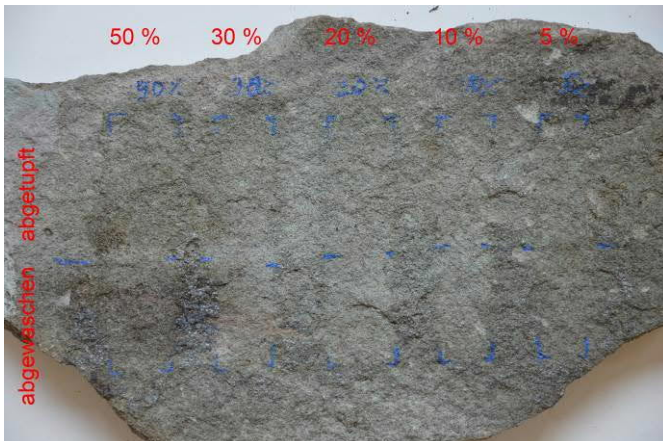


Abbildung 112: Testflächen zur Feststellung von Farbtonveränderungen bei verschiedenen verdünnten Epoxidharzaufstrichen.

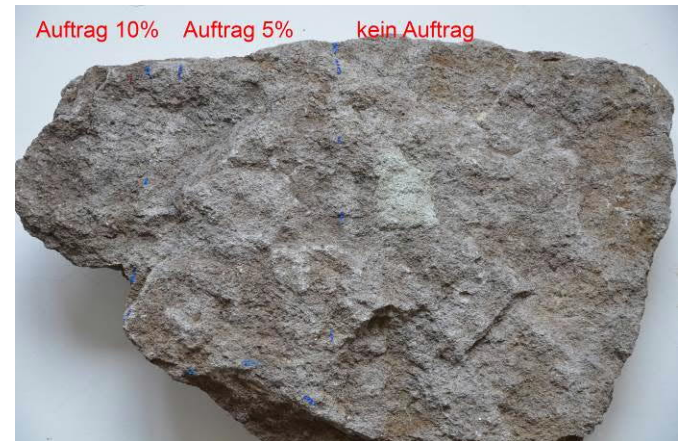


Abbildung 113: Testfläche zur Feststellung von Farbtonveränderungen von Aufstrichen verdünnter Epoxidharzlösungen.

Generell sind Lösemittel in der restauratorischen Praxis als problematisch, da meist gesundheitsschädlich, zu bewerten. Die Verringerung des Harz-Härter-Anteiles durch Zugabe von Lösemitteln bewirkt jedoch eine gewünschte moderate Festigkeitssteigerung im Gefüge und deutlich geringere Farbtonveränderungen der damit behandelten Steinoberflächen. Auch erfolgt die geplante Anwendung im Außenraum und nur in begrenzten Flächen. Diese Gründe sprachen im vorliegenden Fall für den Einsatz eines Lösemittels.



Abbildung 114: Rhyolithuff-Prüfkörper nach oberflächiger Tränkung mit mittels Keyplast Blue A eingefärbtem Epoxidharz, 10 Vol.-% Harz-Härter-Gemisch (obere 2 Reihen violett-graue, untere 2 Reihen grüne Rhyolithuffvarietät)

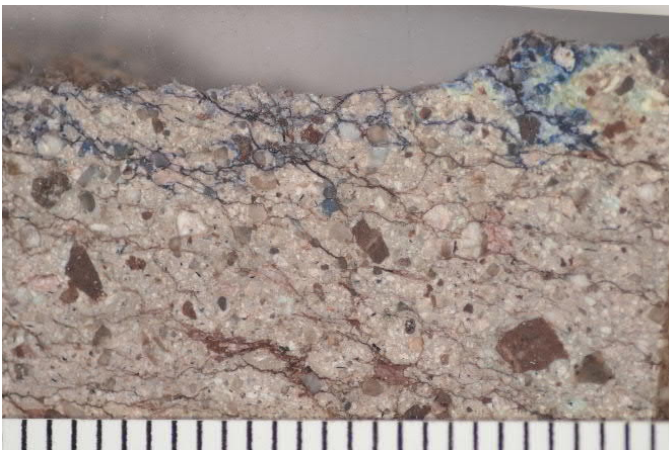


Abbildung 115: Rhyolithuff-Prüfkörper, Querschliff im Oberflächenbereich nach erfolgter Tränkung mit eingefärbtem Epoxidharz (10 Vol.-% Harz-Härter-Gemisch); Deutlich erkennbar ist die gute Penetration in das oberflächige Risssystem und die angrenzenden poröseren Bereiche der Matrix.

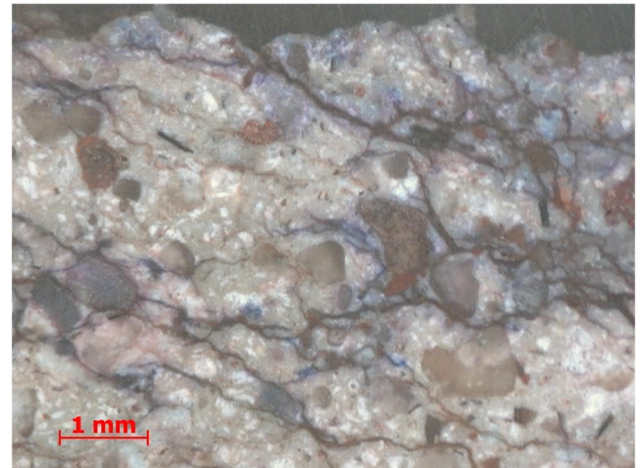


Abbildung 116: Ausschnitt aus Abbildung 115 mit einer sichtbaren Verfüllung der Risse bei gleichzeitiger Penetration des eingefärbten Epoxidharzes in die angrenzenden Matrixbereiche.

6.2 Schlämmen

Kennzeichen der Verwitterung des an der Kirche in Brotterode verbauten Rhyolithtuffes ist eine fortschreitende oberflächige Rückwitterung, verbunden mit oberflächenparallel verlaufender Schalenbildung und Abblätterung.

Wie bereits bei der Entwicklung des Konservierungskonzeptes vorgesehen, soll der Auftrag von Schlämmen das Eindringen von Wasser bei Schlagregenbeanspruchung sowie bei kritischen Wetterlagen (hohe Luftfeuchte) behindern, ohne jedoch gleichzeitig eine Abdichtung der Oberfläche bzw. starke Erhöhung der Diffusionswiderstandszahl μ zu bewirken. Gleichzeitig soll eine Konsolidierung von bereits vorhandenen Rissen im Oberflächenbereich erfolgen, d.h., eine klebende, anbindende Wirkung über Rissgrenzen hinweg erreicht werden.

Eine Möglichkeit, diesen Anforderungen gerecht zu werden, bilden Schlämmen als Oberflächenüberzüge, die gezielt anforderungsgerecht rezeptiert und ausgerüstet werden können.

Darüber hinaus sind hohe optisch-ästhetische Ansprüche an diese Schlämmen zu stellen. Sie müssen farblich und strukturell an den Bestand angepasst werden.

Aufgrund der benannten Anforderungen wurden acrylatgebundene Schlämmen favorisiert. Acrylatgebundene Schlämmen erfüllen die gestellten Anforderungen einer konsolidierenden Wirkung für den Untergrund aufgrund der materialspezifischen Klebewirkung, verbunden mit thermoplastischem Verhalten und einer ausgeprägten Verwitterungsstabilität im Verbund mit geeigneten Füllstoffen.

Es wurden verschiedene acrylatgebundene Schlämmen rezeptiert und getestet. Variiert wurden in der Zusammensetzung sowohl die Anteile und Sieblinien der eingesetzten Gesteinskörnungen als auch die Konzentration des zugegebenen Bindemittels.

Bereits vorliegende Erfahrungen mit acrylatgebundenen Schlämmen flossen in die Rezeptierung ein. Es wurden Grundrezepturen verwendet und diese hinsichtlich der geforderten Eigenschaften weiterentwickelt.

Bestimmend für die materialtechnischen Eigenschaften der Schlämme (insbesondere im Hinblick auf die kapillare Wasseraufnahme) erwiesen sich der Feststoffgehalt der zugegebenen Acrylatdispersion und der Anteil an Kaolin in der Trockenmischung.

Als Bindemittel wurde eine Acrylatdispersion (Wesutex D340) eingesetzt. Die Dispersion wurde in einem Anteil von 22 M.-%, bezogen auf das Sand-Kaolin-Gemisch, zugesetzt.

Es wurden Schlämmen mit Acrylatdispersionen untersucht, die Feststoffgehalte von 25, 27 und 30 M.-% aufwiesen. Die Schlämmen sind auf Muschelkalkplatten aufgestrichen und die Wasseraufnahme mit Hilfe des Karstenschen Prüfröhrchens ermittelt worden.

Es wurden dabei folgende 3 Auftragsweisen ausgeführt:

- Auftrag auf mit Acrylatdispersion vorgenetzer Kalksteinoberfläche (Feststoffgehalt Dispersion 2 M.-%)
- Auftrag auf trockener Kalksteinoberfläche
- Auftrag auf zuvor mit Wasser angefeuchteter Kalksteinoberfläche

Dabei konnte bei allen Auftragsweisen eine Tendenz zur Verringerung der Wasseraufnahmefähigkeit der untersuchten Schlämmen bei Erhöhung des Feststoffgehaltes (bei identischer Bindemittelvolumenzugabe im Verhältnis zur Trockenmischung) festgestellt werden.

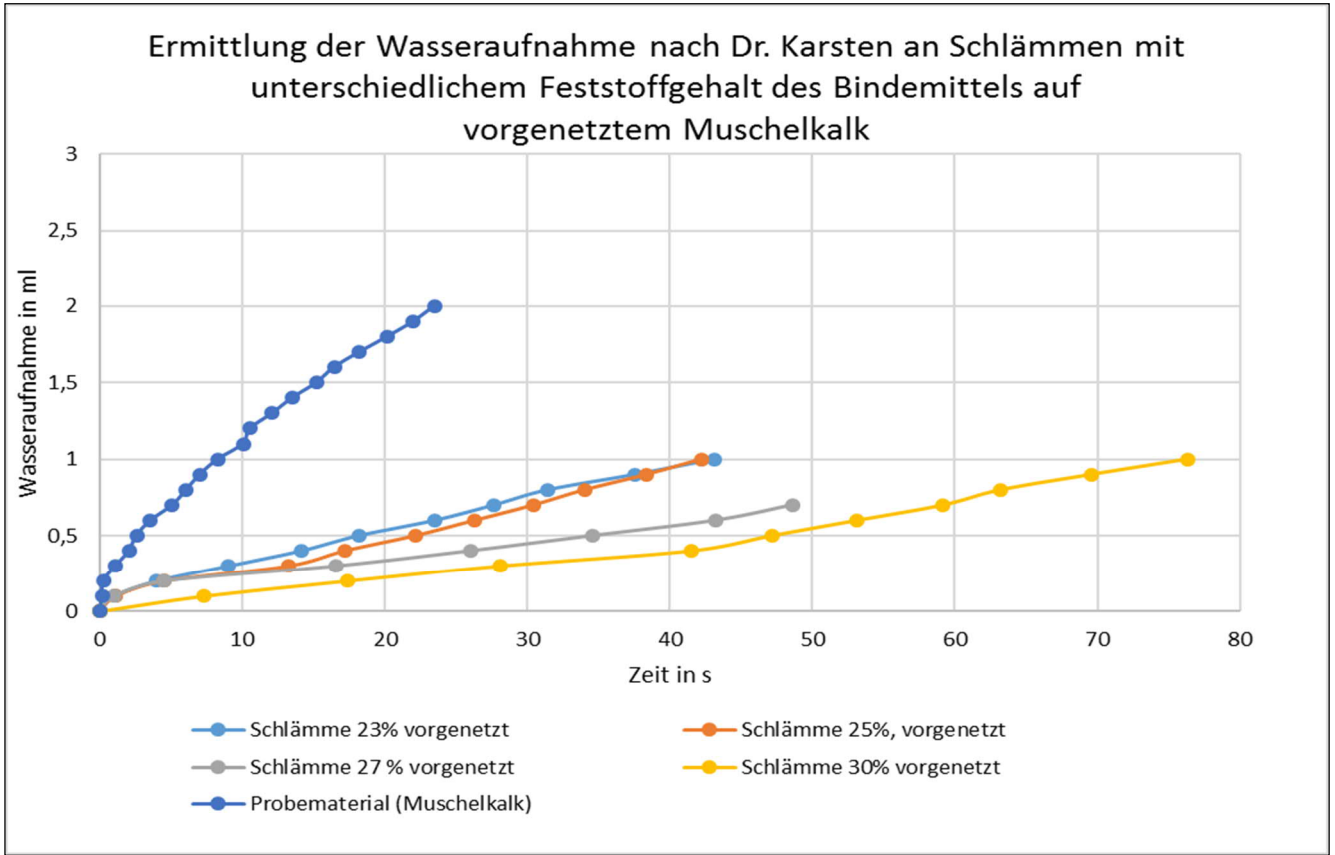


Diagramm 2: Wasseraufnahme von Schlämmen mit unterschiedlichem Feststoffgehalt in der Bindemitteldispersion auf vorgeetzten Muschelkalkoberflächen

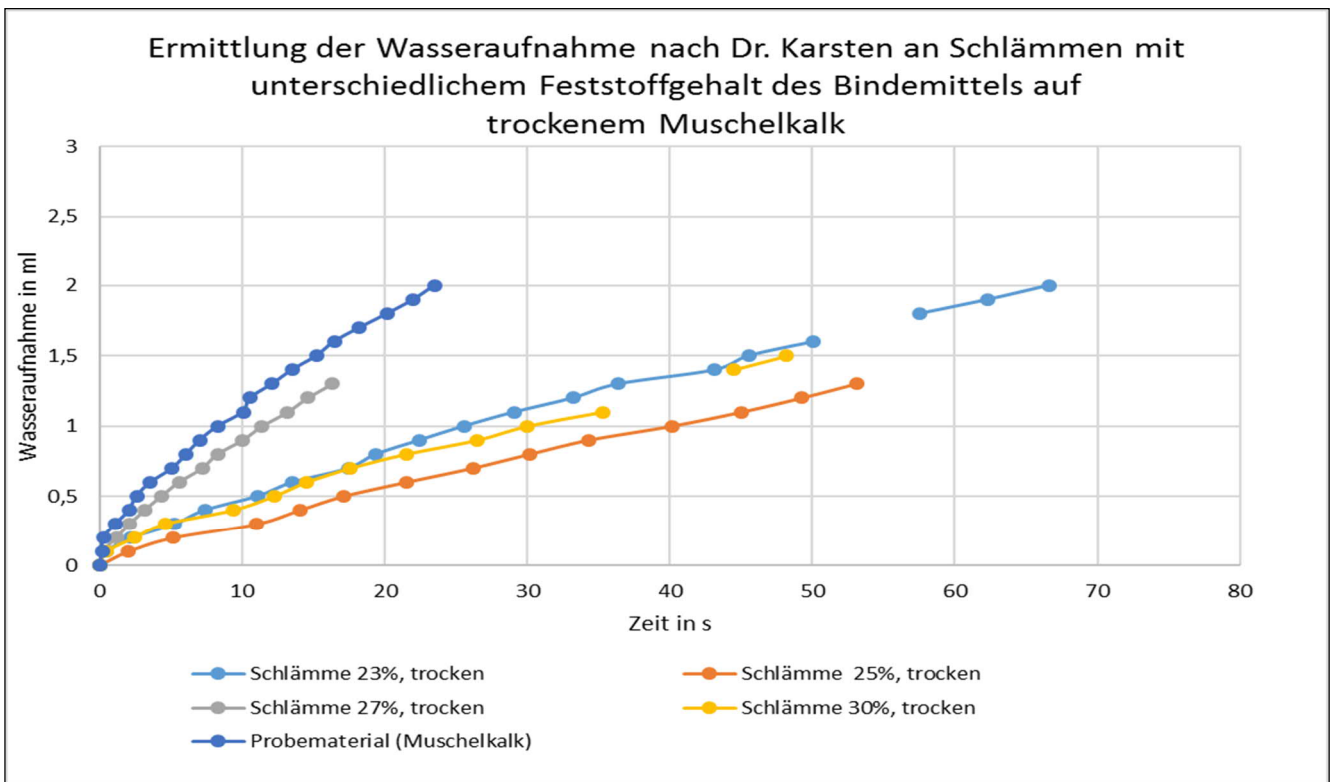


Diagramm 3: Wasseraufnahme von Schlämmen mit unterschiedlichem Feststoffgehalt in der Bindemitteldispersion auf trockenen Muschelkalkoberflächen

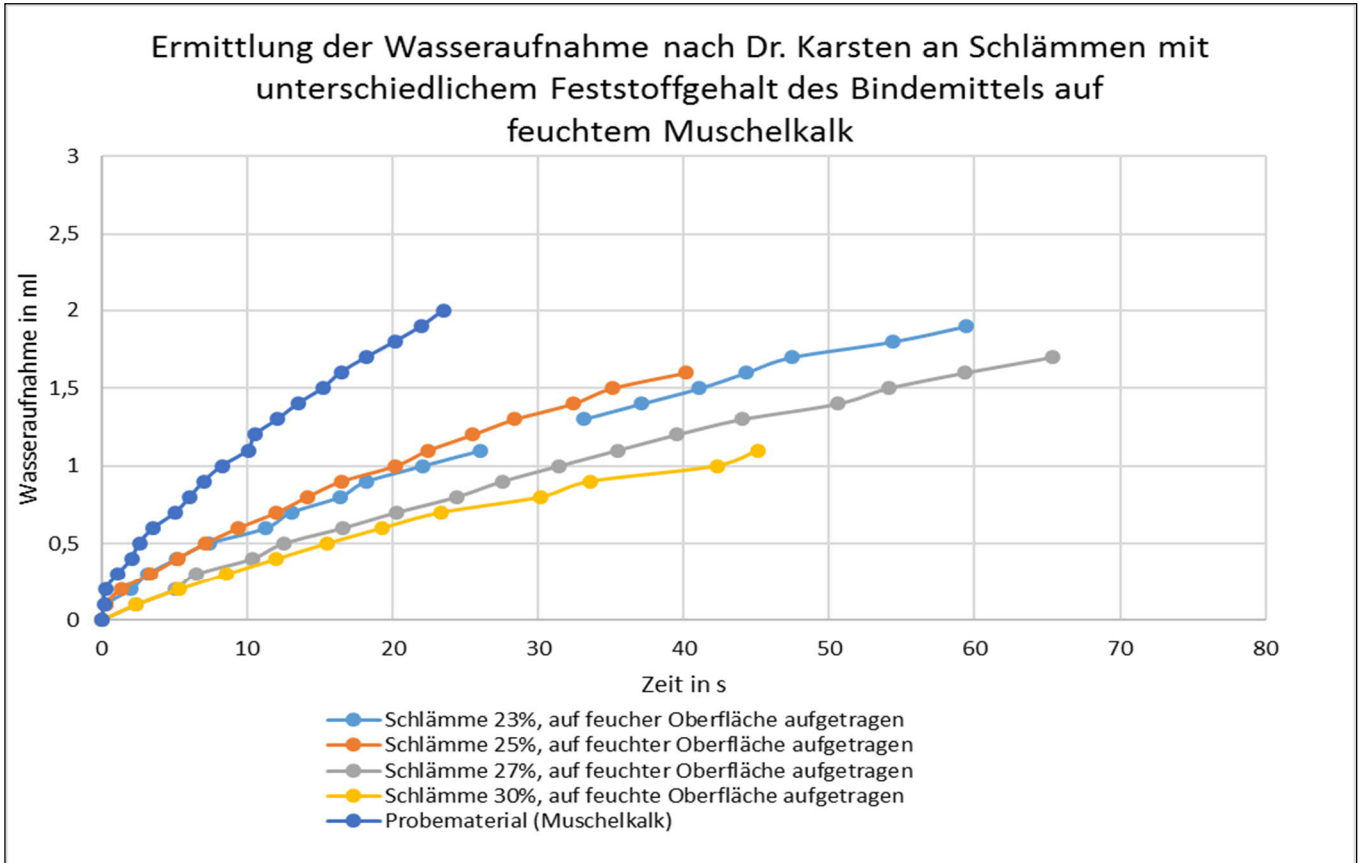


Diagramm 4: Wasseraufnahme von Schlämmen mit unterschiedlichem Feststoffgehalt in der Bindemitteldispersion auf angefeuchteten Muschelkalkoberflächen

Um den Einfluss des Kaolingehaltes auf die Wasseraufnahmefähigkeit zu klären, wurden Schlämmen mit Kaolinanteilen in der Trockenmischung zwischen 2,9 und 4,9 M.-% untersucht. Die Schlämmen wiesen die in Tabelle 15 wiedergegebenen Rezepturen auf:

Tabelle 15: Rezepturen für die zu untersuchenden Schlämmen mit steigendem Kaolingehalt (Rezepturbezeichnung kennzeichnet den Kaolingehalt)

Bestandteil	Anteile im Trockenmörtel in M.-%			
	Rezeptur 2,9%	Rezeptur 3,8%	Rezeptur 4,4%	Rezeptur 4,9%
Quarzsand SF 300 (Quarzwerke Frechen)	20,0	19,7	18,5	17,0
Quarzsand W 12 (Quarzwerke Frechen)	20,0	19,7	20,0	20,0
Quarzsand F36 (Quarzwerke Frechen)	57,1	56,8	57,1	57,1
Kaolin (Dorfner Gruppe)	2,9	3,8	4,4	4,9

Zur Kennzeichnung des Wasseraufnahmeverhaltens erfolgte die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten in Anlehnung an die DIN EN 1925. Dafür wurden Probekörper aus Porenbeton (Bohrkernscheiben, D = 100 mm) hergestellt, seitlich mit Paraffin abgedichtet und bei 20 °C und 65 % rH bis zur Ausgleichsfeuchte getrocknet. Die Wahl fiel auf Porenbeton als Trägermaterial („Substrat“) für die Schlämme,

da dieser eine vergleichsweise hohe Wasseraufnahmefähigkeit besitzt und somit in gewisser Hinsicht vergleichbar mit der saugfähigen Oberflächzone des angewitterten Rhyolithuffes ist. Außerdem lassen sich somit die Eigenschaften der Schlämmen besser beurteilen (hierzu s. auch DIN EN 1062-3).



Abbildung 117: Versuchsanordnung zur Ermittlung des Wasseraufnahmekoeffizienten an Bohrkernscheiben aus Porenbeton

Im nachfolgenden Diagramm sind die Wasseraufnahmekoeffizienten der untersuchten Schlämmenrezepturen im Vergleich zum unbehandelten Porenbeton wiedergegeben.

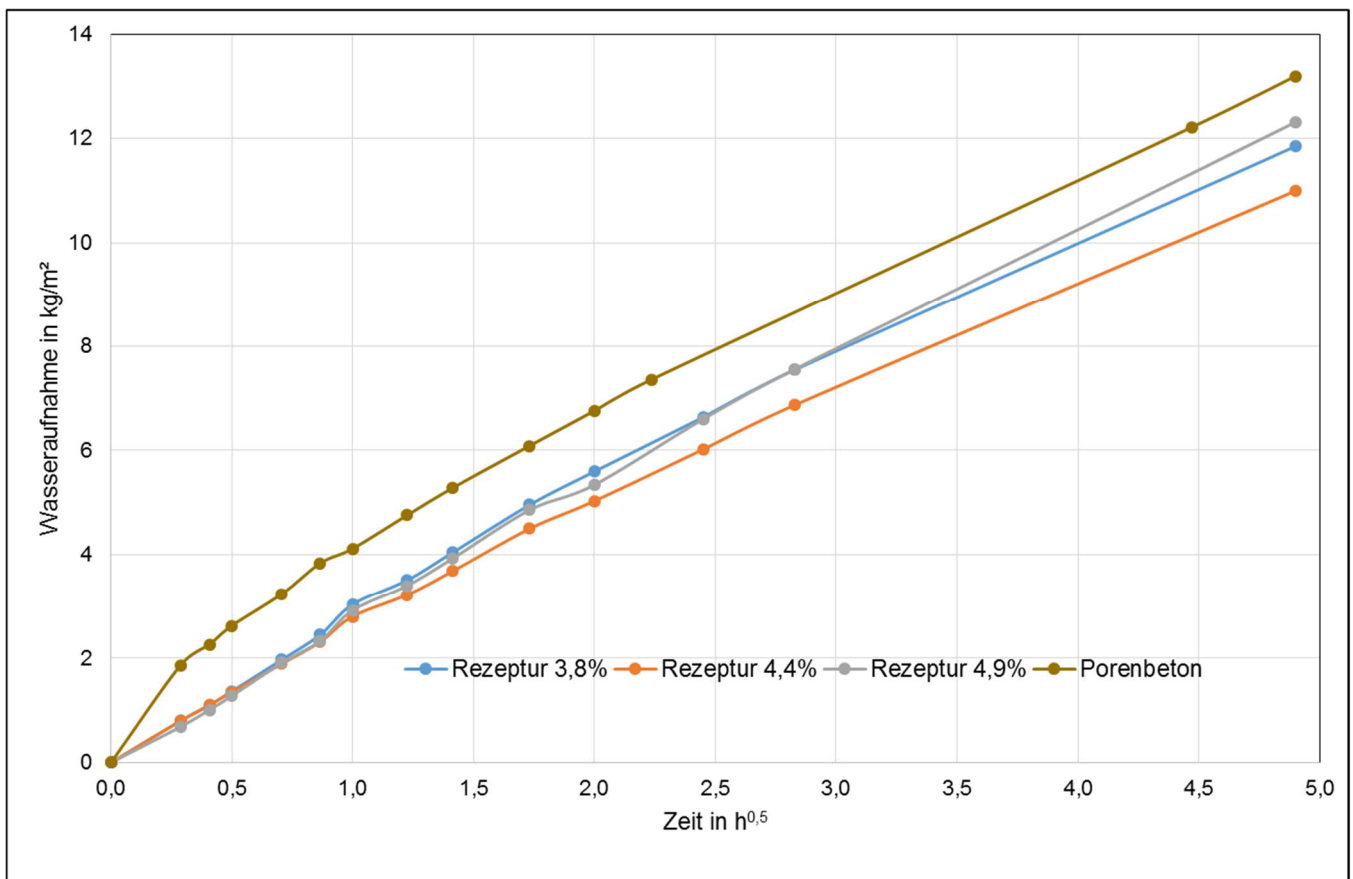


Diagramm 5: Wasseraufnahmeverhalten von Schlämmen in Abhängigkeit vom Kaoliningehalt im Trockenmörtel und im Vergleich zu unbehandelter Oberfläche (Trägersubstanz: Porenbeton, Rezepturangaben bedeuten Kaolinanteil in M.-%, Mittelwerte der Prüfkörperserien von je 3 Proben)

Tabelle 16: Berechnete Wasseraufnahmekoeffizienten der Schlämmen aus Diagramm 5 im Vergleich mit unbehandeltem Porenbeton (Rezepturangaben bedeuten Kaolinanteil in M.-%)

Material / Rezeptur	Wasseraufnahmekoeffizient in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$ (Mittelwerte)
Porenbeton	2,69
Schlämme 3,8% auf Porenbeton	2,41
Schlämme 4,4% auf Porenbeton	2,24
Schlämme 4,9% auf Porenbeton	2,51

Die Wasseraufnahmekoeffizienten der untersuchten Schlämmen unterschieden sich demnach kaum vom nicht behandelten Porenbeton. Interessant ist jedoch die geringere Wasseraufnahme unmittelbar zu Beginn der Messung. Offensichtlich setzt hier die Schlämme dem eindringenden Wasser einen bestimmten Widerstand entgegen, der erst durchbrochen werden muss. Danach ist jedoch die Saugspannung des dahinter befindlichen Porenbetons wieder maßgeblich für die Wasseraufnahme.

Dagegen lassen sich kaum Einflüsse des Kaolingehaltes in der Rezeptur auf Eigenschaftsänderungen in Bezug auf die Wasseraufnahmen erkennen.

Da die Rezepturen mit höherem Kaolingehalt deutlich schlechtere Verarbeitungseigenschaften aufwiesen (schlechteres Auftragsverhalten und unbefriedigende Verstreichbarkeit, sehr schnelles Antrocknen) wurde für die weitere Bearbeitung der Kaolingehalt in den Rezepturen auf 3,8 M.-% begrenzt.

Tabelle 17: Quarz- und Kaolinanteile der favorisierten Schlämmenrezeptur

Bestandteil	Anteile im Trockenmörtel in M.-%
Quarzsand SF 300 (Quarzwerke Frechen)	19,7
Quarzsand W12 (Quarzwerke Frechen)	19,7
Quarzsand F36 (Quarzwerke Frechen)	56,8
Kaolin (Dorfner Gruppe)	3,8

Um den Einfluss der Schlämmen auf die Diffusionseigenschaften des Rhyolithtuffes erfassen zu können, erfolgte eine erneute Bestimmung der Wasserdampfdiffusionseigenschaften an bereits untersuchten Bohrkernscheiben aus Rhyolithtuff (s. Tabelle 5). Die Bohrkernscheiben wurden dafür einseitig mit einer Schlämme (Rezeptur mit 3,8 M.-% Kaolinanteil) versehen. Die Untersuchung erfolgte wieder nach dem Trockenbereichsverfahren nach DIN EN ISO 12572. Als Sorbens diente Calciumchlorid.

Die Ergebnisse zeigen einen Einfluss der aufgetragenen Schlämmen: Bei allen untersuchten Bohrkernscheiben war eine Verschlechterung der Wasserdampfdiffusion erkennbar, allerdings ausgehend von einer ohnehin bereits sehr schlechten Diffusivität. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 wiedergegeben.

Tabelle 18: Wasserdampfdiffusionseigenschaften von Bohrkernscheiben aus Rhyolithtuff im Vergleich mit und ohne aufgebrachtener Schlämme

Probe	Beschreibung	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ , Proben unbehandelt	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ , Proben einseitig mit Schlämme überzogen
BR/K/14/1	Rhyolithtuff grünlich, Bohrkernscheibe Oberfläche (0-4,5 cm), Oberfläche korrodiert	122	182
BR/K/11/1	Rhyolithtuff rötlich-violett, Bohrkernscheibe Oberfläche (0-4,5 cm), Oberfläche korrodiert	119	158
BR/K/13/1	Rhyolithtuff rötlich-violett, Bohrkernscheibe Oberfläche (0-4 cm), Oberfläche korrodiert und abschuppend	146	186

Die ermittelten materialtechnischen Eigenschaften der entwickelten Schlämme Rezepturen erwiesen sich hinsichtlich der Wasseraufnahmen als noch nicht befriedigend.

Es war notwendig, dass die aufzubringenden Schlämme den Eintrag von Niederschlagswasser beispielsweise bei Schlagregenereignissen in die stark saugende Oberflächenzone verringern, ohne jedoch durch eine Sperrung den Feuchtetransport zu unterbrechen.

Um die angestrebte wasserhemmende Wirkung der Schlämme zu verbessern, erfolgte deshalb eine Modifizierung der favorisierten Trockenmörtelrezeptur durch Zugabe von Zinkstearat. Es wurden drei Rezepturen mit einem Anteil von 0,15 M.-%, 0,2 M.-% und 0,3 M.-% Zinkstearat, bezogen auf die Masse der Trockenmörtelmischung, getestet.

Erste, tastende Untersuchungen, erfolgten durch Ermittlung des Eindringverhaltens von auf die Schlämmeoberflächen aufgebrachtener Wassertropfen.

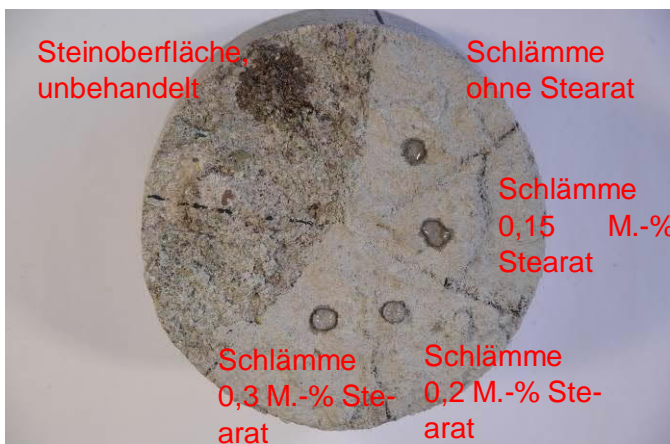


Abbildung 118: Tastende Untersuchungen zur Abschätzung des Eindringverhaltens von Wassertropfen auf geschlämmten Oberflächen (Aufnahme unmittelbar nach Aufbringen der Wassertropfen auf die Kreissegmente)



Abbildung 119: Gleiche Situation wie in Abbildung 118, Aufnahme 5 min nach Aufbringen der Wassertropfen auf die Kreissegmente. Auf den Schlämme mit 0,2 bzw. 0,3 M.-% Stearatanteil sind die Wassertropfen noch weitgehend vorhanden.

Für den Nachweis einer wasserhemmenden Wirkung dieser Schlämmen wurde wieder der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient in Anlehnung an DIN EN 1925 bzw. DIN EN 1062-3 ermittelt. Dafür wurden wieder Bohrkernscheiben (D = 100 mm, H = 50 mm) aus Porenbeton hergestellt, welche einseitig mit den Schlämmen beschichtet und deren Seitenflächen mit Paraffin abgedichtet wurden. Die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgte zum Vergleich auch wieder an unbeschichteten Proben.

Um einen etwaigen Einfluss des hydrostatischen Druckes beim Eintauchen der Probenkörper in das Wasser entsprechend Untersuchungsvorschrift ausschließen zu können, wurde die Versuchseinrichtung modifiziert: Durch Auflegen der Probekörper auf ein dickes, wasserdurchlässiges und kapillar aktives Geotextil konnte gewährleistet werden, dass nur das kapillare Saugen als Wassertransport in das Material wirken konnte. Die Proben wurden beschwert, um die Vollflächigkeit der Kontaktfläche zu gewährleisten. Untersucht wurden dabei zu Vergleichszwecken nochmals die Schlämmenproben mit unterschiedlichem Kaolingehalt.



Abbildung 120: Ermittlung des kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten durch kapillares Saugen

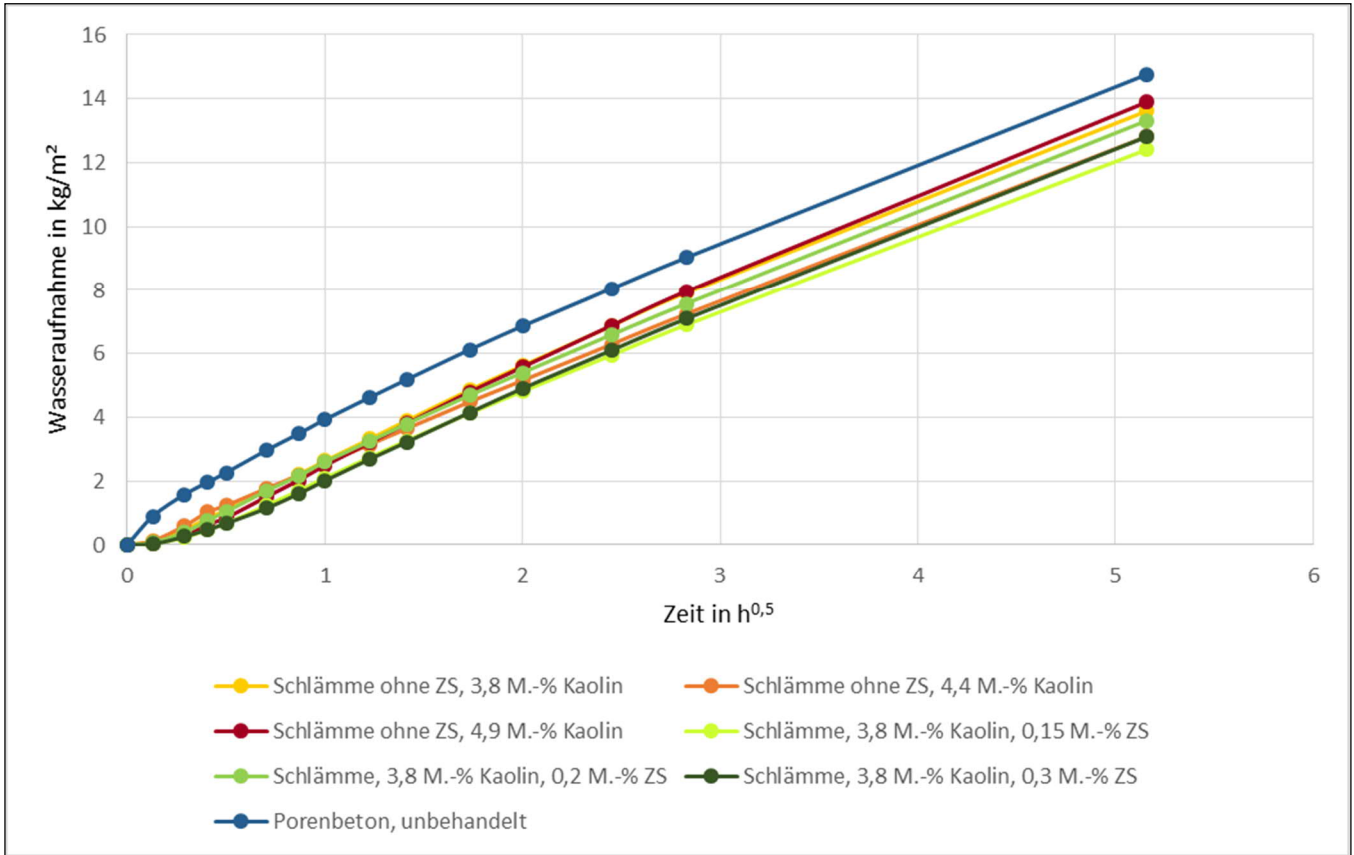


Diagramm 6: Wasseraufnahmeverhalten von Schlämmen in Abhängigkeit vom Anteil an Zinkstearat als wasserhemmenden Bestandteil im Trockenmörtel und im Vergleich zu unbehandelter Oberfläche (Trägersubstanz: Porenbeton, Rezepturangaben bedeuten Zinkstearatanteil (ZS) in M.-%, Mittelwerte der Prüfkörperserien von je 3 Proben)

Tabelle 19: Berechnete Wasseraufnahmekoeffizienten der Schlämmen aus Diagramm 6 im Vergleich mit unbehandeltem Porenbeton

Material / Rezeptur	Wasseraufnahmekoeffizient in kg/(m ² h ^{0,5}) (Mittelwerte)
Porenbeton, unbehandelt	2,82
Schlämme ohne Zinkstearat, 3,8 M.-% Kaolin	2,74
Schlämme ohne Zinkstearat, 4,4 M.-% Kaolin	2,52
Schlämme ohne Zinkstearat, 4,9 M.-% Kaolin	2,82
Schlämme 0,15 M.-% Zinkstearat, 3,8 M.-% Kaolin	2,51
Schlämme 0,2 M.-% Zinkstearat, 3,8 M.-% Kaolin	2,67
Schlämme 0,3 M.-% Zinkstearat, 3,8 M.-% Kaolin	2,60

Die Wasseraufnahmekoeffizienten der Proben ohne Zinkstearatausrüstung und der unbehandelten Porenbetonproben zeigen vergleichbare Werte. Erwähnenswert sind in diesem Zusammenhang die an diesen Proben mittels Prüfung in Anlehnung an DIN EN 1925 ermittelten Werte in ähnlicher Größenordnung (s. Tabelle 16).

Die Wasseraufnahmekoeffizienten der mit Zinkstearat ausgerüsteten Proben weisen ähnliche, etwas niedrigere Werte auf. Hier ist jedoch die anfänglich deutlich reduzierte Wasseraufnahme als nichtlinearer Anlaufeffekt entscheidend für die Wirksamkeit der Schlämme bei Niederschlags- und insbesondere Schlagregenbeanspruchung. Signifikante Unterschiede in der anfänglichen Wasseraufnahme in Abhängigkeit vom Anteil des zugesetzten Zinkstearats konnten allerdings bei den Messungen nicht gefunden werden.

Offensichtlich ist eine wasserhemmende Ausrüstung bereits ab dem niedrigsten Anteil zugesetzten Zinkstearats gegeben.

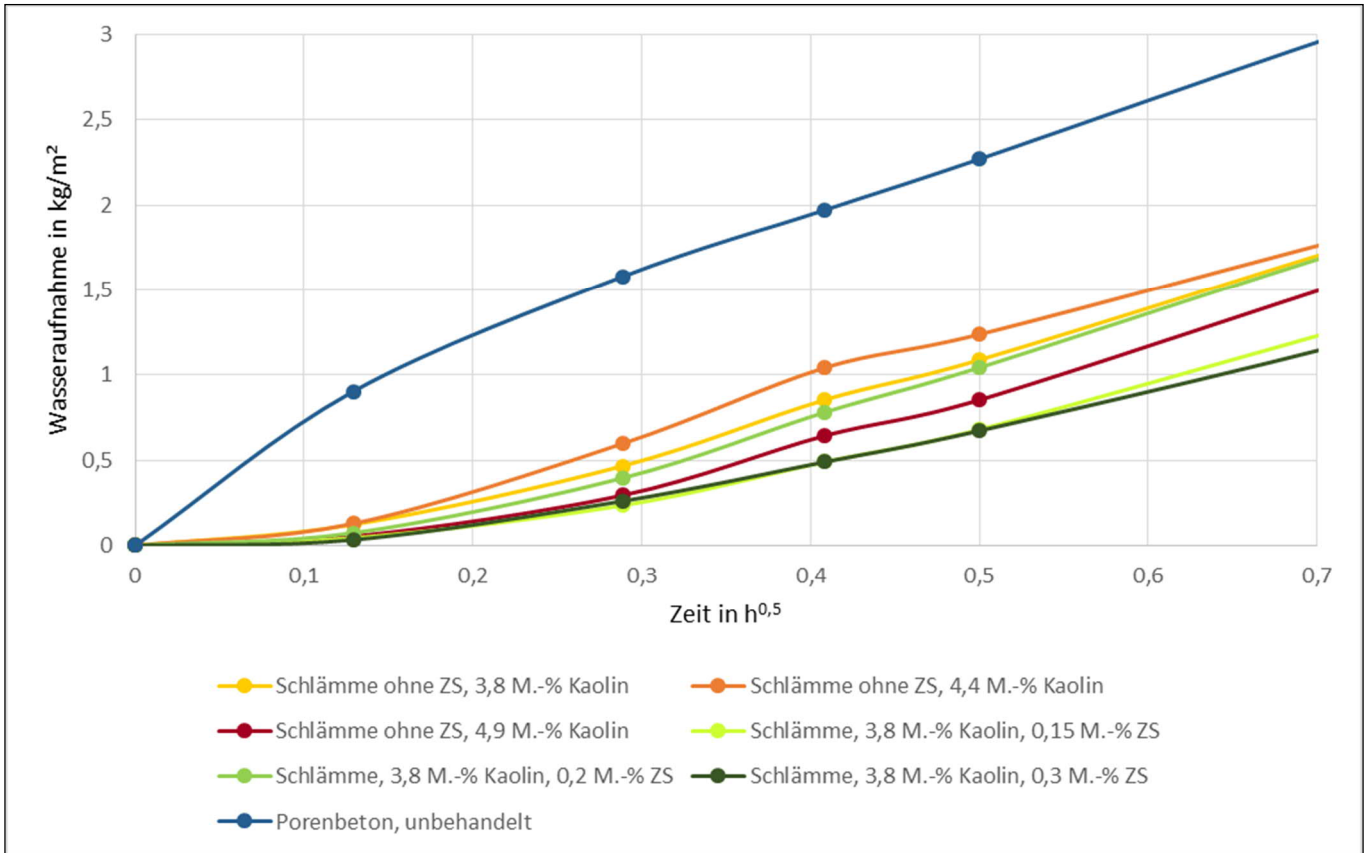


Diagramm 7: Teilabschnitt aus Diagramm 6 für die ersten Minuten der Wasseraufnahme

Die Schlämme wurden auf den Farbton des zu überziehenden Steinmaterials eingefärbt. Da der an der Kirche in Brotterode eingesetzte Rhyolithuff hauptsächlich in zwei Farbvarianten (rötlich-violett und hellgrün) mit den daraus folgenden Misch- und Graustufen verbaut wurde, wurden entsprechende Mischreihen bezüglich der notwendigen Grundeinfärbungen entwickelt.

Die Einfärbung erfolgte durch mineralische Pigmente, wie sie zum Einfärben von Beton eingesetzt werden. Dies gewährleistete eine entsprechend hohe Alkalien-, Licht- und Wetterbeständigkeit dieser Pigmente. Die Einfärbung erfolgte mit folgenden Pigmenten (Tabelle 20):

Tabelle 20: Pigmente zum Einfärben der Schlämme

Farbton	Pigment
schwarz	Granufin Schwarz G77
schwarz	Habich Oxidschwarz
rot-violett	Granufin Heiderot
blaugrün	Kreidezeit Spinellmint

Bezüglich der Einmischbarkeit der Pigmente erwies sich das granuliertes Schwarzpigment von Granufin als sehr problematisch – hier traten trotz intensiver Durchmischung beim Schlämmenauftrag Schlierenbildungen auf. Aus diesem Grund wurde sich zur Verwendung des Oxidschwarzpigmentes (Fa. Habich) entschieden. Die Einmischung der Pigmente erfolgte in der Trockenmischung.

Die Applikation der Schlämmen wurde an Filterpappen, Musterplatten aus grauem Muschelkalkstein und am gewonnenen Steinmaterial aus dem Steinbruch vorgenommen. Es wurden verschiedenen Auftrags-techniken getestet. Als favorisierte Variante wurde letztendlich folgende Arbeitsweise ausgewählt:

- Vornetzen der Auftragsfläche mit auf 2 M.-% verdünnter Acrylatdispersion Wesutex D340
Dies gewährleistet eine Verbesserung der Anbindung und Haftung der danach aufzutragenden Schlämme sowie deren bessere Verarbeitung.
- Auftrag der Schlämme im Grundfarbton auf die Steinoberfläche mittels Borstenpinsels. Die Wahl des geeigneten Pinsels ist für das Applikationsverhalten von Bedeutung. Bei zu harten Borsten lässt sich das Schlämmenmaterial nur unzureichend einarbeiten und es entstehen aufliegende und abrollende Agglomerationen. Wichtig sind außerdem ein dünn-schichtiger und gleichmäßiger Auftrag sowie das sorgfältige Einarbeiten in den Untergrund.
- Nach eingetretener Verfestigung der Schlämme wird partiell ein zweiter Schlämmenauftrag mittels Pinsel vorgenommen. Dieser erfolgt mit einer differierend eingefärbten Schlämme und realisiert damit eine angestrebte farblich bewegtere Wirkung, wie sie auch die Steinoberfläche selbst aufweist. Auch hier ist das sorgfältige Einarbeiten notwendig.



Abbildung 121: Farbvarianten von Schlämmen (Rot- und Rotviolettöne)



Abbildung 122: Farbvarianten von Schlämmen (Grüntöne)



Abbildung 123: Favorisierte Farbabstufungen für die Schlämmen: Grautöne; die Pigmentzugaben sind in Masse-% angegeben (S...Oxidschwarz)



Abbildung 124: Favorisierte Farbabstufungen für die Schlämmen: Grauviolettöne; die Pigmentzugaben sind in Masse-% angegeben (S...Oxidschwarz; H...Heiderot)



Abbildung 125: Favorisierte Farbabstufungen für die Schlämmen: Rotviolettöne die Pigmentzugaben sind in Masse-% angegeben (S...Oxidschwarz; H...Heiderot)



Abbildung 126: Favorisierte Farbabstufungen für die Schlämmen: Grüntöne die Pigmentzugaben sind in Masse-% angegeben (Sp...Spinellmint, S...Oxidschwarz)



Abbildung 127: Musterauftrag für Schlämmen: Als Grundfarbton fand hier ein mittleres Grau Anwendung, darauf wurde in einem zweiten Auftrag ein Rotviolett aufgebracht.

An An- und Dünnschliffen wurden die Auftragsdicken der Schlämmen auf Rhyolithtuffproben ermittelt. Sie liegen im Wesentlichen zwischen 0,3 und 0,5 mm, wobei erkennbar ist, dass die Schlämmen sehr gut in die Unebenheiten der Steinoberflächen eingearbeitet werden können und somit eine Verklebung von Schalen- und Rissflanken bewirken.

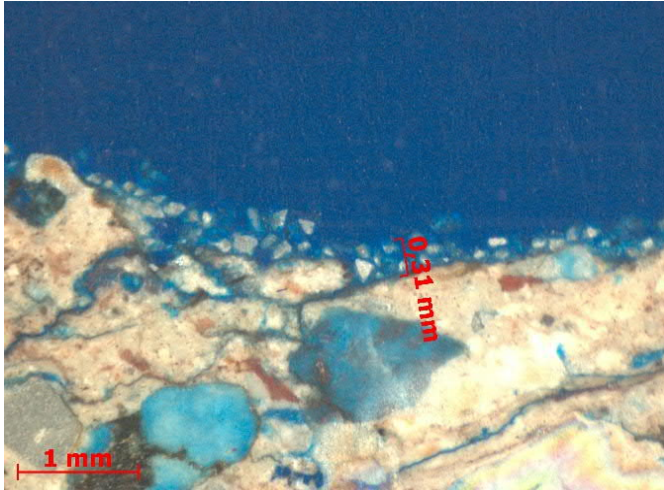


Abbildung 128: Schlämmenauftrag auf Rhyolithtuff, Anschliff des Dünnschnittes im Oberflächenbereich, Auflicht: Die Schlämme ist in die Vertiefungen der Oberfläche eingestrichen und weist eine Dicke von etwa 0,3...0,5 mm auf.

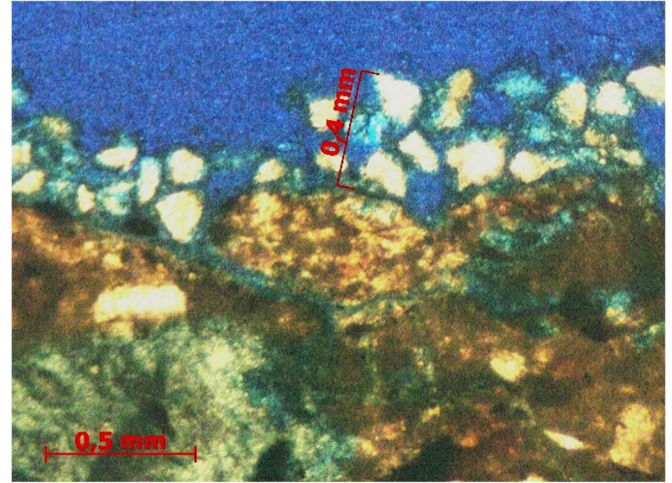


Abbildung 129: Schlämmenauftrag auf Rhyolithtuff, Anschliff des Dünnschnittes im Oberflächenbereich im Durchlicht

6.3 Ergänzungsmörtel

Zur Ergänzung von Fehlstellen wurden acrylatgebundene Mörtel rezeptiert. Auch dabei konnte auf vorhandene Grundrezepturen mit definierten materialtechnischen Eigenschaften zurückgegriffen werden. Diese Grundrezepturen wurden den Anforderungen entsprechend angepasst.

Entsprechend der Vorüberlegungen sollten die Ergänzungsmörtel im Verbund mit den Schlämmen eingesetzt werden (Schlämmengrundierung bzw. -überzug).

Es wurden folgende Acrylatmörtelrezepturen in die engere Auswahl einbezogen:

Tabelle 21: Acrylatmörtelrezepturen

Mörtelrezeptur	Grundrezeptur	Charakterisierung der Gesteinskörnungen und Füllstoffe
A	Acrylatmörtelrezeptur F0,2/5-6F	Quarzsand F36, Quarzmehl W12, Kaolin
B	Acrylatmörtelrezeptur 2/00	Marmormehl, Marmorgries, Quarzsand F36, Quarzsand F33, Kaolin
C	Acrylatmörtelrezeptur 5/00	Quarzsand F31, Quarzsand F36, HQS80, Kaolin

Als Bindemittel kam, analog der Schlämmenrezeptierung, die Acrylatdispersion wesutex D340 zum Einsatz



Abbildung 130: Überarbeitete Musterflächen der in die engere Auswahl gezogenen Mörtelrezepturen

Das Wasseraufnahmeverhalten des hinsichtlich Strukturanpassung und Verarbeitbarkeit favorisierten Ergänzungsmörtels Rezeptur C wurde wieder durch eine Messung in Anlehnung an DIN EN 1925 ermittelt. Um den Einfluss der Schlämme in Verbindung mit dem Ergänzungsmörtel beurteilen zu können, wurde eine zweite Prüfkörperserie parallel dazu gemessen. Die Prüfkörper wurden als Scheiben mit ca. 100 mm Durchmesser und etwa 20 mm Höhe hergestellt und an den Mantelflächen mit Paraffin abgesperrt. Schlämme und Ergänzungsmörtel erhielten in dieser ersten Untersuchung keine wasserhemmende Ausrüstung.

Das nachfolgende Diagramm zeigt das Wasseraufnahmeverhalten des favorisierten Ergänzungsmörtels Rezeptur C mit und ohne aufgetragener Schlämme.

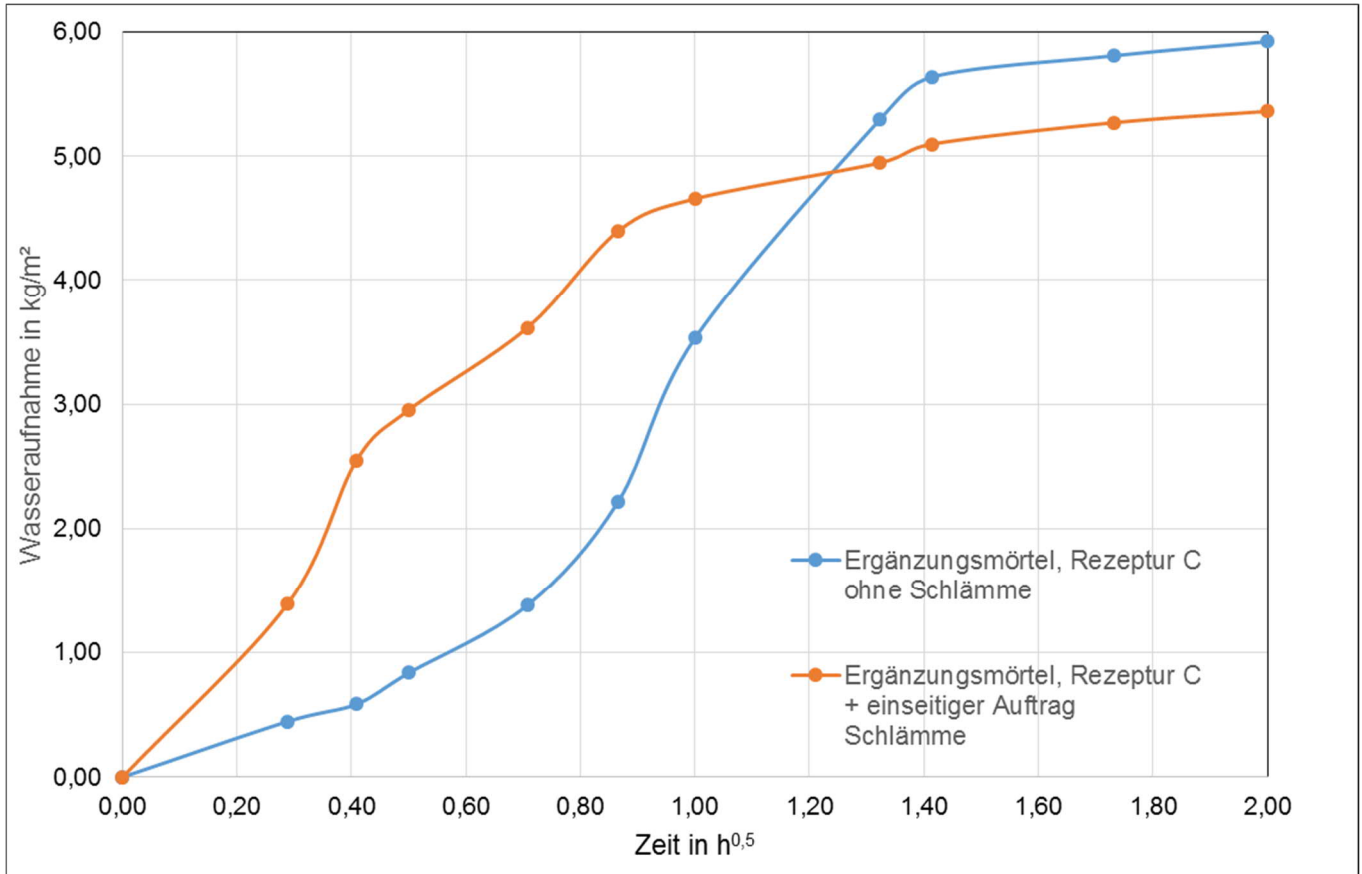


Diagramm 8: Wasseraufnahmeverhalten von Ergänzungsmörtel mit und ohne einseitig aufgebrachtener Schlämme (Mittelwerte der Prüfkörperserien von je 4 Proben)

Berücksichtigt man die Anlaufeffekte und werden die Zeitabschnitte nach vollständiger Porenfüllung der Prüfkörper abgezogen, so ergibt sich ein nahezu identischer Wasseraufnahmekoeffizient von etwas über $5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$. Allerdings ist der das Ansaugen verzögernde Anlaufeffekt bei den nicht mit Schlämme überzogenen Ergänzungsmörteln deutlich ausgeprägter als das Ansaugen über die mit Schlämme überzogene Kontaktfläche.

Der Wasseraufnahmekoeffizient der Ergänzungsmörtel ist deutlich höher als der mit Zinkstearat wasserhemmend ausgerüsteten Schlämmen. Aus diesem Grund machte es sich erforderlich, den Wasseraufnahmekoeffizienten des favorisierten Ergänzungsmörtels ebenfalls deutlich zu verringern. Die wasserhemmende Einstellung wurde auch hier durch Zugabe von Zinkstearat realisiert.

Das Zinkstearat wurde auch hier der Trockenmischung zugefügt, die Rezeptur ansonsten jedoch nicht verändert.

Da zu vermuten war, dass sich aufgrund des Zinkstearatzusatzes die Verarbeitungseigenschaften des Restauriermörtels ändern würden, erfolgte die Herstellung verschiedener Probekörper mit einem abgestuften Zinkstearatanteil von 0,1, 0,15 und 0,2 M.-% Zinkstearat in der Trockenmasse in verschiedenen Auftragsstärken auf Natursteinplatten (dichter Kalkstein).

Dabei konnte festgestellt werden, dass sich mit steigendem Zinkstearatgehalt die Verarbeitungseigenschaften des Mörtels signifikant verschlechterten. Nach Verfestigung der Probekörper wurden diese über den Querschnitt der Aufträge hin geöffnet. Dabei wurde erkennbar, dass im Inneren der Probekörper nicht verfestigte Bereiche vorlagen. Nach der Öffnung kam es hier zwar zu einer Nachverfestigung, allerdings nur teilweise. Auftragsstärken von über 1,5 cm waren demzufolge ohne Veränderung der Rezepturen bei wasserhemmend ausgerüstetem Restauriermörtel nicht realisierbar.

In der Auswertung wurde deshalb die Rezeptur, insbesondere der zuzugebende Anteil an Bindemittel, verändert. Der Anteil an Acrylatdispersion wurde von 7,5 ml auf 8,5 ml je 100 g Trockenmörtel erhöht.

Daraufhin wurden weitere Probekörper angefertigt, wieder mit gestaffelt erhöhtem Anteil zugegebenen Zinkstearats sowie mit der erhöhten Zugabe an Bindemitteldispersion. Die mit den einzelnen Mörtelrezepturen hergestellten Ergänzungsmörtel wurden auf Rhyolithtuffplatten aufgebracht.



Abbildung 131: Ergänzungsmörtel mit unterschiedlichen Bindemittelgehalt und Zugaben an Zinkstearat auf Rhyolithtuffplatte (Rezepturbestandteile s. Tabelle 22)

Tabelle 22: Anteile von Rezepturbestandteilen in Ergänzungsmörteln (s. Abbildung 131) bei ansonsten gleicher Grundrezeptur

Nummer Mörtelprobe	Anteil Bindemittel in ml/100 g Trockenmörtel	Anteil Zinkstearat in M.-% (bezogen auf Trockenmasse)
1	7,5	0,10
2	8,0	0,10
3	7,5	0,15
4	8,0	0,15
5	7,5	0,20
6	8,0	0,20

Eine Verschlechterung der Verarbeitbarkeit der Mörtel mit steigendem Zinkstearatgehalt wurde auch bei Erhöhung der Bindemittelzugabe zur Trockenmischung festgestellt, jedoch in deutlich geringerem Maße. Auch ist das zuvor beobachtete Phänomen unverfestigter Mörtelbereiche im Inneren dickschichtigerer Ergänzungen bei Erhöhung der Bindemittelzugaben ebenfalls wesentlich geringer ausgeprägt bzw. tritt überhaupt nicht auf. Dies konnte an weiteren auf Rhyolithtuffplatten aufgetragenen Mörtelproben nachgewiesen werden (Grundrezeptur inkl. Zugabe von 0,1 M.-% Zinkstearat, Mörtel eingefärbt im Farbton 2c).



Abbildung 132: Keilförmig auf Rhyolithtuff aufgetragener Ergänzungsmörtel (Auftragshöhe 0...35 mm) nach Überarbeitung



Abbildung 133: Ergänzungsmörtel nach dem seitlichen Rückarbeiten bis zur Längsachse: Der Mörtel ist über den gesamten Längsschnitt hinweg verfestigt.

Darauf aufbauend wurden für die Bestimmung des Wasseraufnahmeverhaltens verschiedener, mit wasserhemmenden Zusätzen ausgerüsteter Ergänzungsmörtel kreisrunde Scheiben mit annähernd 100 mm Durchmesser und 20 mm Höhe hergestellt. Dabei kamen die Rezeptur C entsprechend Tabelle 21 zur Anwendung (Änderung von Rezepturbestandteilen bei ansonsten gleicher Grundrezeptur).

Tabelle 23: Anteile von Rezepturbestandteilen in Scheiben aus Ergänzungsmörteln bei ansonsten gleicher Grundrezeptur (Mörtelscheibe 1 entspricht Grundrezeptur)

Nummer Mörtelscheibe	Anteil Bindemittel in ml/100 g Trockenmörtel	Anteil Zinkstearat in M.-% (bezogen auf Trockenmasse)
1	7,5	0,00
2	8,0	0,10
3	8,0	0,15
4	8,3	0,20

Für den Nachweis einer wasserhemmenden Wirkung der Ergänzungsmörtel erfolgte die Bestimmung des kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten in Anlehnung an DIN EN 1925. Die Probekörper wurden wieder auf wasserdurchlässiges und kapillaraktives Geo-Vlies aufgelegt und beschwert. Das Wasseraufnahmeverhalten der einzelnen Probekörper ist in Diagramm 9 dargestellt.

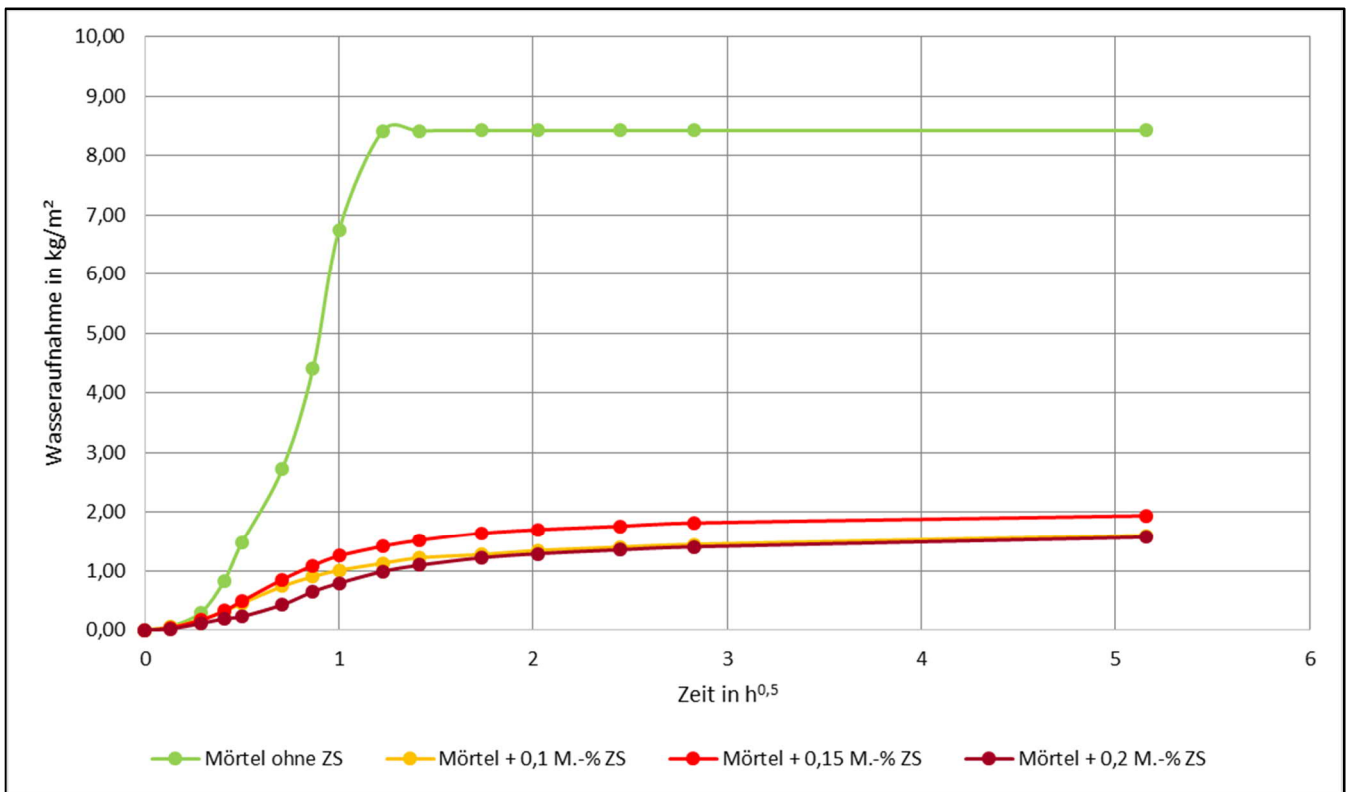


Diagramm 9: Wasseraufnahmeverhalten von Ergänzungsmörtel (ohne und mit Zusatz von Zinkstearat)

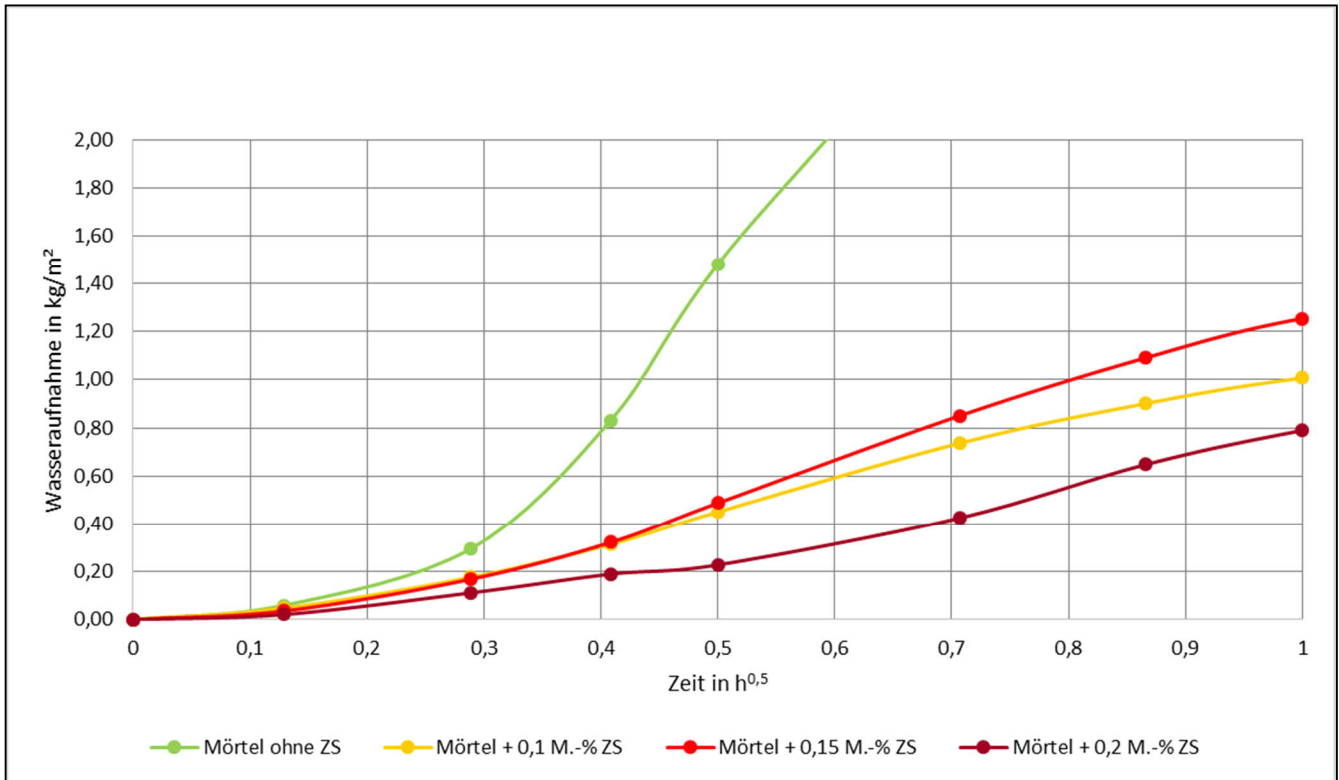


Diagramm 10: Teilbereich aus Diagramm 9 für den Zeitabschnitt bis 1 Stunde nach Beginn des Saugvorganges

Tabelle 24: Wasseraufnahmekoeffizient der Bohrkernscheiben aus Diagramm 10 für den Zeitraum von 1 Stunde nach Beginn des Saugens

Nummer Mörtelscheibe	Anteil Zinkstearat in M.-% (bezogen auf Trockenmasse)	Wasseraufnahmekoeffizient C in kg/m²h ^{0,5} für t=1h
1	0,00	10,00
2	0,10	1,17
3	0,15	1,58
4	0,20	1,02

Das Diagramm 9 zeigt die wasserhemmende Wirkung des zugesetzten Zinkstearats im Vergleich zu nicht wasserhemmend ausgerüsteten Mörtelproben. Hier ist - im Unterschied zu den untersuchten Mörtelschlämmen - eine starke Reduzierung der Wasseraufnahme über den gesamten Untersuchungszeitraum von 24 Stunden zu beobachten. Der Wasseraufnahmekoeffizient sinkt dabei im Zeitraum der ersten Stunde nach Beginn des Saugens um fast bis zu 90 % gegenüber den nicht wasserhemmend ausgerüsteten Proben. Interessant ist dabei die starke Abnahme des Saugvermögens bereits bei einer Zugabe von 0,1 M.-% Zinkstearat, die sich auch nach Verdoppelung dieses Zugabeanteils kaum noch nennenswert weiter verändert.

Im Vergleich zu der Mörtelrezeptur ohne wasserhemmende Ausrüstung mit Zinkstearat musste die Zugabemenge von Acrylatdispersion D340 (30 Vol.-%) erhöht werden, um einen verarbeitungsfähigen Frischmörtel zu erhalten. Im Ergebnis weiterer Testreihen erwies sich eine Zugabe von 8,5 ml Acrylatdispersion pro 100 g Trockenmörtel (Anteil 0,1 M.-% Zinkstearat) als noch verarbeitungsfähig. Dies sind 10 ml mehr notwendige Dispersionszugabe als bei der identischen Trockenmörtelmischung ohne Zinkstearatausrüstung (Grundrezeptur). Auf eine weitere Erhöhung des Anteils an Acrylatdispersion zur Trockenmischung

wurde verzichtet, da ansonsten die Gefahr einer deutlichen Veränderung anderer Festmörteleigenschaften bestand.

Des Weiteren wurde die Haftzugfestigkeit von Ergänzungsmörteln zum Untergrund geprüft. Dabei wurden Verbundkörper aus dichtem Muschelkalk und Ergänzungsmörtel hergestellt (Grund- und Kontaktfläche 50x50 mm², modifizierte Mörtelrezeptur C mit 0,15 M.-% Zinkstearat und 8,5 ml Acrylatdispersion pro 100 g Trockenmörtel) hergestellt.

Die Prüfung erfolgte in Anlehnung an DIN EN 1542-1999 /11/. Die Prüfergebnisse sind in Tabelle 25 wiedergegeben. Die Abrisse erfolgten bei allen Prüfkörpern im Mörtel.

Tabelle 25: Haftzugfestigkeiten der Verbundkörper Ergänzungsmörtel - Kalkstein

Probekörper	Haftzugfestigkeit in N/mm ²	Ausrisstiefe in mm	Bruchart
1	0,020*	0,040	100 % im Mörtel
2	0,097	0,191	100 % im Mörtel
3	0,230	0,452	100 % im Mörtel
4	0,507	0,997	100 % im Mörtel

* Der Verbundkörper war bereits vorgeschädigt (Rissbildung zwischen Mörtel und Stein).

Bezüglich der Einfärbung der Ergänzungsmörtel konnte auf die bereits im Rahmen der Schlämmenrezeptierung eingesetzten Pigmente zurückgegriffen werden. Hier erwies sich – im Gegensatz zu den Schlämmen – der Einsatz des granulierten Schwarzpigmentes Granufin G77 als möglich, vermutlich, weil beim intensiven Durchmischen in der Trockenmörtelmischung aufgrund der vorhandenen Körnung die Granulierung aufgebrochen und das Pigment fein verteilt werden konnte.

Für die Applikation am Bauwerk wurden insgesamt 4 Grundeinfärbungen in jeweils 2 Farbabstufungen rezeptiert.



Abbildung 134: Farbmatrix der favorisierten Mörtelrezeptur

	2	3	5	10
a	GS 0,300 GH 0,100	GS 0,200 GH	GS 0,300 GH 0,050	SM 0,050
b	GS 0,150 GH 0,050	GS 0,100 GH	GS 0,150 GH 0,025	SM 0,025
c	GS 0,075 GH 0,025	GS 0,050 GH	GS 0,075 GH 0,012	SM 0,013
d	GS 0,038 GH 0,015	GS 0,025 GH	GS 0,035 GH 0,008	SM 0,007

Abbildung 135: Pigmentierung der favorisierten Mörtelrezeptur aus Abbildung 134 in M.-% Pigmentzugabe (GS...Granufin Schwarz G77, GH...Granufin Heiderot, SM...Kreidezeit Spinellmint)



Abbildung 136: Farbmatrix für die Einfärbung der Ergänzungsmörtel (endgültige Farbfestlegung)

	10	5	3	2
d	SM 0,007	GS 0,035 GH 0,008	GS 0,025 GH	GS 0,038 GH 0,015
c	SM 0,013	GS 0,075 GH 0,012	GS 0,050 GH	GS 0,075 GH 0,025

Abbildung 137: Pigmentierung der endgültig ausgewählten Farbvarianten aus Abbildung 136 in M.-% Pigmentzugabe (GS...Granufin Schwarz G77, GH...Granufin Heiderot, SM...Kreidezeit Spinell-mint)



Abbildung 138: Musterauftrag des eingefärbten Restauriermörtels, Pigmentierung



Abbildung 139: Detail aus Abbildung 138

6.4 Lasuren

Die farbliche Anpassung der aufgetragenen Schlämmen und Mörtelergänzungen sollte durch Lasuren vorgenommen werden. Die Lasuren dunkeln die relativ hellfarbig eingestellten Schlämmenoberflächen ab und passen sie den Umgebungsbereichen an. Durch Lasurauftrag kann eine gewisse Patinierung der Oberflächen nachgestellt bzw. ein farblich changierendes Erscheinungsbild von Steinoberflächen bei gleichfarbigem Schlämmenauftrag erzeugt werden.

Als Bindemittel wurde ein Acrylsystem (Wesutex D340) ausgewählt. Hinsichtlich der Bindemittelkonzentration musste ein Optimum zwischen Haltbarkeit und Dauerhaftigkeit der Lasur bzw. Glanzbildung gefunden werden – beide Charakteristika steigen bei entsprechender Bindemittelkonzentration.

Es wurden Testflächen auf Rhyolithuffoberflächen mit aufgetragenen Schlämmen angelegt.

Das acrylatische Bindemittel wurde in Konzentrationen von 5, 8 und 10 Vol.-% eingesetzt. Die Pigmentierung erfolgte durch Zugabe von Oxidschwarz und Umbra in verschiedenen Anteilen.

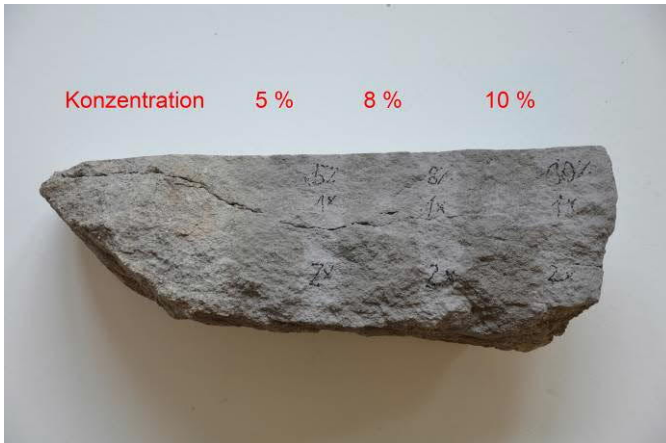


Abbildung 140: Testflächen zur Feststellung von Glanzbildung bei acrylatgebundenen Lasuraufträgen (oben einfacher, unten zweifacher Auftrag)

Im Ergebnis der Versuche konnte festgestellt werden, dass auch bei einer Bindemittelkonzentration von 10 Vol.-% und zweifachem Lasurauftrag keine Glanzbildung auftrat.

7 Erprobung der Materialien an Testflächen an der Kirche in Brotterode

7.1 Vorbereiten von Testflächen

In zwei Fassadenbereichen an der Kirche Brotterode wurden verschiedene Testflächen angelegt. Die Lage der Testflächen wurde unter den Gesichtspunkten zweier unterschiedlicher Expositionssituationen gewählt. Die Lage und Beschaffenheit der Testflächen sind in den folgenden Darstellungen sowie in ANLAGE 1 wiedergegeben.

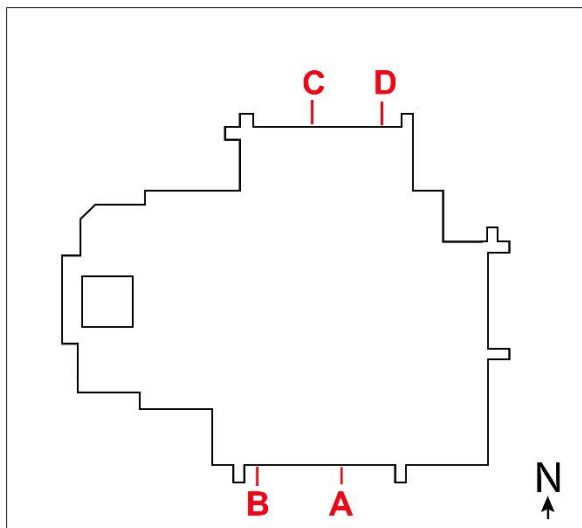


Abbildung 141: Lokalisierung der Testflächen zur Erprobung der Schlämmen und Mörtel



Abbildung 142: Testfläche A an der Südfassade vor Beginn der Bearbeitung



Abbildung 143: Testfläche B an der Südfassade vor Beginn der Bearbeitung

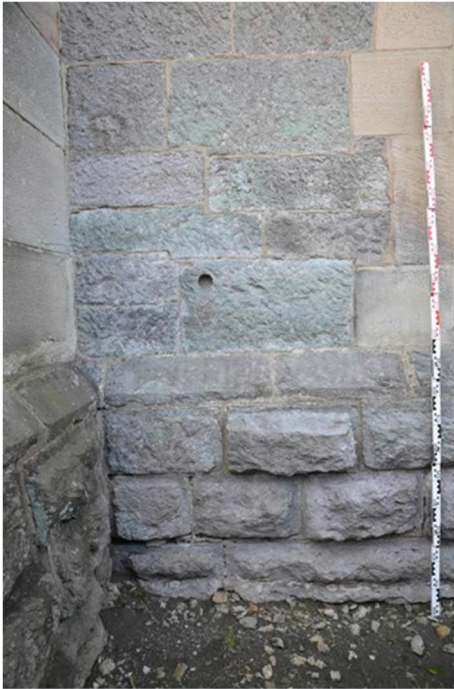


Abbildung 144: Testfläche C an der Nordfassade vor Beginn der Bearbeitung



Abbildung 145: Testfläche D an der Nordfassade vor Beginn der Bearbeitung

Die Testflächen ließen sich wie folgt charakterisieren:

Nordfassade (Testflächen C und D):

Stärkere Rückwitterung im Bereich des aufgehenden Fassadenmauerwerks oberhalb des Sockels. Hier lassen sich Abschuppungen und Schalenbildungen erkennen. Die Rückwitterung erfolgt flächig und bis zu einer Tiefe von 1...2 cm. Auf den Steinoberflächen sind biogener Bewuchs (Flechten) und lokale Salzausblühungen erkennbar. Der angrenzende Fugendeckmörtel steht gegenüber den zurückgewitterten Quaderoberflächen vor und löst sich ab.

Das bossierte Sockelmauerwerk ist demgegenüber in einem deutlich besseren Zustand.

Südfassade (Testflächen A und B):

Hier ist das aufgehende Fassadenmauerwerk deutlich besser erhalten als an der Nordfassade. Großflächig ist hier noch die ursprüngliche Oberflächenbearbeitung (Spitzhiebe) vorliegend. Im Sockelbereich sind dagegen die Schäden deutlich stärker ausgeprägt: Hier ist die Bossierung teilweise bis zum Randschlag weggewittert.

Vor dem Auftrag von Schlämmen bzw. Mörtelergänzungen wurden die Steinoberflächen mit Hilfe eines Trockenstrahlverfahrens gereinigt. Als Reinigungsmedium kam dabei Granatsand bzw. Schmelzkammerschlacke (Aluminiumsilikat, „Asilikos“, 0,09-0,25 mm) zur Anwendung. In Auswertung der gereinigten Flächen konnte festgestellt werden, dass sich bei Schmelzkammerschlacke aufgrund der Kornform (scharfkantig) ein deutlich besseres Ergebnis erzielen ließ, als bei Granatsand. Eine durch die Reinigung erkennbar aufgehellte Steinoberfläche lag vor allem im Sockelbereich der Testfläche an der Nordfassade vor. Es wurde jedoch auch festgestellt, dass nach der Reinigung mittels Strahlverfahren auf bereits zurückgewitterten Oberflächen noch starke Abblätterungen vorhanden waren. Der Auftrag von Schlämmen auf derartig geschädigten Oberflächen ist wenig dauerhaft. Aus diesem Grund wurden die Oberflächen nochmals mechanisch mittels Tellerbürsten bearbeitet und damit die Abblätterungen entfernt. Eine derartige Bearbeitung erfolgte allerdings nur an der nordseitigen Testfläche, wo keine ursprünglichen Oberflächenstrukturen mehr vorlagen.



Abbildung 146: Partikelstrahlreinigung an der südseitigen Testfläche



Abbildung 147: Sockelbereich der Testfläche an der Nordfassade nach der Reinigung mit Schmelzkammerschlacke (am rechten Bildrand ist noch ungereinigte Oberfläche sichtbar)



Abbildung 148: Bearbeitung der bereits partikelgestrahlten Testfläche an der Nordseite mittels Tellerbürste



Abbildung 149: Vergleich der Oberflächenstruktur: Quader links im Bild partikelgestrahlt, rechts im Bild partikelgestrahlt und zusätzlich mit Tellerbürste behandelt

7.2 Lokale Festigung bzw. festigenden Klebungen von Steinoberflächen mit Epoxidharz

An der Testfläche D an der Nordfassade (Abbildung 141) erfolgte die Festigung von Steinoberflächen mit einem verdünnten Epoxidharz. In Auswertung der Ergebnisse der Laboruntersuchungen wurde das Epoxidharz in zwei Verdünnungsstufen eingesetzt (5 bzw. 10 Vol.-%).

Die Rezeptierungen gibt die nachfolgende Tabelle 26 wieder.

Tabelle 26: Rezeptierungen der Oberflächenfestigungen mit Epoxidharz

	Epoxidharz	Verdünner	Anteil Epoxidharz in Lösung (Vol.-%)	Bemerkungen
Rezeptur 1	Harz und Härter: webac 4180N	webac Verdünner	5	einmaliger Pinselauftrag
Rezeptur 2	Harz und Härter: webac 4180N	webac Verdünner	10	einmaliger Pinselauftrag

Die Steinoberflächen wurden zuvor mit der Tellerbürste von losen Ablätterungen und Schalen befreit. Das Aufbringen der Epoxidharzlösung erfolgte durch einmaligen Auftrag mittels Pinsel. Unmittelbar nach dem Auftrag wurde die Oberfläche mit Zellstoff abgetupft, um überschüssige Lösung zu entfernen.

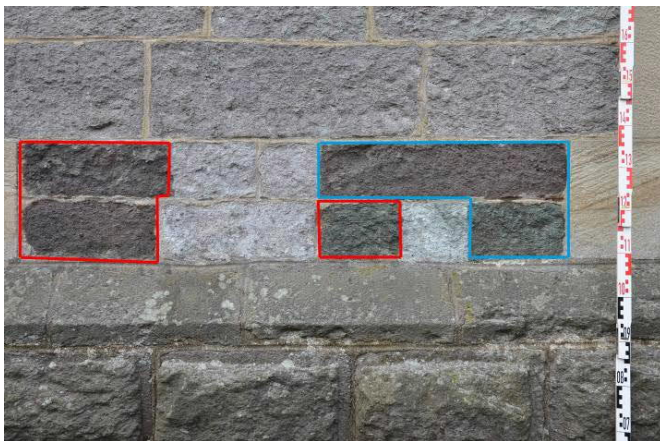


Abbildung 150: Testfläche unmittelbar nach Auftrag der Epoxidharzlösungen (blau umrandet: 5 Vol.-%; rot umrandet: 10 Vol.-%)



Abbildung 151: Testfläche nach ca. 3 Monaten Standzeit (Fläche blau umrandet)

Die Aufnahme der Testfläche für Oberflächenfestigungen nach 3 Monaten Standzeit zeigt, dass nach Verdunsten des Lösemittels und Aushärtung des Harzes keine bleibenden Verfärbungen auf der Steinoberfläche verbleiben. Dies war bereits aufgrund der im Labor durchgeführten Tests an Steinoberflächen so vermutet worden.

7.3 Kleben und Anbinden von Schalen

An der südseitigen Testfläche wurden musterhaft sich lösende Schalen mit noch ursprünglicher Oberfläche gesichert und an den Untergrund angebunden. Auch dabei wurden die durch die Laboruntersuchungen erzielten Ergebnisse praktisch angewandt.

Verwendung fand hier das Epoxidharz webac 4170 mit etwas höherer Viskosität.

Die Sicherung der Schalen erfolgte auf zwei Wegen:

1. Punktueller Hinterfüllen der Schale

Schalen wurden in einem Raster angebohrt (Bohrdurchmesser 4 mm) und durch die Bohrungen hindurch mit Epoxidharz verfüllt. Die Verfüllung erfolgte mittels Spritzen und nicht flächig, sondern punktuell. Das Epoxidharz wurde dabei mit einem Thixotropierungsmittel (pyrogene Kieselsäure) angedickt.

2. Klebung der Schalenränder

Das Epoxidharz wurde mittels Kanülen seitlich hinter die Schalen gespritzt. Aufgrund der durch Verwitterung aufgelockerten Struktur der Schalenrückseite und des Zwischenraumes war ein gutes Eindringverhalten festzustellen.

Tabelle 27: Rezeptierungen der Injektagen und Hinterfüllungen mit Epoxidharz

	Epoxidharz	Stell- und Thixotropierungsmittel	Anteil Stellmittelzugabe in M.-%	Bemerkungen
Rezeptur für punktueller Anbinden von Schalen im Rastersystem	Harz und Härter: webac 4170N	webac ST 300	4,0	Einspritzen mittels Spritzen durch Injektagebohrungen
Rezeptur für Verklebung von Schalen von der Seite her	Harz und Härter: webac 4170N	-	-	Vorsichtiges Einspritzen mit Kanülen von der Seite her



Abbildung 152: Rasterförmiges Anbohren einer Schale für Injektageöffnungen zum Hinterkleben / Hinterfüllen



Abbildung 153: Injektage und Hinterklebung von Schalenrändern



Abbildung 154: Detail der randseitigen Injektage der Oberflächenschale: Das unverdünnte Epoxidharz ist in das angrenzende Riss- und Spaltensystem der Schale migriert.

7.4 Aufbringen von Schlämmen auf Steinoberflächen

Steinoberflächen im aufgehenden Mauerwerk innerhalb der Testflächen A, B und D mit unterschiedlicher Oberflächenstruktur (abgewittert an der Nordseite, mit noch vorhandener ursprünglicher Oberflächenformulierung an der Südfassade) wurden mit den im Zuge der Laborversuche entwickelten Schlämmen behandelt. Es wurden drei Grundfärbungen der Schlämmen eingesetzt:

Schlämme „violettgrau“:	Farbton 5a
Schlämme „altrosa“:	Farbton 5d
Schlämme „hellgrün“:	Farbton 13c

(Der Farbton 5d wurde nur sehr vorsichtig und in geringem Umfang eingesetzt, da er schnell farblich dominierend wirkte.)

Der Auftrag der Schlämme erfolgte nach dem flächigen Auftrag eines Vornetzers (Acrylatdispersion wesutec D340, Wirkstoffgehalt 2,0 Vol.-% in Wasser) nass-in-nass. Ein schnelles Arbeiten war insbesondere in besonnten Bereichen notwendig, da nach dem Einziehen des Vornetzers in die Steinoberfläche der Schlämmenauftrag deutlich erschwert wurde und Schichtdickenerhöhungen auftraten und deutliche Pinselspuren beim Verstrich entstanden. Im nassen Zustand war die Schlämme halbtransparent, so dass leicht der Eindruck einer zu geringen Schichtdicke entstehen konnte. Dieser Eindruck verlor sich allerdings im Zuge des Trocknens durch eine zunehmende Opazität.

Es zeigte sich, dass maximal auf der Fläche eines Steinquaders Vornetzen und Schlämmenauftrag sukzessive ausgeführt werden konnten, in besonnten Bereichen war die maximal in einem Schritt bearbeitbare Fläche noch geringer. Der Schlämmenauftrag erfolgte am besten mit einem größeren Flach- oder Rundpinsel, wobei ein gutes Einarbeiten in die Oberfläche wichtig war. Innerhalb der Oberflächen eines Steinquaders war es möglich, unterschiedlich eingefärbte Schlämmen gegenseitig einzuarbeiten, das erzeugte eine lebendigere Oberfläche.

Beim Arbeiten in größeren Flächen stellte es sich heraus, dass es evtl. ratsam ist, die Farbpalette der Schlämmen noch etwas zu erweitern, indem teilweise ein etwas rötlicherer Farbton (Farbton 5d) anteilig zugemischt wurde.

Ein Überstrahlen der geschlämmten Flächen mittels Partikelstrahlverfahren verbesserte nochmals die Oberflächenstruktur im Vergleich mit unbearbeiteten Steinoberflächen. Diese Maßnahmen ist jedoch auch mit einem deutlichen Materialabtrag verbunden und verschlechtert somit die Schutzwirkung der Schlämme.

7.5 Ergänzungen von Fehlstellen mit Restauriermörteln

Große Fehlstellen im Bereich der Testflächen A, B und D am Gebäude wurden mit Restauriermörteln ergänzt. Auch hier wurden die in den Laborversuchen als geeignet befundenen Mörtelrezepturen in zwei Grundfarbtönen eingesetzt:

Restauriermörtel „rötlich“: Farbrezeptur 2c

Restauriermörtel „grünlich“: Farbrezeptur 10c

Die Farbtöne der Restauriermörtel sind untereinander in beliebigem Verhältnis mischbar, sie sind allerdings etwas heller eingestellt als das umgebende Steinmaterial. Dadurch ist eine abschließende farbliche Anpassung an die Umgebungsbereiche mittels Lasur einfacher.

In Bereichen aufzutragenden Restauriermörtels wurden die Steinflächen mit einer Acrylatdispersion vorgeätzt (wesutec D340, Wirkstoffgehalt 2,0 Vol.-% in Wasser). Danach erfolgte das Auftragen des Restauriermörtels. Die Ergänzungen wurden nach Erhärtung geschliffen bzw. steinmetzmäßig bearbeitet. Bei der Bearbeitung stellte es sich heraus, dass es technologisch vorteilhafter ist, zuerst große Fehlstellen mit einem Restauriermörtel zu schließen und die überarbeiteten Ergänzungen inkl. der gesamten angrenzenden Werkstückoberflächen mit einer Schlämme zu überziehen.

7.6 Lasur der geschlammten Werkstückoberflächen

Ergänzungen mit Restauriermörtel und Schlämmen sind aus verarbeitungstechnischen Gründen nur in wenigen Grundfarbtönen aufgebracht worden. Um hier eine Anpassung an den Umgebungsbestand zu ermöglichen, wurden diese Flächen mit einer Lasur behandelt. Bindemittelsystem und Pigmente entsprechen den Tests der Laborversuche.

Der Lasurauftrag erfolgte mit verschiedenen Pinseln in mehrfachem Auftrag. Um eine gute optische Anpassung an den Umgebungsbestand zu erzielen, waren bestimmte Auftragstechniken notwendig. Auch wurden die Pigmentanteile und deren Konzentration in der Lasur vor Ort angepasst. Beim Praxiseinsatz ist es durchaus realisierbar, dass größere Mengen von Lasuren hergestellt werden, die dann entsprechend dem Anwendungsbereich einsetzbar und auch untereinander mischbar sind.



Abbildung 155: Detail des Fassadenmauerwerks der südseitigen Testfläche vor Auftrag der Schlämme



Abbildung 156: Schlämmenauftrag auf zwei benachbarten Steinoberflächen: Während die Schichtdicke links zu hoch und daher ein „Verschmieren“ der Oberfläche festzustellen ist, lassen sich im Stein vorhandene Oberflächenstrukturen bei dünnschichtigerem Auftrag (im Bild rechts) deutlicher erkennen.



Abbildung 157: Werkstück des Bossenmauerwerks vom Sockel (Testfläche A) vor dem Schlämmenauftrag



Abbildung 158: Werkstück aus Abbildung 157 nach dem Auftrag der Schlämme



Abbildung 159: Werkstück des Sockelprofils (Testfläche A) vor dem Schlämmenauftrag



Abbildung 160: Werkstück aus Abbildung 159 nach dem Auftrag der Schlämme (der rechte Teil des Werkstückes ist noch nicht lasiert, hier wurde der grüne Grundfarbton der Schlämme eingesetzt - der linke Teil des Werkstückes ist geschlämmt und lasiert)



Abbildung 161: Teil der geschlämmten Oberfläche aus Abbildung 160 mit anschließend überstrahltem Bereich (Teilfläche rechts): Hier entstand durch die Überarbeitung eine sehr unruhige Flächenwirkung.



Abbildung 162: Befeuchtung einer Teilfläche des Werkstückes aus Abbildung 161: Steinoberfläche und Schlämme sind bei Befeuchtung ähnlich stark gedunkelt – eine starke Kontrastwirkung tritt nicht auf.



Abbildung 163: Werkstück des Sockels mit bereits abgewitterter Bossierung (Testfläche A) vor dem Schlämmenauftrag



Abbildung 164: Werkstück aus Abbildung 163 nach dem Auftrag der Schlämme (nur im linken Teil der Fläche)

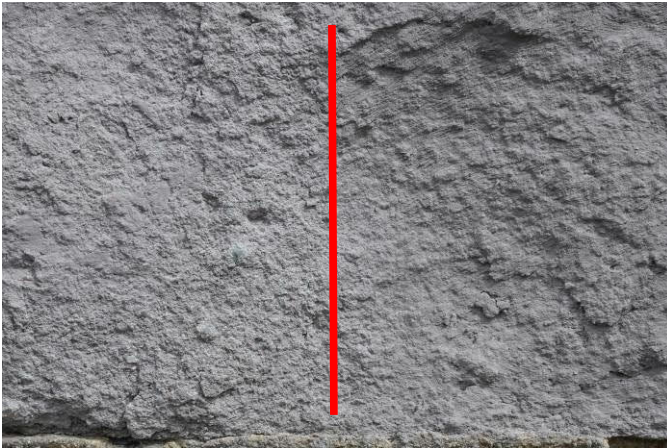


Abbildung 165: Detail der geschlammten Fläche des Sockelwerkstückes aus Abbildung 164 mit nachträglich überstrahlter Fläche (im Bild links): Eine verbesserte optische Oberflächenwirkung wird mit starker Schichtdickenverringerung erkauf.



Abbildung 166: Befeuchtung einer Teilfläche des Werkstückes aus Abbildung 164: Steinoberfläche und Schlämme sind auch hier ohne großen farblichen Kontrast.



Abbildung 167: Detailaufnahme einer frisch aufgetragenen, noch leicht durchscheinend wirkenden Schlämme (Testfläche D, Schlämme auf den Quader oben im Bild aufgebracht)



Abbildung 168: Mörtelergänzungen von Fehlstellen nach der Überarbeitung (Testfläche D)



Abbildung 169: Gleicher Bereich wie Abbildung 168 nach Schlämmenauftrag auf der gesamten Steinoberfläche



Abbildung 170: Gleicher Bereich wie Abbildung 168 nach Lasur



Abbildung 171: Teil des Fassadenmauerwerkes an der Südfassade (Testfläche B) vor Auftrag der Schlämme



Abbildung 172: Gleicher Bereich wie in Abbildung 171 nach Schlämmenauftrag auf einem Steinquader (Auftragsfläche gedrittelt: v.l.n.r. Schlämme mit 0,15, 0,2 und 0,3 M.-% Zinkstearat ausgerüstet)



Abbildung 173: Benetzungsprobe des geschlammten und retuschierten Steinquaders aus Abbildung 172. Das Wasser läuft auf den wasserhemmend ausgerüsteten Schlämmen ab. Auf der Oberfläche des unbehandelten Steinquaders darunter dringt es dagegen sofort ein.

8 Maßnahmenfestlegungen für die Arbeiten an der Musterachse

Im Ergebnis der Auswertung der Musterflächen an der Nord- und Südfassade des Kirchengebäudes wurden die nachfolgend formulierten Festlegungen für die geplanten konservatorischen und restauratorischen Maßnahmen an der Musterachse an der Nordwestseite der Kirche getroffen.

Die konzeptionellen Vorgaben wurden den mit der fachlichen Planung der Maßnahme betrauten Restauratoren übergeben.

8.1 Reinigung

Die Reinigung sämtlicher Steinoberflächen am aufgehenden Fassadenmauerwerk erfolgt mittels eines Trockenstrahlverfahrens (Wirbelstrahlverfahren). Dabei hat sich als Strahlgut Schmelzkammergranulat als optimal erwiesen.

Strahlgut: Schmelzkammergranulat (Aluminiumsilikatglasschmelze)

Körnung: 0,09 – 0,25 mm

Vor der Reinigung sind geschädigte Fugenmörtel manuell mechanisch und ohne Beschädigung der Fugenflanken zu entfernen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich oftmals hinter einer vermeintlich intakten Fugenmörteloberfläche stark entfestigte Zonen anschließen bzw. die festen Fugenmörtel sich vom weicheren Versatzmörtel lösen.

Nach der Trockenstrahlreinigung erfolgt in den Bereichen, in denen Schlämmen aufgebracht werden oder Mörtelergänzungen erfolgen sollen (die Festlegungen hierzu trifft der planende Restaurator), ein Entfernen der losen Abblätterungen bzw. oberflächigen Bröckelzerfalls mittels Drahtbürste (Langsamläufer mit Tellerbürste). Diese, mit Materialverlust einhergehende Bearbeitung beschränkt sich naturgemäß ausschließlich auf Bereiche mit bereits vorangeschrittener Rückwitterung, d.h. dem vollständigen Verlust von ursprünglicher, bearbeiteter Steinoberfläche. Eine derartige Bearbeitung der Steinoberflächen ist erforderlich, da eine Anbindung / Fixierung der losen Abblätterungen an der Oberfläche durch einen anschließenden Schlämmenauftrag nicht möglich ist.

8.2 Festigung

In Teilbereichen, in denen noch der Bestand einer ursprünglichen, bearbeiteten Steinoberfläche vorliegt und in denen Konservierungsbedarf aufgrund einer oberflächigen Gefügeschwächung besteht, sollten Festigungen erfolgen. Diese sind ausschließlich als lokale, geringflächige Maßnahmen vorzusehen. Die Festlegungen hierzu trifft wieder der planende Restaurator.

Aufgrund der Struktur der geschädigten Oberflächen, des Schadbildes und des Schädigungsprinzips ist eine klebende Festigung mit Hilfe eines verdünnten Epoxidharzes vorzunehmen.

Epoxidharz: webac 4180N

Härter: webac 4180N

Verdünner: webac Verdünner

Konzentration: 5 Vol.-% Harz-Härter-Anteil in der Lösung

Der Auftrag des Epoxidharzes erfolgt mittels Pinseltränkung bis zur Sättigung des Bereiches. Sämtliche getränkten Oberflächen sind unmittelbar nach dem Auftrag mit dem Verdünner nachzuwaschen bzw. mit Zellstoff abzutupfen. Die behandelten Oberflächen sind vor Staubeinwirkung während der Reaktion und Aushärtung zu schützen.

8.3 Kleben von Rissen und Schalen

Risse und beginnende Schalenbildungen, welche noch nicht vom Untergrundmaterial abstehen, werden mit einem niedrigviskosen Epoxidharz geklebt. Der Eintrag des Epoxidharzes erfolgt dabei mittels Spritzen und Kanülen. Ein Herauslaufen des Harzes muss verhindert werden, erforderlichenfalls durch temporären und reversiblen Verschluss der Risse mittels PU-Heißkleber und dem Setzen von Packern.

Epoxidharz: webac 4170N
Härter: webac 4170N

Schalen, die bereits vom Untergrund abstehen, müssen punktuell wieder mit diesem verbunden werden. Dabei werden die Schalen in einem festzulegenden Raster angebohrt (Bohrdurchmesser 4 mm) und durch die Bohrungen mit einem angedickten Epoxidharz mittels Spritzen (Einmalspritzen mit Luer-Anschluss) mit dem Untergrund verbunden. Die Bohrlöcher werden nach dem Aushärten des Harzes mit Restauriermörtel verschlossen.

Epoxidharz: webac 4170N
Härter: webac 4170N
Verdicker: webac ST300 (Stell- und Thixotropierungsmittel)
Zugabeanteil Verdicker zum Harz: 4,0 M.-%

8.4 Schlämmen von Oberflächen

Werksteinoberflächen mit fortgeschrittener Schädigung und Rückwitterung werden mit einer Schlämme überzogen. Die Festlegung hinsichtlich der zu schlämmenden Steinoberflächen wird durch den planenden Restaurator getroffen.

Die Steinoberflächen werden mit einer acrylatgebundenen Schlämme überzogen.

Die Einfärbung der Schlämmen erfolgt in 3 Grundfarbtönen, die untereinander während des Auftrags mischbar sind, um ein bewegteres Erscheinungsbild zu erzielen (s. Tabelle 29). Dabei soll der Farbton 5d nur untergeordnet und sehr sparsam eingesetzt werden, da er sehr schnell dominiert und nach einer angleichenden Retusche / Lasur zu dunkel wirkt.

Die Trockenmörtelmischung muss trocken vorgemischt werden, um eine optimale Verteilung der teilweise granulierten Pigmente zu ermöglichen. Nach Bindemittelzugabe ist der Frischmörtel möglichst intensiv zu mischen, am besten eignet sich hierfür ein Handrührgerät (Mischdauer mind. 2 Minuten). Die frische Schlämme sollte ohne farbige Schlieren erscheinen. Es ist wichtig, dass nur relativ kleine Mengen angemischt werden. Sollte das Material wie geplant trocken vorgemischt und bereits pigmentiert bezogen werden, ist darauf zu achten, dass nur entsprechend geringe Mengeneinheiten rezeptiert und abgefüllt werden.

Die Steinoberflächen werden bis zur Sättigung vorgezogen. Wichtig ist, den Vornetzungsbereich so zu dimensionieren, dass ein anschließender Auftrag der Schlämme möglich wird, ohne dass der Vornetzer einzieht. Sicheres Anzeichen hierfür ist, dass die Schlämme dickschichtiger aufliegt und Pinselspuren zeigt. Spätestens zu diesem Zeitpunkt muss der Schlammenauftrag beendet werden. Es hat sich gezeigt, dass maximal die Fläche eines Werksteinquaders in einem Zug vorgezogen und geschlämt werden kann. Im nassen Zustand muss die Schlämme halbtransparent erscheinen, dann ist ein optimaler Auftrag gegeben.

Der Auftrag der Schlämme erfolgt mittels geeigneter Rund- und Borstenpinsel einmassierend im Kreuzschlag.

Geschlämt werden jeweils immer die gesamten Steinoberflächen. In Bereichen von Mörtelergänzungen sind zuerst diese auszuführen und abschließend die gesamte Oberfläche mit einer Schlämme zu überziehen.

Tabelle 28: Rezeptur Trockenmischung Schlämme

Bestandteil	Anteile im Trockenmörtel in M.-%
Quarzsand SF 300 (Quarzwerke Frechen)	19,7
Quarzsand W12 (Quarzwerke Frechen)	19,7
Quarzsand F36 (Quarzwerke Frechen)	56,8
Kaolin (Dorfner Gruppe)	3,8

Tabelle 29: Einfärbung der Schlämme

Farbton	violettgrau	altrosa	hellgrün
Rezepturnummer	5a	5d	13c
Zugabe in M.-%, bezogen auf Trockenmischung			
Pigment Granufin Heiderot	0,05	0,15	
Pigment Eisenoxidschwarz	0,3	0,6	0,1
Pigment Kreidezeit Spinellmint			0,1

Bindemittel: Acrylatdispersion wesutex D340

Konzentration: 30 Vol.-% Feststoffanteil in Wasser

Zugabeanteil Bindemittel an Trockenmischung Schlämme: 22 M.-% Dispersion (Dispersion mit 30%igem Feststoffanteil)

Zugabeanteil Zinkstearat an Trockenmischung: 0,2 M.-%

Vornetzer: Acrylatdispersion wesutex D340, Konzentration: 2,0 Vol.-% Feststoffanteil in Wasser

8.5 Ergänzungen mit Restauriermörteln

Große Fehlstellen im aufgehenden Mauerwerk werden mit Restauriermörteln ergänzt. Auch hier erfolgt die Festlegung der zu ergänzenden Bereiche durch den planenden Restaurator.

Die Ergänzungen werden mit einem acrylatgebundenen Mörtel durchgeführt.

Die zu ergänzenden Bereiche sind mit dem Pinsel vorzunetzen. Unmittelbar danach erfolgt der Auftrag des Ergänzungsmörtels. Aufgrund der Ausrüstung des Mörtels mit einem Stearat ist auf eine sorgfältige und lange Durchmischung des Mörtels bei zweistufiger Bindemittelzugabe zu achten. Der angemischte Frischmörtel hat eine leicht krümelige Struktur und lässt sich weniger gut verarbeiten, als dies normalerweise bei acrylatgebundenen Mörteln üblich ist. Es wird empfohlen, maximal 300 g Trockenmörtel in einem Arbeitsgang in einem dafür geeigneten Gefäß (größerer Mischbecher) anzurühren. Das Mischen kann auch hier durch Einsatz eines Handrührgerätes deutlich verbessert werden. In diesem Zusammenhang ist auch gewährleistet, dass ein homogenes Verteilen / Vermischen der granulierten Pigmente erfolgt. Gleichfalls verbessert sich durch das intensive Durchmischen die Konsistenz und Verarbeitungsfreundlichkeit des Mörtels.

Der Mörtel wird mittels Antragspatels vorsichtig auf die zu ergänzenden Flächen aufgebracht und ange-drückt. Es ist nur eine maximale Auftragsstärke von 1...1,5 cm in einem Auftrag realisierbar, ansonsten ist mehrlagig zu arbeiten (ausreichende Austrocknungszeit beachten).

Bei senkrechten Flächen ist vor dem Auftrag des Restauriermörtels das Aufbringen eines Haftvermittlers in Form einer Schlämme möglich, um das Aufbringen des Restauriermörtels zu erleichtern. Als Rezepturvorgabe für die acrylatgebundene Schlämme gelten die Festlegungen unter Punkt 8.4, allerdings ohne die zusätzliche Zugabe von Zinkstearat.

Bei einem dichteren, wasserundurchlässigeren Untergrund im Auftragsbereich sind deutlich längere Aushärtezeiten einzuplanen (im Laborversuch bis zu 10 Tage!).

Nach Aushärtung ist der Ergänzungsmörtel durch Schleifen oder mittels scharfem Steinmetzwerkzeug zu überarbeiten.

Rezeptur Ergänzungsmörtel:

Acrylatmörtel-Grundrezeptur A5/00

Bindemittel: Acrylatdispersion wesutex D340

Konzentration: 30 Vol.-% Feststoffanteil in Wasser

Zugabeanteil an Trockenmischung Schlämme:

85 ml Dispersion (30 Vol.-% Feststoffanteil) / 1 kg Trockenmischung

Zugabeanteil Zinkstearat an Trockenmischung: 0,15 M.-%

Vornetzer: Acrylatdispersion wesutex D340, Konzentration: 2,0 Vol.-% Feststoffanteil in Wasser

Die Mörtel sind in zwei Grundfarbtönen eingefärbt einzusetzen:

Restauriermörtel „rötlich“: Farbrezeptur 2c

Restauriermörtel „grünlich“: Farbrezeptur 10c

Die Farbtöne der Restauriermörtel sind untereinander in beliebigem Verhältnis mischbar.

Tabelle 30: Einfärbung des Ergänzungsmörtels

Farbton	rötlich	grünlich
Rezepturnummer	2c	10c
Zugabe in M.-%, bezogen auf Trockenmischung		
Pigment Granufin Heiderot	0,075	
Pigment Eisenoxidschwarz	0,025	
Pigment Kreidezeit Spinellmint		0,013

8.6 Auftrag von Retuschen / Lasuren

Die farbliche Anpassung der aufgetragenen Schlämmen und Mörtelergänzungen erfolgt durch Lasuren. Die Lasuren dunkeln die relativ hellfarbig eingestellten Schlämmenoberflächen ab und passen sie den Umgebungsbereichen an.

Der Auftrag der Lasuren erfolgt mittels Pinsel.

Mit einer Mischung aus Eisenoxidschwarz und ungebranntem Umbra (Farbton etwa aqua sporca) konnten die besten farblichen Anpassungen erzielt werden.

Lasurpigmente: Eisenoxidschwarz, Umbra

Bindemittel: Acrylatdispersion wesutex D340

Konzentration: 8,0 Vol.-% Feststoffanteil in Wasser

In Bereichen noch vorhandenen alten Verfugmörtels ist dieser ebenfalls durch Lasurauftrag farblich zu vereinheitlichen.

9 Realisierung der Maßnahmen an der Musterachse

Die Musterachse wurde im Bereich des nordwestlichen Turmanbaues der Kirche angelegt. Für die Auswahl dieser Fassadenbereiche waren folgende Überlegungen ausschlaggebend:

- Nord- und Westfassade des Gebäudeabschnittes sind unterschiedlichen Expositionen und damit einhergehenden Schadumfängen und Schadbildern ausgesetzt.
- Der nordwestliche Gebäudeteil ist der am wenigsten einsichtige und gestaltungswirksame Bereich des Kirchenbaues.

Die Bereiche der Musterachse sind in den nachfolgenden Abbildungen lokalisiert:

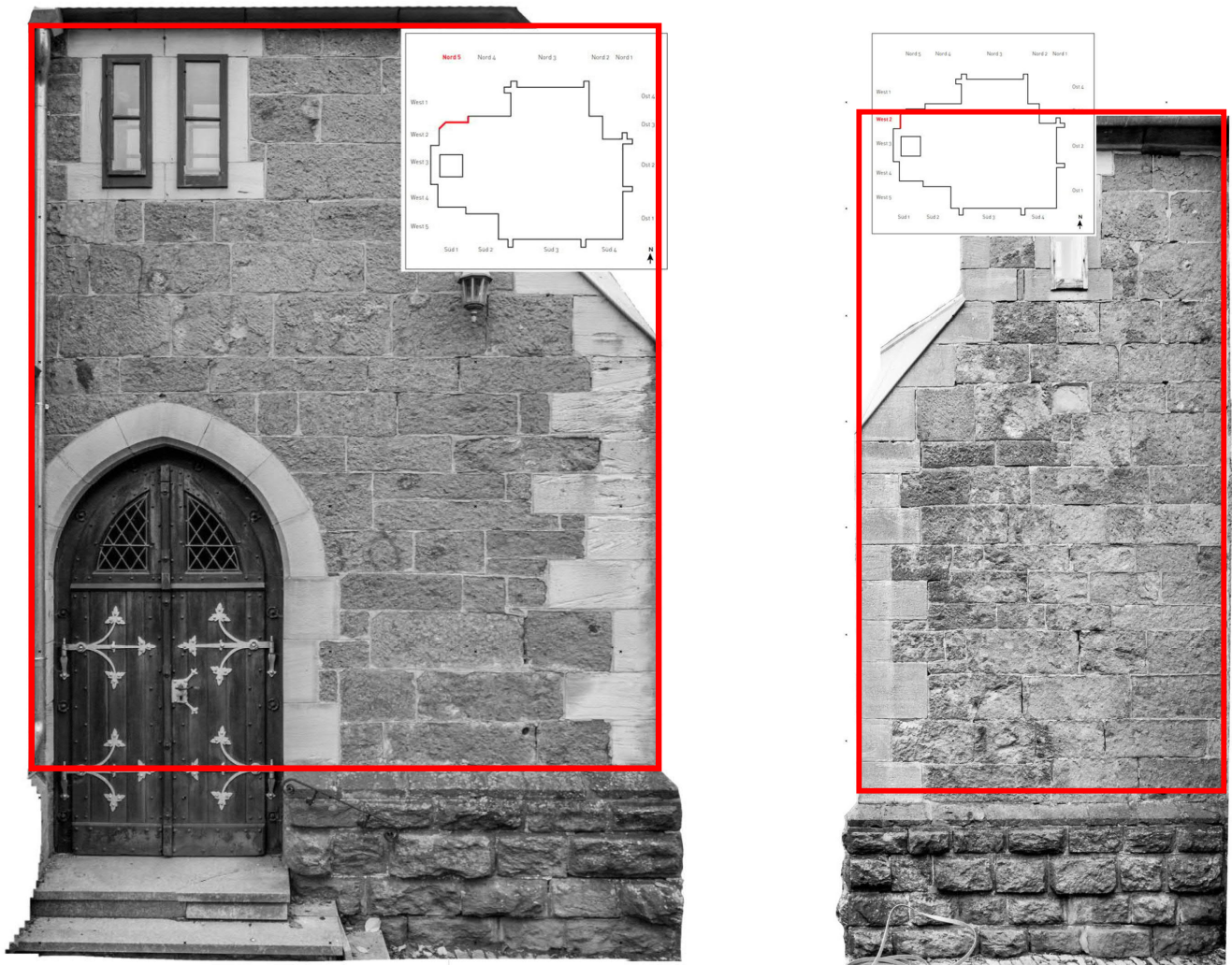


Abbildung 174: Bearbeitete Fassadenflächen der Musterachse – links die Nordfassade, rechts die Westfassade des nordwestlichen Turmanbaues.

Die Fassadenflächen wurden im Zeitraum Herbst 2018 – Frühjahr 2019 bearbeitet.

An der Musterachse sollten die im Rahmen der Testflächen gewonnenen Erfahrungen bei der konservatorischen und restauratorischen Bearbeitung der Steinoberflächen in größerem Maßstab umgesetzt werden. In diesem Zusammenhang war von entscheidender Bedeutung, dass die Maßnahmen nicht einen explizit restauratorischen Anspruch erfordern, sondern durch spezielle Fachfirmen im Bereich Baudenkmalpflege und Bauwerkssanierung ausgeführt werden konnten.

Im Rahmen der an der Musterachse ausgeführten Arbeiten konnten folgende Beobachtungen und Feststellungen gemacht werden, die dann perspektivisch für die weiteren geplanten Maßnahmen an den Kirchenfassaden umgesetzt werden sollten:

- Festigungen von losen Schalen mit einem verdünnten Epoxidharz sollten nur in Ausnahmefällen an der Fassade vorgenommen werden, da hier bei einem Fortschreiten des Verwitterungsprozesses hinter den gefestigten Oberflächenbereich die Gefahr des Ablösens größerer, kompakter Schalen nicht auszuschließen ist.
- Bezüglich der Auftragsstärke der Schlämmen auf den Steinoberflächen ist ein Optimum zwischen der damit verbundenen Schutzwirkung und ästhetisch-denkmalpflegerischen Aspekten zu finden: Größere Auftragsstärken haben eine deutlichere Veränderung des optischen Eindruckes der behandelten Steinoberflächen gegenüber dem Vorzustand zur Folge.
- Größeres Augenmerk muss auf die sorgfältige Ausführung der notwendigen Retusche geschlammter Steinoberflächen gelegt werden. Hier zeigt insbesondere die Nordfassade des bearbeiteten Turmanbaues, dass ein „Zuviel“ an Retuschen dem zu erzielenden Gesamteindruck nicht unbedingt förderlich ist.

Insgesamt ist jedoch das Ergebnis der Maßnahmen an der Musterachse als sehr gut zu beurteilen.



Abbildung 175: Detail der im Rahmen der Musterachse zu bearbeitenden Fassadenfläche an der Westseite des Turmanbaues nach der Partikelstrahlreinigung



Abbildung 176: Fassadenfläche an Nordseite des Turmanbaues nach Reinigung, dem Ausräumen der Fugen und der partiellen Festigung.



Abbildung 177: Fassadendetail nach partieller Neuverfugung



Abbildung 178: Fassadendetail Mörtelergänzung einer Fugenflanke und dünnsschichtig ausgeführtem Schlämmen der Steinoberflächen



Abbildung 179: Unterer Bereich der Nordfassade nach Fertigstellung der Maßnahmen



Abbildung 180: Westlicher Teil der Nordfassade (unbearbeitet, links im Bild) und Nordfassade des Turmanbaues nach Fertigstellung der Maßnahmen (rechts im Bild) im Vergleich

10 Monitoring

An ausgewählten Steinoberflächen erfolgten Untersuchungen zur Beurteilung des Materialabtrages durch Reinigung bzw. der Dicke der hier aufgetragenen Schlämmen.

Gereinigt wurden die Flächen, die etwa die Größe des Formates DIN A4 besitzen, mittels abrasiven Strahlverfahrens (Asilikos). Der Schlämmenauftrag erfolgte in der Technologie, wie sie auch an der Musterachse zur Ausführung kam.

Die Untersuchungen wurden mittels Streifenlichtscannings durchgeführt. Hierfür wurde das optische 3D-Scan-system ATOS Core der Fa. GOM GmbH eingesetzt.

Um den Materialabtrag im Zuge der Reinigung bzw. die Auftragsdicke der Schlämmen ermitteln zu können, erfolgte an den zuvor festgelegten Musterflächen jeweils ein Scan vor und nach der Strahlreinigung sowie nach Auftrag der Schlämme.

Mittels zuvor aufgebrachter Passpunkte konnte der Materialab- bzw.-auftrag der Oberflächen ermittelt und visuell dargestellt werden.

Die Auswahl der Messflächen erfolgte unter Berücksichtigung unterschiedlicher Schädigungsgrade und Materialvariationen.

Die Lage der Messflächen und die Beschreibung sind in den nachfolgenden Abbildungen und in den Kartierungen in der Anlage zum vorliegenden Bericht wiedergegeben.

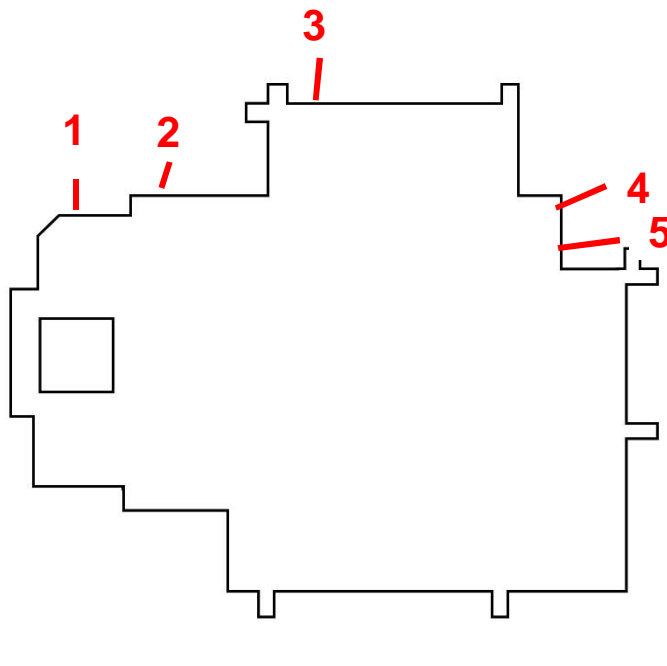


Abbildung 181: Grundrisschema der Kirche mit Lokalisierung der Messflächen



Abbildung 182: Messstand für das Streifenlichtscanning



Abbildung 183: Scannen der Messfläche 3 an der Nordseite



Abbildung 184: Messfläche 1 vor der Reinigung (violettgraue Variation, stark abgriesende Oberflächen)



Abbildung 185: Messfläche 1 nach der Reinigung



Abbildung 186: Messfläche 2 vor der Reinigung (violettgraue Variation, relativ gut erhaltene Oberfläche mit Bearbeitungsspuren)



Abbildung 187: Messfläche 2 nach der Reinigung



Abbildung 188: Messfläche 3 vor der Reinigung (violettgraue Variation, sehr gut erhaltene Oberfläche mit Bearbeitungsspuren)



Abbildung 189: Messfläche 3 nach der Reinigung



Abbildung 190: Messfläche 4 vor der Reinigung (grünfarbene Variation, sehr gut erhaltene Oberfläche mit Bearbeitungsspuren)



Abbildung 191: Messfläche 4 nach der Reinigung



Abbildung 192: Messfläche 5 vor der Reinigung (violettgraue Variation, Oberfläche mit starker Rückwitterung und Schalenbildung)



Abbildung 193: Messfläche 5 nach der Reinigung

Leider konnten nicht von allen Messflächen auswertbare Scans erhalten werden, da einige Passpunkte zwischen den einzelnen Messkampagnen entfernt worden waren.

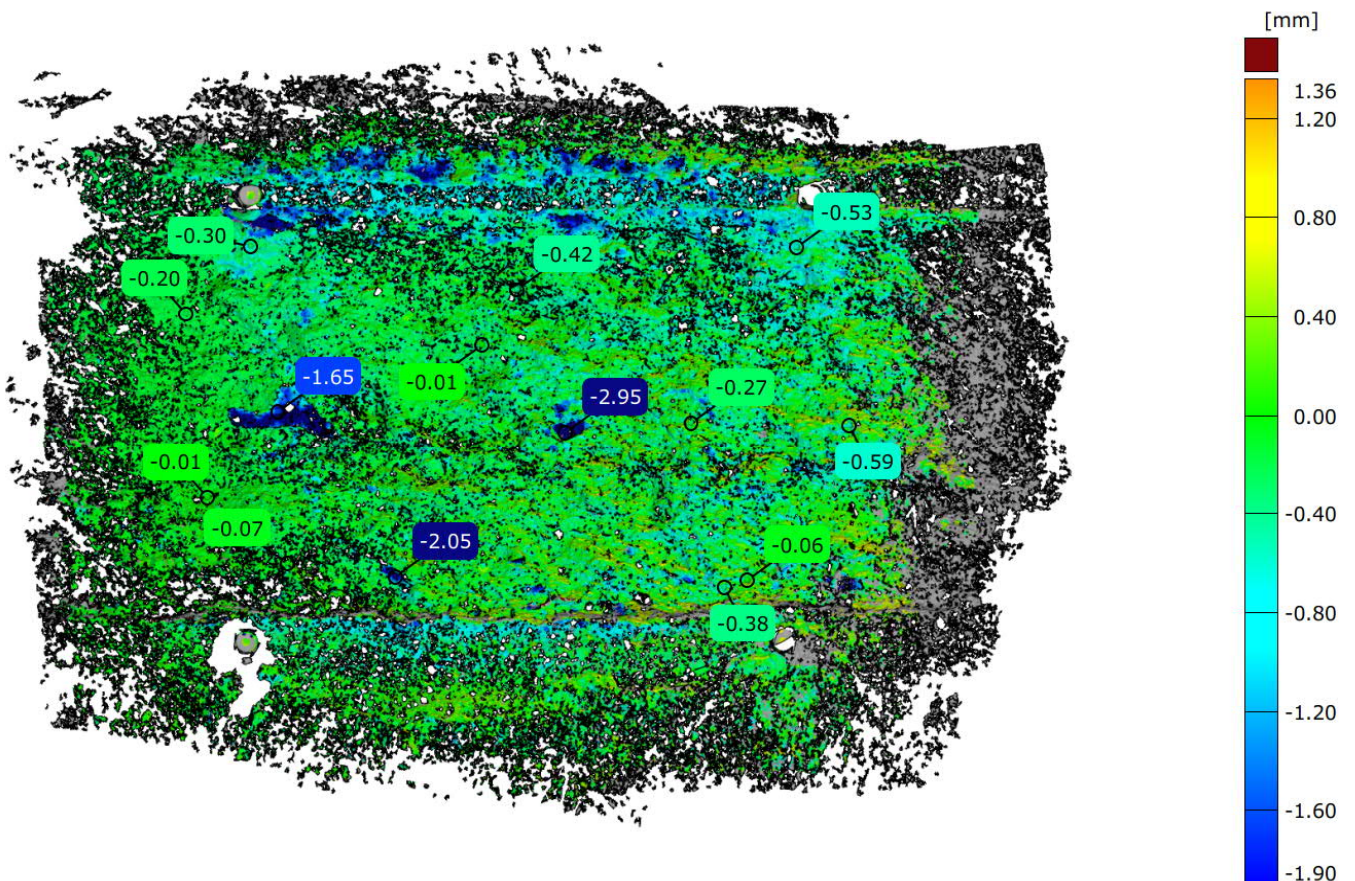


Abbildung 194: Messfläche 2 mit Darstellung der Abtragsraten der Trockenstrahlreinigung gegenüber der ungereinigten Fläche (Maßangabe in mm)

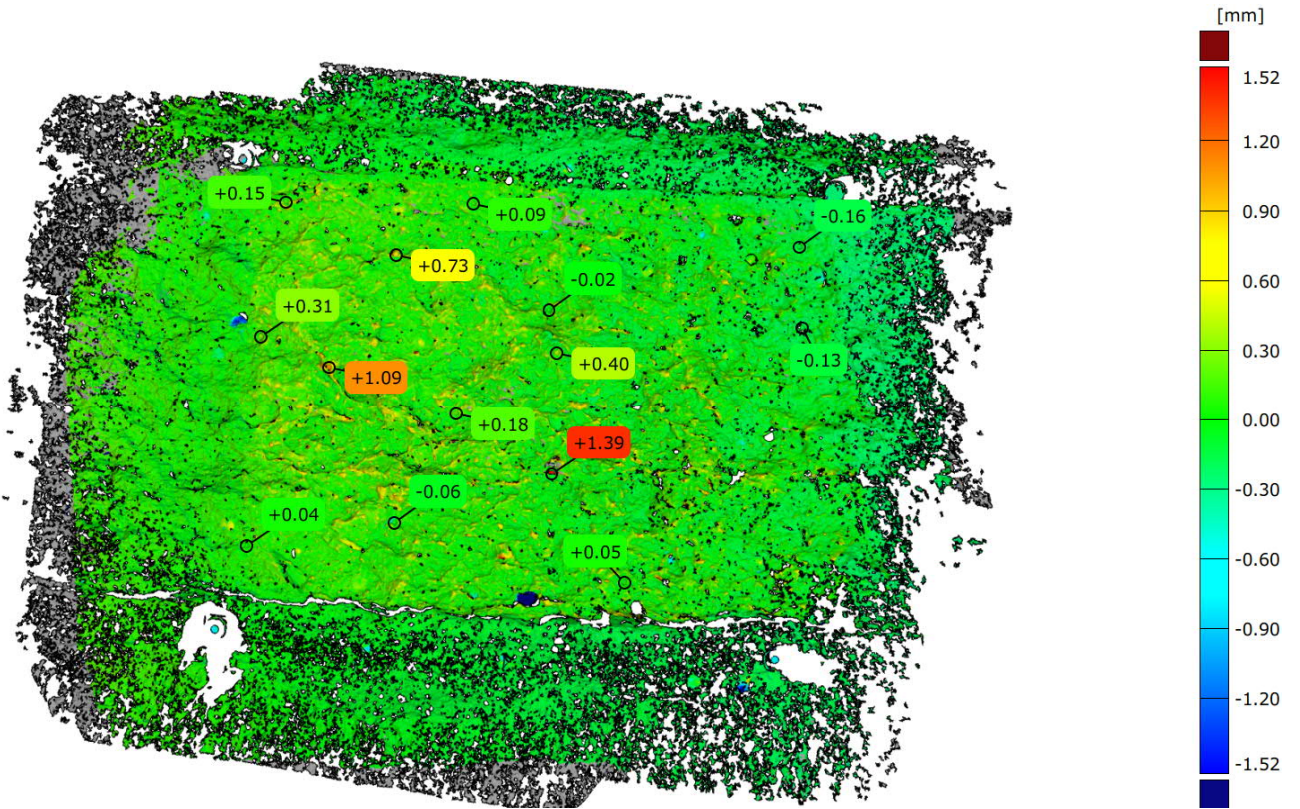


Abbildung 195: Messfläche 2 mit Darstellung der Auftragsdicke der Schlämme auf der gereinigten Oberfläche (Maßangaben in mm)

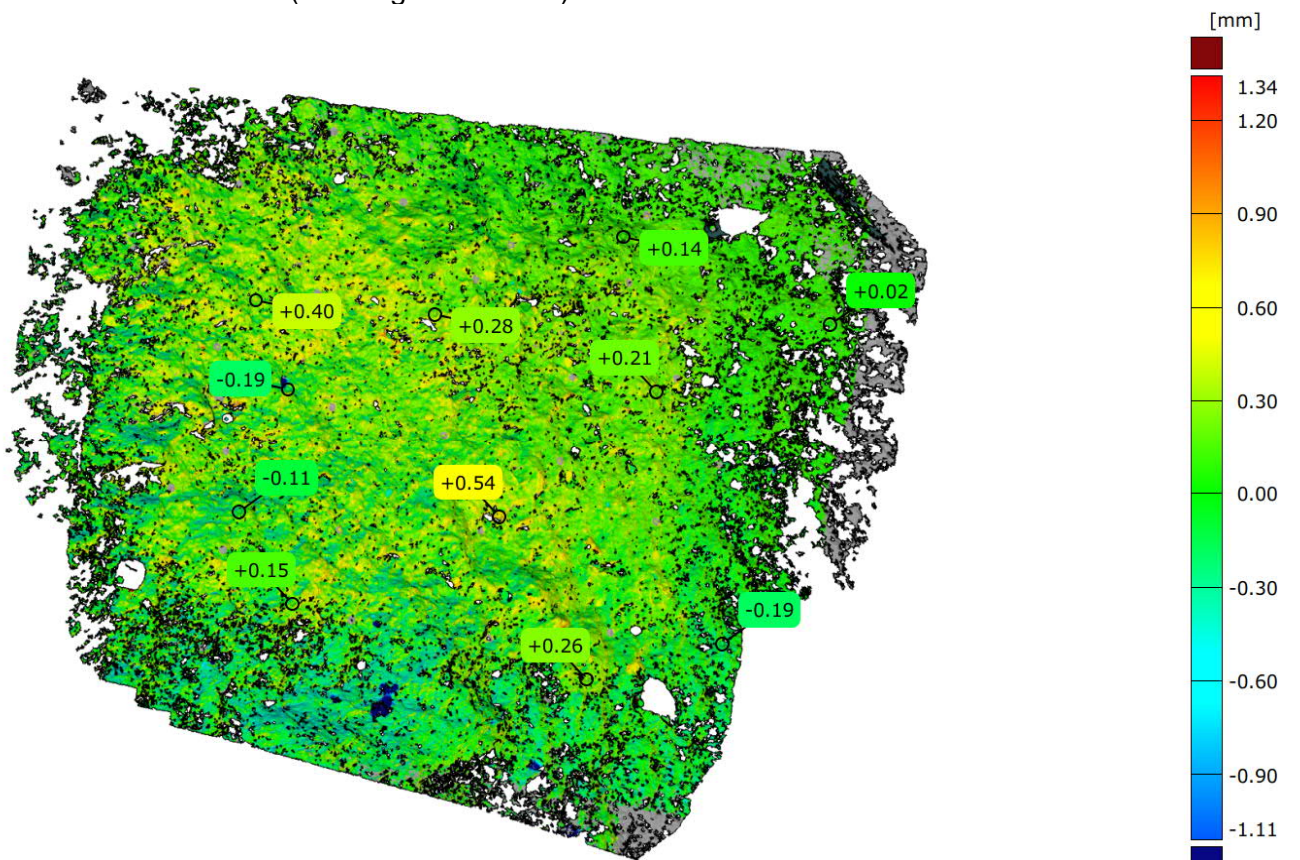


Abbildung 196: Messfläche 3 mit Darstellung der Auftragsdicke der Schlämme auf der gereinigten Oberfläche (Maßangaben in mm)

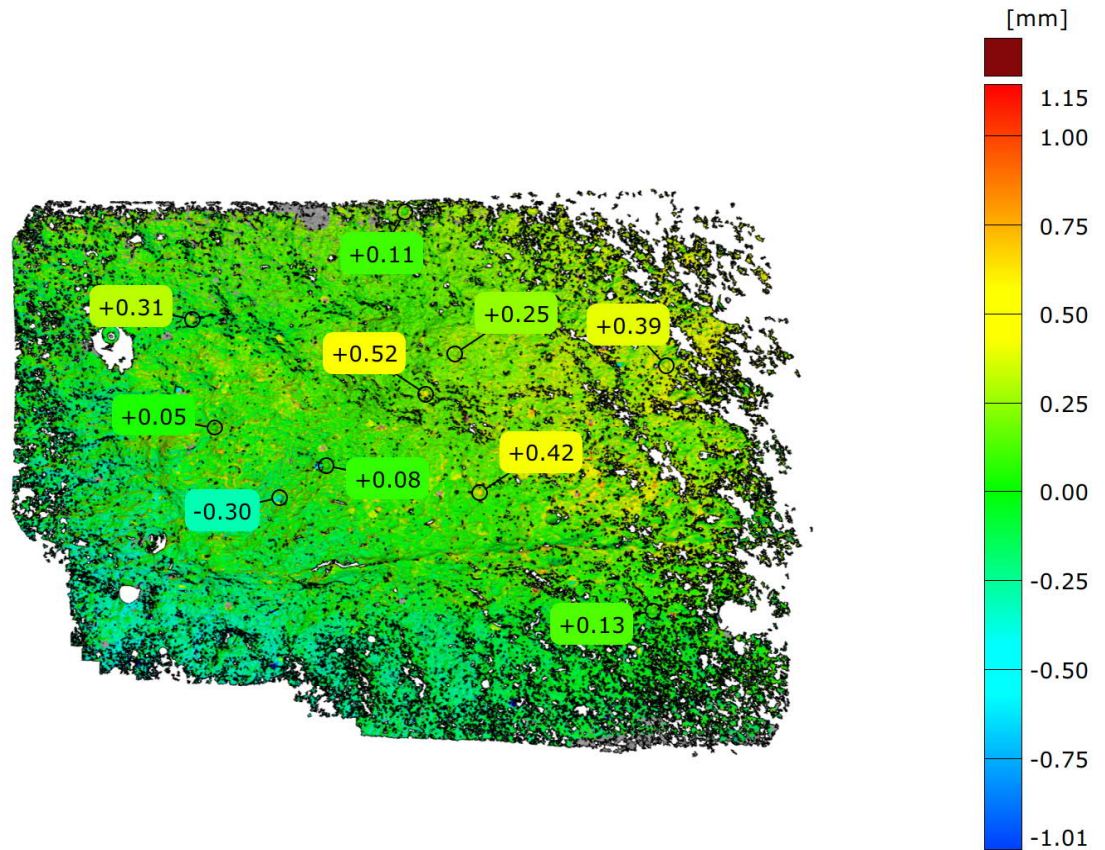


Abbildung 197: Messfläche 4 mit Darstellung der Auftragsdicke der Schlämme auf der gereinigten Oberfläche (Maßangaben in mm)

Die Oberflächenscans zeigen, dass im Zuge der abrasiven Partikelstrahlreinigung an der Messfläche 2 Oberflächenabtragsraten von maximal 0,5 mm erfolgten. Aufgrund des Ausbrechens von nur noch lose auf der Steinoberfläche haftender Partikel sind allerdings stellenweise Abträge von bis zu 3 mm Tiefe erkennbar. Dies war allerdings aufgrund der geschädigten Gefügestruktur an der Oberfläche auch zu erwarten.

Auch das Aufbringen der Schlämmen lässt sich durch das Scanning visualisieren (Abbildung 195 - Abbildung 197). Es wurden Auftragsstärken von überwiegend 0,3 – 0,5 mm gemessen. Gut erkennbar ist, dass durch das Auftragen vor allem die starken Vertiefungen in der Steinoberfläche gefüllt wurden, während die Hochpunkte eine deutlich geringere Auftragsdicke der Schlämme zeigten.

11 Zusammenfassung der Arbeitsergebnisse und Evaluierung an dem Modellobjekt

Im Rahmen des Forschungsprojektes konnten umfangreiche Erkenntnisse zum strukturellen Aufbau und zur Zusammensetzung des an der Kirche in Brotterode eingesetzten Rhyolithtuffmaterials gewonnen werden. Dieses Steinmaterial wird durch eine ungünstige Kombination aus stofflichen und Gefügeeigenschaften charakterisiert, welche es für herkömmliche Konservierungsmethoden als ungeeignet erscheinen lässt.

Bei der Entwicklung eines eigenen Konservierungsansatzes für den Brotteroder Rhyolithtuff konnte auf Erfahrungen bei der Behandlung von Hessischen Tuffen zurückgegriffen werden (bspw. dem am Dom zu Wetzlar eingesetzten Schalstein mit vergleichbaren Gefügecharakteristiken).

Im Ergebnis der materialtechnischen Untersuchungen wurde als Ursache der Verwitterungserscheinungen der strukturelle Aufbau und der Zutritt von Wasser über die Oberfläche ermittelt. Der konservatorische Ansatz für die Bearbeitung des Rhyolithtuffes lag deshalb in einer Verringerung des Wasserzutrittes durch die Applikation einer oberflächigen Schutzschicht mit erhöhten Kohäsionseigenschaften und thermoplastischem Verhalten. Dies konnte durch Einsatz einer acrylatgebundenen Schlämme realisiert werden. Angelagert und ergänzend zu dieser grundlegenden konservatorischen Verfahrensweise wurden Materialien und Technologien für oberflächennahe Strukturkonsolidierungen, Formergänzungen und Lasur- / Retuschesysteme entwickelt.

Diese wurden in einem mehrstufigen Prozess getestet und evaluiert. Nach umfangreichen Laborentwicklungen erfolgte das Anlegen von Testflächen an verschiedenen exponierten Fassadenbereichen der Kirche Brotterode. Die Testflächen wurden nach entsprechender Bewitterung über einen Zeitraum von ca. einem Jahr bewertet. Die Bewertungsergebnisse flossen wiederum in Material- und Technologievorgaben für das Anlegen einer Musterachse am Gebäude ein. Hier konnten die in Rückkopplung mit den Ausführenden und fachlich Beteiligten diskutierten Modifizierungen letztendlich in praxisrelevantem und größerem Maßstab umgesetzt werden. Dabei zeigte es sich, dass die vorgesehenen Maßnahmen in der Praxis gut umsetzbar sind. Ein einfaches Handling der Materialien, die Möglichkeit, konfektionierte, vorgemischte Produkte einsetzen zu können und praxisrelevante Applikationstechnologien sind wichtige anwendungstechnische Merkmale dieser Methodik.

Im Zuge der Realisierung der erarbeiteten Konservierungstechnologie am Bauwerk wurde deutlich, wie wichtig die bereits zu Beginn der Tests im Fokus der Entwicklung liegende Anpassung oberflächenwirksamer Maßnahmen an Struktur, Farbigkeit und optische Wirkung der Steinoberflächen ist. Dabei mussten Kompromisse zwischen der konservatorischen Wirksamkeit im Sinne der Verwitterungsstabilität und denkmalmethodisch-gestalterischen Ansprüchen gefunden werden.

Im Rahmen eines vorgezogenen Monitorings konnten Stabilität und Wirksamkeit der Technologien und Materialien an Testflächen an der Kirche in Brotterode über einen Zeitraum von 2 Winterperioden nachgewiesen werden.

Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung der Konservierungstechnologie war die Möglichkeit, die verwendeten Materialien vorkonfektioniert herstellen zu können. Dies gewährleistete eine einfache Verarbeitung von im Bereich der Baudenkmalpflege tätigen Unternehmen und erforderte für die Ausführung nicht spezielle Restauratoren. Die konfektionierten Materialien und die damit einhergehende vergleichsweise einfache Verarbeitung ist auch als ein Beitrag zur Qualitätssicherung bei der praktischen Umsetzung zu sehen.

12 Öffentlichkeitsarbeit

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

Im Frühjahr 2020 wird ein Kolloquium stattfinden, welches sich dem Thema „Tuffsteinkonservierung“ widmet und auf dem u.a. die Ergebnisse des Forschungsprojektes vorgestellt werden. Im Rahmen des Kolloquiums soll eine Publikation erstellt werden.

Die im Rahmen des Forschungsprojektes erarbeitete Konservierungstechnologie kommt am Musterobjekt, der Kirche in Brotterode, bei der schrittweisen Bearbeitung der Fassaden weiterhin zur Umsetzung und erfährt hierdurch in der Öffentlichkeit Beachtung.

13 Fazit

Mit der im Rahmen des Projektes erarbeiteten Technologie und den dafür entwickelten Materialien ist Ausführenden ein umfassendes Verfahren zur Konservierung von geschädigten dichten Tuffsteinen am Bauwerk in die Hand gegeben. Die Ergebnisse lassen sich auch auf ähnliche Gesteine, beispielsweise auf dichte hessische Tuffe („Schalstein“) übertragen und bieten somit über das Verwendungsgebiet der Thüringer Tuffe hinaus Anwendungsmöglichkeiten. Bei der Entwicklung wurde darauf geachtet, dass die Verfahren auch von mit der Baudenkmalpflege befassten Betrieben eingesetzt werden können und nicht nur unbedingt auf Steinkonservierung spezialisierten Restauratoren vorbehalten sind.

Literatur- und Quellenverzeichnis

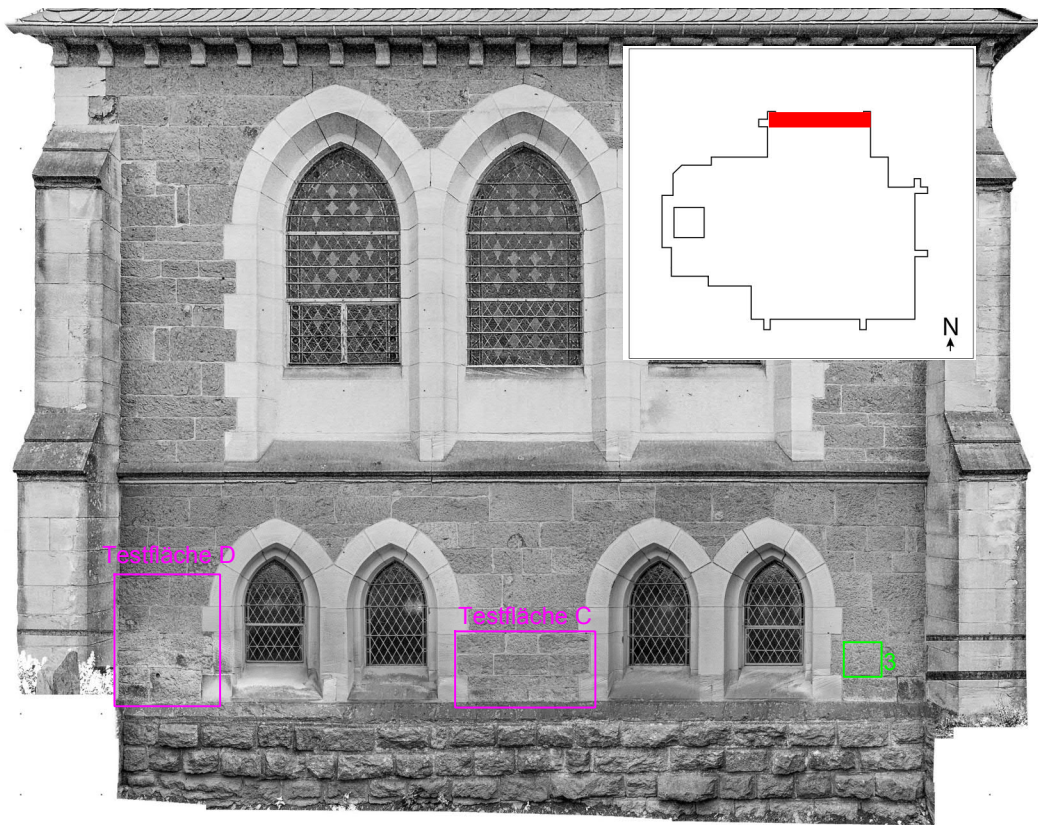
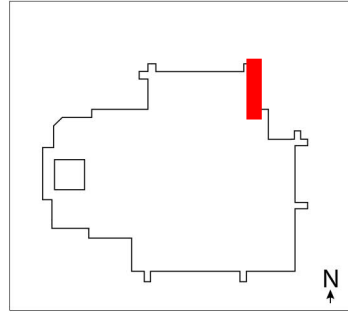
- /1/ Auras, Michael et al: 10 Jahre Institut für Steinkonservierung, Mainz, 2000
- /2/ Auras, Michael; Steindlberger, Enno: Verwitterung und Festigung vulkanischer Tuffe, in: Zeitschrift der deutschen Geowissenschaftlichen Gesellschaft, Nr. 156, S. 167ff, Stuttgart, April 2005
- /3/ Berbig, Timo: Nachuntersuchungen an den Mörtelneuentwicklungen für Lettenkeupersandstein, Naturwissenschaftlicher Beleg Hauptstudium, FH Erfurt 2006
- /4/ Brotterode am Inselsberg, website,
<https://www.brotterode-am-insels-berg.eu/geschichtebrotterode/derbrand/index.html>,
Abruf 19.11.2019
- /5/ DIN EN 1062-3: Beschichtungsstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Substrate und Beton im Außenbereich - Teil 3: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit; Deutsche Fassung EN 1062-3:2008
- /6/ DIN EN 1542-1999: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch; Deutsche Fassung EN 1542:1999
- /7/ DIN EN 1925: Prüfverfahren von Naturstein - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung; Deutsche Fassung EN 1925:1999
- /8/ DIN EN ISO 10304-1:2009-07: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie - Teil 1: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat (ISO 10304-1:2007); Deutsche Fassung EN ISO 10304-1:2009
- /9/ DIN EN ISO 11885:2009-09: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) (ISO 11885:2007); Deutsche Fassung EN ISO 11885:2009
- /10/ DIN EN ISO 12572: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß (ISO 12572:2016); Deutsche Fassung EN ISO 12572:2016
- /11/ DIN EN 1542:1999-07: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch; Deutsche Fassung EN 1542:1999
- /12/ DIN EN ISO 15148: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen (ISO 15148:2002 + Amd 1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 15148:2002 + A1:2016
- /13/ DIN EN 27888:1993-11: Wasserbeschaffenheit; Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (ISO 7888:1985); Deutsche Fassung EN 27888:1993

- /14/ DIN 38404-5:2009-07: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Physikalische und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C) - Teil 5: Bestimmung des pH-Werts (C 5)
- /15/ DIN 38414-4:1984-10: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4)
- /16/ Ev. Kirche v. Kurhessen-Waldeck: DBU-Forschungsprojekt „Innovative Konzepte zur Konservierung und zum Schutz umweltgeschädigter historischer Tuffsteinflächen am Beispiel von drei nordhessischen Kirchen“ (AZ 18981-45)
- /17/ Goretzki, Lothar: Untersuchungsbericht und Sanierungsplanung, Evangelische Kirche von Brotterode, Weimar: Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar. Internes Dokument, 1989
- /18/ Hopp, Heike; Zier, Hans-Werner: Erarbeitung und Erprobung einer Sanierungstechnologie für umweltgeschädigte Bauteile aus Lettenkohlsandstein am Beispiel der Arkaden des Schlosses Friedenstein in Gotha, Abschlussbericht DBU-Projekt AZ22296-25, Rudolstadt 2008
- /19/ Haindl, Kerstin et al.: Was ist bei Karsten & Co. zu beachten? In: Bautenschutz und Bausanierung, Heft 3 2016, S. 33ff.
- /20/ Hoffmann, Nils: Modifizierte Epoxidharze für die Anwendung in der Natursteinsanierung, in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, 1997
- /21/ Institut für Steinkonservierung e.V.: Denkmalgestein Tuff, ARKUS-Tagung, Bericht 22/2006
- /22/ Institut für Steinkonservierung e.V.: Die Konservierung des Heidenportals am Wetzlarer Dom, Bericht 27/2007
- /23/ Jentsch, Frieder: Gesteine in den Bauten des Benediktinerklosters und des Schlosses von Chemnitz, <https://www-user.tu-chemnitz.de/~fna/21jentsch.pdf>, abgerufen 20.11.2018
- /24/ Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, website, http://www.geowiss.uni-mainz.de/1814_DEU_HTML.php, Abruf 04.12.2018
- /25/ Kartendienst der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, abgerufen unter <http://antares.thueringen.de/cadenza/?jsessionid=83437C7C4EB11431B64F35E4E3822906> am 15.11.2019
- /26/ Katzschmann, Lutz; Aselmeyer, Gunther; Auras, Michael: Natursteinkataster Thüringen, Institut für Steinkonservierung e.V., Bericht 23/2006
- /27/ Kiewewetter, Arndt; Siedel, Heiner; Stühr, Michael: Die Tulpenkanzel im Dom zu Freiberg; Arbeitshefte des Landesamtes für Denkmalpflege in Sachsen, 1995
- /28/ Meißner, Melanie: Konservierung von Thüringer Rhyolithtuff am Beispiel der Kirche von Brotterode, Masterarbeit, FH Erfurt, Erfurt 2017
- /29/ Reißig, Josephine: Tuffsteinkonservierung: Untersuchung hydrophober Beschichtungssysteme zur Behandlung an Schäden an hydrophobierten Bauwerken aus Ettringer und Weiberner Tuffstein, Diplomarbeit, FH Potsdam 2008


- /30/ Scheibe, R.; Zimmermann, E.: Geologische Karte Ruhla, Berliner Lithographisches Institut 1918
- /31/ Scheidemann, St.: Restauratorischer Untersuchungsbericht und Maßnahmekonzeption (Natursteinkonstruktion der Kirchenfassaden in Brotterode), 2015 (unveröffentl. Bericht)
- /32/ Schrön, Barbara: Information TLDA Erfurt, DBU-Projekt, Juni 2015
- /33/ Selwitz, Charles: Epoxy Resins in Stone Conservation, Research in Conservation, The Getty Conservation Institute, 1992
- /34/ Siedel, Heiner: Sächsische Tuffe – Geologie, Gewinnung und Verwendung, Abschlusskolloquium DBU-Projekt „Modellhafte Konservierung der anthropogen geschädigten Naturstein-Portale der Marienkirche in Rötha“, Tagungsband, Rötha, September 2017
- /35/ Streit, Ilja: Festigung von Sandstein mit Epoxydharz, Naturwissenschaftlicher Beleg, Fachhochschule Erfurt, 2006
- /36/ Zimmermann, E.: Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Lieferung 183, Blatt Ruhla (früher Brotterode), Hrsg. Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin 1930

ANLAGE I

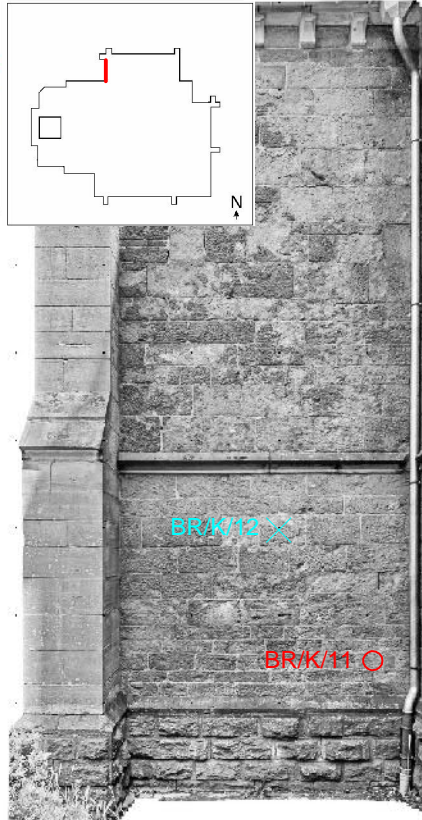
Kartierungen der Probenahmestellen, Untersuchungs- und Testflächen an den Fassaden der Kirche in Brotterode



- ✕ Entnahmestellen von Materialproben
- Entnahmestellen von Bohrkernen
- Testflächen Konservierung / Restaurierung
- Testflächen 3D-Scanning

 MATERIALFORSCHUNGS- UND -PRÜFANSTALT AN DER BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR Postfach 2310, 99423 Weimar Tel. 0 36 43 / 5 64-0	DBU-Forschungsprojekt Erarbeitung einer Technologie zur Sanierung von anthropogen umweltbedingten Schäden an Denkmälern aus Tuffsteinen sowie modellhafte Anwendung am Beispiel der Kirche in Brotterode	
	Kirche Brotterode Fassadenansichten	Zeichnung Nr. <div style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">1</div>

Lokalisierung der Probennahmestellen
und Testflächen



- ✕ Entnahmestellen von Materialproben
- Entnahmestellen von Bohrkernen
- Testflächen Konservierung / Restaurierung
- Testflächen 3D-Scanning



MATERIALFORSCHUNGS-
UND -PRÜFANSTALT
AN DER
BAUHAUS-UNIVERSITÄT
WEIMAR
Postfach 2310, 99423 Weimar
Tel. 0 36 43 / 5 64-0

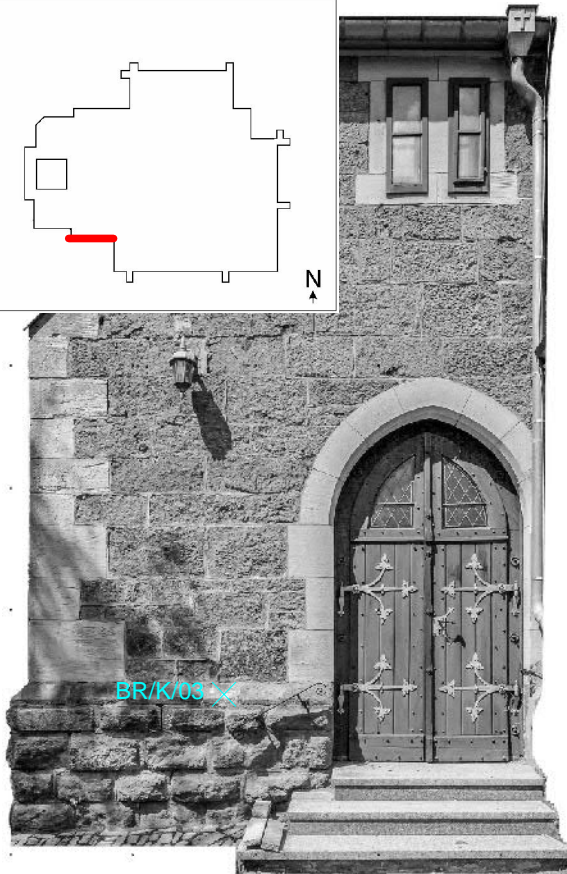
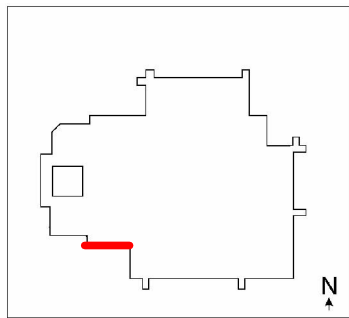
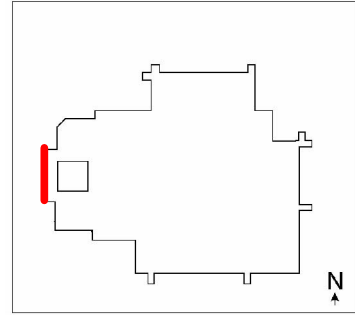
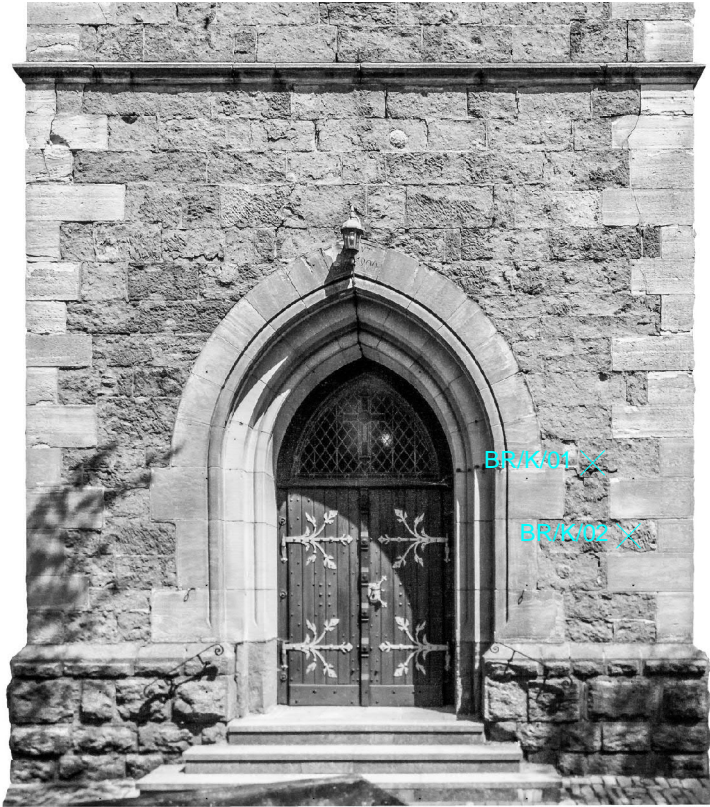
DBU-Forschungsprojekt
Erarbeitung einer Technologie zur Sanierung von anthropogen
umweltbedingten Schäden an Denkmälern aus Tuffsteinen sowie
modellhafte Anwendung am Beispiel der Kirche in Brotterode

Kirche Brotterode
Fassadenansichten


Lokalisierung der Probenentnahmestellen
und Testflächen

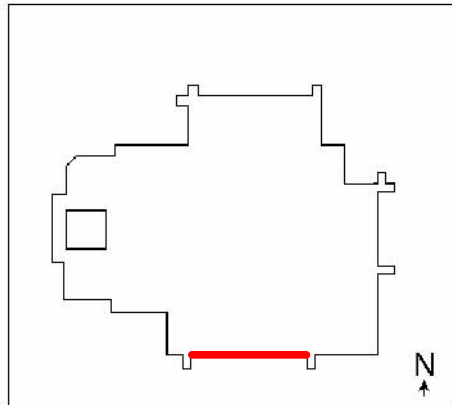
Zeichnung
Nr.

2



- ✕ Entnahmestellen von Materialproben
- Entnahmestellen von Bohrkernen
- Testflächen Konservierung / Restaurierung
- Testflächen 3D-Scanning

 MATERIALFORSCHUNGS- UND -PRÜFANSTALT AN DER BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR Postfach 2310, 99423 Weimar Tel. 0 36 43 / 5 64-0	DBU-Forschungsprojekt Erarbeitung einer Technologie zur Sanierung von anthropogen umweltbedingten Schäden an Denkmalen aus Tuffsteinen sowie modellhafte Anwendung am Beispiel der Kirche in Brotharode	Zeichnung Nr. 3
	Kirche Brotharode Fassadenansichten Lokalisierung der Probennahmestellen und Testflächen	



Testfläche B



Testfläche A



- ✕ Entnahmestellen von Materialproben
- Entnahmestellen von Bohrkernen
- Testflächen Konservierung / Restaurierung
- Testflächen 3D-Scanning

 MATERIALFORSCHUNGS- UND -PRÜFANSTALT AN DER BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR Postfach 2310, 99423 Weimar Tel. 0 36 43 / 5 64-0	DBU-Forschungsprojekt Erarbeitung einer Technologie zur Sanierung von anthropogen umweltbedingten Schäden an Denkmälern aus Tuffsteinen sowie modellhafte Anwendung am Beispiel der Kirche in Brotterode	Zeichnung Nr.
	Kirche Brotterode Fassadenansichten	4
Lokalisierung der Probenahmestellen und Testflächen		

ANLAGE II

Technische Datenblätter der Epoxidharz-Produkte webac 4120P, 4170 und 4180N

Im pdf-Dokument sind die Datenblätter nicht enthalten.