



**Naturwissenschaftliche Untersuchungen an Baumaterialien der Moritzkirche  
in Halle/Saale als Begleitung zu einer restauratorischen Instandsetzung**

**Bericht No. 30/18**



(Nordfassade um 1900 Foto: A. Meydenbauer)

**Auftraggeber: Kath. Pfarrei St. Mauritius und St. Elisabeth  
Mauerstraße 13  
06110 Halle**

**Planungsbüro: Atelier für Architektur & Denkmalpflege  
Schloss Köthen, Schlossplatz 4,  
06366 Köthen**

**Fertigstellung : 17. Juli 2018  
Text : 23 Seiten, 10 Tabellen, 16 Abbildungen**

## 1 Einleitung

Die spätgotische Moritzkirche wurde ursprünglich mit Werksteinen aus lokalem Buntsandstein errichtet. Die Verwitterungsbeständigkeit dieses Sandsteins ist mäßig, und im Laufe der Zeit kam es in Abhängigkeit von der Exposition zu Schäden an Bauteilen und Bauzier (**Abbildung 1**). Fassadenbereiche des Bauwerks waren deshalb in der Vergangenheit Gegenstand mehr oder weniger umfangreicher Instandsetzungsarbeiten, bei denen u. a. eine Reihe nicht lokaler Naturwerksteine verwendet wurden (siehe Dokumentation von A. Löhr-Dittrich 2012). Am untersuchten Pfeiler an der Nordseite des Chores wurden Reparaturen überwiegend mit Mörtel ausgeführt (siehe Abschnitt 3.2). Zu einem großen Teil sind diese Reparaturen wieder schadhaft, gleichzeitig ist die Verwitterung des Sandsteins fortgeschritten. Es besteht inzwischen die Gefahr, dass insbesondere lose Steinerfüllungsmörtel und Teile der steinernen Bauzier vom Bauwerk abfallen.



**Abbildung 1: Schadensbilder an der Nordseite des Chores der Moritzkirche in Halle**  
Oben links: absandende Sandsteinkrabben und Reparatur mit SEM  
Oben rechts: alte intakte Profilmachbildung mit Zementmörtel  
Unten links: gelockerte Antragung und Flankenabriss des FM  
Unten rechts: Von Pfeiler-Werkstein abplatzende Gipskruste

Der aktuelle Zustand an der Nordfassade macht deshalb erneut Instandsetzungsarbeiten erforderlich. Diese sollen unter Beachtung des Denkmalcharakters des Bauwerks bei fachlicher Begleitung durch das Landesamt für Archäologie und Denkmalpflege Sachsen-Anhalt unter restauratorischen Gesichtspunkten von einer Fachfirma ausgeführt werden. Die Art der Ausführung soll zuvor an Musterflächen erprobt werden, die von Restauratoren angelegt werden. Die Auswahl von geeigneten Reparaturmaterialien und die einzelnen Arbeitsschritte (Reinigung, Festigung, Antragung, Ergänzung) erfordern die Kenntnis der bauphysikalischen Eigenschaften des Bestandes an Naturwerkstein und Mörtel. Gegenstand dieses Berichtes sind die Beschreibung der entsprechenden Untersuchungen zur Kennwertermittlung am Bauwerk und im Labor sowie Anmerkungen zu den Ergebnissen mit Schlussfolgerungen für die Instandsetzung.

## 2 Untersuchungen am Bauwerk

### 2.1 Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Baustoffoberflächen (Mörtel, Sandstein)

Die Messungen erfolgten mit dem Karsten'schen Prüfrohr<sup>1)</sup>. Aus den Messdaten wurden die entsprechenden kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten (w-Werte) berechnet<sup>2)</sup>.

Die aus den Daten der Messung mit dem Karsten'schen Prüfrohr abgeleitete kapillare Wasseraufnahme entspricht betragsmäßig nicht dem w-Wert nach DIN 52617. Da zur Wasseraufnahme nicht nur kapillares Saugen, das in Abweichung von der DIN quasi dreidimensional und nicht eindimensional erfolgt, sondern auch, je nach Größenverteilung der Poren im Ziegel, ein mehr oder weniger großer Anteil an Darcy-Strömung beiträgt, sind die aus Karsten-Messungen abgeleiteten w-Werte höher als w-Werte nach der DIN. Deshalb sollte die Interpretation der Ergebnisse von Karstenmessungen nach Möglichkeit vor dem Hintergrund von kapillaren Wasseraufnahmemessungen nach der DIN 52617 am gleichen Baustoff erfolgen. Für diesen Bericht erfolgte dies durch w-Wert-Bestimmungen an Sandsteinbohrkernen aus Werksteinen (siehe 4. Versuche zur Oberflächenfestigung absandender Werksteine).

Die Messstellen waren von den Restauratoren so ausgesucht worden, dass unterschiedlich verschmutzte bzw. verkrustete und gereinigte Wandoberflächen nebeneinander lagen und vergleichend untersucht werden konnten. In **Abbildung 2** sind die Wandoberflächen und zugehörigen Messkurven dokumentiert. Die Messergebnisse sind der **Tabelle 1** zu entnehmen.

**Tabelle 1: Kapillare Wasseraufnahme von Putz- und Werksteinoberflächen**

Messung No.	Substrat	w-Wert (kg/m <sup>2</sup> √h)
W1	stark verkrustete Oberfläche ( Mörtel ?, Stein ?)	3,1
W2	Oberfläche mit ausgedünnter Kruste, neben W1	5,0
W3	Mörtelergänzung mit verschmutzte Oberfläche	5,1
W4	Mörtelergänzung mit aufgehellter Oberfläche	3,5
W5	Sandstein mit dünner schwarzer Kruste	3,3
W6	Sandstein mit dünner schwarzer Kruste, leicht gereinigt	5,0
W7	Sandstein mit dichter schwarzer Kruste	0,2
W8	Sandstein mit leicht ausgedünnter schwarzer Kruste	2,3
W9	Mörtelergänzung mit verschmutzter Oberfläche	2,4
W10	Mörtelergänzung mit gereinigter Oberfläche	2,8

<sup>1</sup> D. Knöfel, S Henkel, A. Aschhoff (1995), Ist die Messung der Wasseraufnahme mit dem Karsten'schen Prüfrohr zuverlässig?- Bautenschutz und Bausanierung, Heft 6, 36 - 40

<sup>2</sup> E. Wendler, R. Sneathlage (1989), Der Wassereindringprüfer nach Karsten – Anwendung und Interpretation der Meßwerte.- Bautenschutz und Bausanierung, Heft 12, 110 - 115

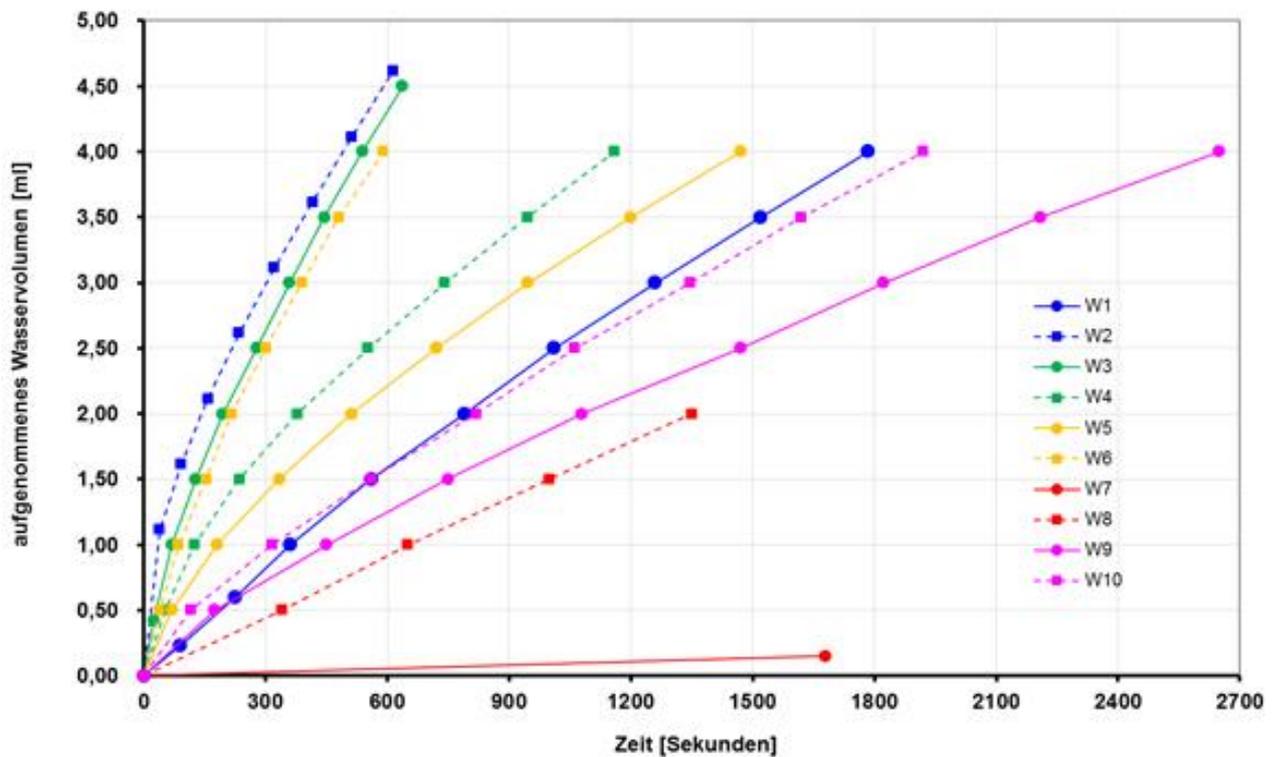


Abbildung 2: Dokumentation der Messstellen und der zugehörigen Messkurven (Wasseraufnahme in Milliliter über die Zeit in Sekunden)

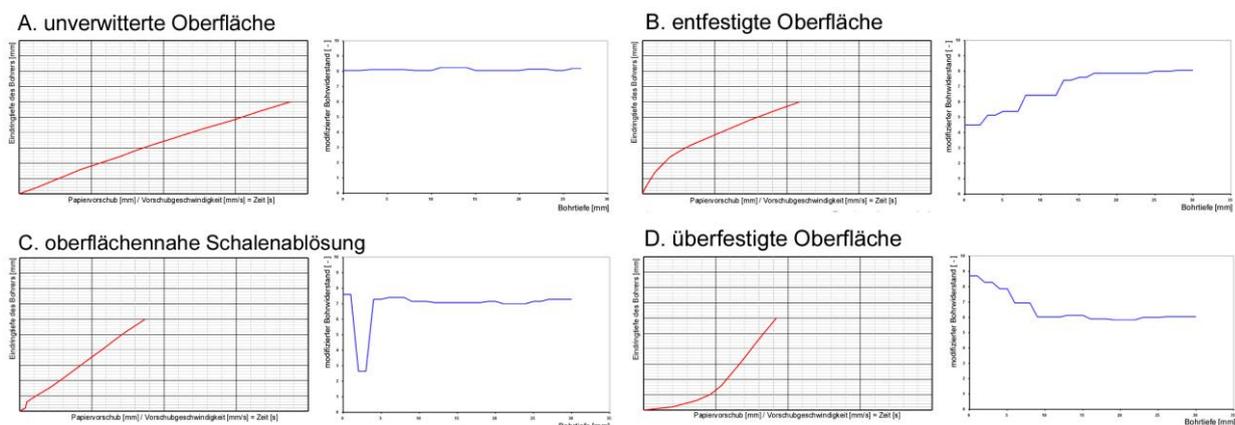
## 2.2 Aufnahme von Festigkeitsprofilen an Baustoffoberflächen mit dem Bohrwiderstands-Messgerät

Mit diesem Messverfahren wird ein Festigkeitsprofil des oberflächennahen Bereichs (üblicherweise bis in 30 mm Tiefe) eines Werksteins oder Putzes aufgenommen. Als Maß für die Festigkeit wird der Widerstand, den ein **trockenes** Gestein oder **trockener** Putz dem Eindringen eines Bohrers beim Bohren eines Loches mit 3 mm Durchmesser entgegensetzt, mit hoher Auflösung tiefenabhängig erfasst. Die Bohrung erfolgt bei geregelter Drehzahl und konstantem Andruck des Bohrers durch entsprechende Gewichte von 1, 2 und 3 kp. Um Effekte durch den Verschleiß der Boherschneide zu minimieren, besteht diese nicht aus Hartmetall (z. B. WIDIA = gesinterter WC-Co-Kompositwerkstoff) sondern aus polykristallinem Diamant. Die auf einem Papierstreifen aufgezeichnete Bohrwiderstandskurve wird hinsichtlich der Steigung (Bohrtiefe gegen Zeit) abschnittsweise ausgewertet und ergibt somit über die Tiefe der Bohrung ein Festigkeitsprofil des Baustoffs im oberflächennahen Bereich.

Die eigentliche, dem Bohrwiderstand proportionale Messgröße, ist die reziproke Bohrfortschrittsgeschwindigkeit [s/mm], d.h., das Zeitintervall, welches zum Bohren eines Tiefenabschnitts notwendig ist. Zieht man als Widerstandsmaß die arctan-Funktion des Steigungswinkels heran, können die unter Umständen notwendigen unterschiedlichen Belastungsstufen (1 kp, 2 kp, 3 kp) durch entsprechende Korrekturrechnung berücksichtigt werden. Der gemessene Bohrwiderstand ist primär abhängig von der Härte und dem Gefüge der gesteins- bzw. mörtelbildenden Komponenten und der Schneide des Bohrers. Sekundär ist der Einfluss des Transports von Bohrmehl aus dem Bohrloch auf das Messergebnis, der mit zunehmender Tiefe des Bohrlochs an Bedeutung gewinnt.

Die Bohrwiderstandsmessung ist eine vergleichende Messmethode, die ihre Erkenntnisse (**Abbildung 3**) aus der Gegenüberstellung von Messungen an Probe- und Referenzflächen gewinnt, die in den relevanten Merkmalen wie beispielsweise Mineralbestand, Korngröße, Zementation, Porosität, etc. übereinstimmen müssen. Bei grobkörnigen und/oder im cm-Maßstab geschichteten Festkörpern kann die Erfüllung dieser Voraussetzung problematisch und möglicherweise nicht gegeben sein. Die Methode wird hauptsächlich zur Beurteilung der Wirksamkeit von KSE-Festigungen eingesetzt. Eine weitere Anwendung ist das Detektieren von Schalen an Gesteinsoberflächen. Mit konventionellen Messgeräten lassen sich **keine absolut vergleichbaren Bohrwiderstandswerte ermitteln**, die sich mit anderen Festigkeitskennwerten, z. B. Druckfestigkeit, korrelieren lassen.

**Abbildung 4** zeigt die untersuchten Oberflächen mit den zugehörigen Bohrhärteprofilen.



**Abbildung 3: Typische Bohrwiderstandsmesskurven und -Tiefenprofile**

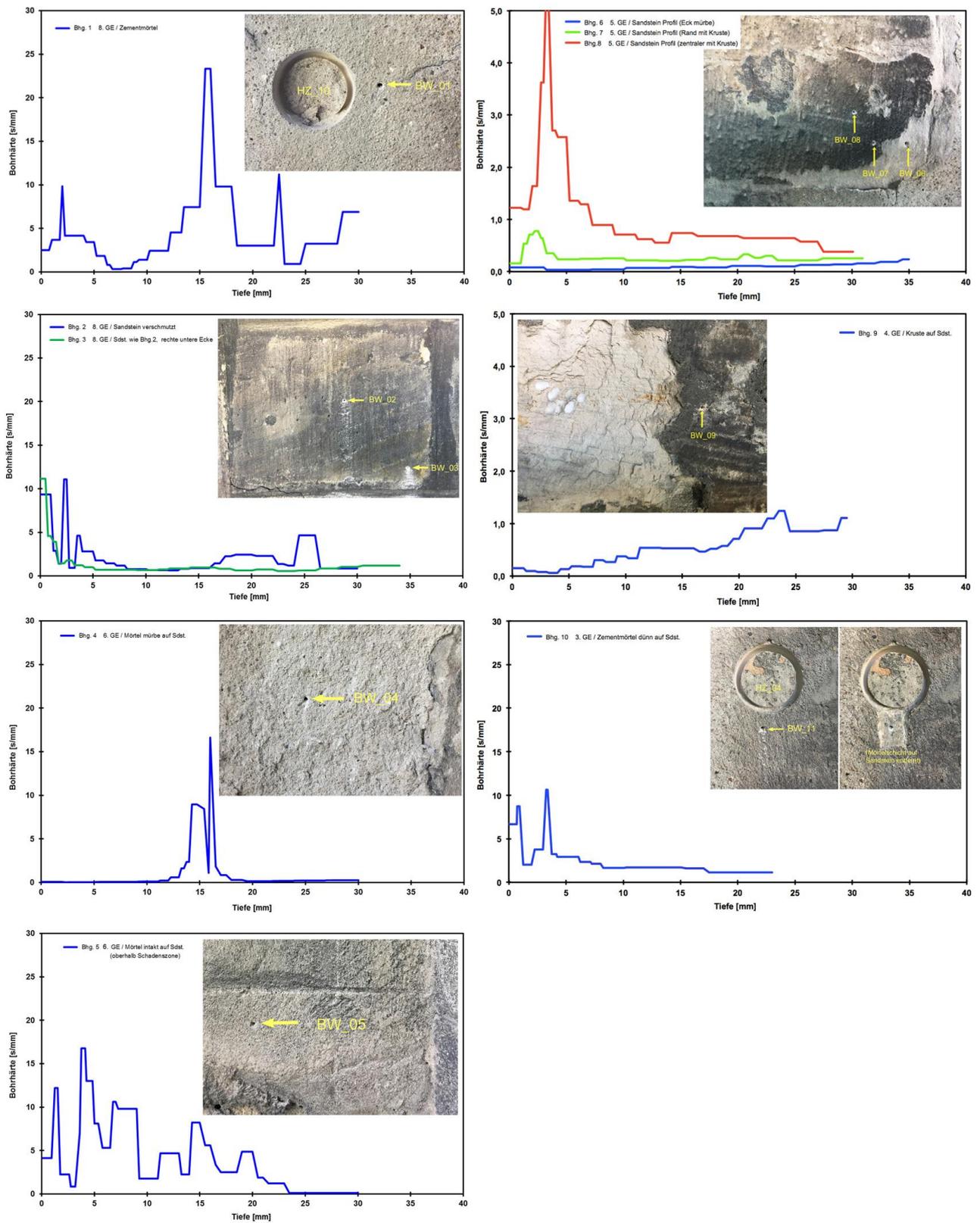


Abbildung 4: Bohrwiderstandsprofile an den Messpunkten 1 – 10 (Diskussion in nAbschnitt)

### 2.3 Bestimmung der Haftzugfestigkeit von Putzmörtel auf Werksteinen

Die Haftfestigkeit des Putzmörtels auf Werksteinen wurde an zehn verschiedenen Stellen bestimmt. Mit einem Diamantkernbohrer mit 50 mm Außendurchmesser wurde der Putzmörtel an der zu prüfenden Stelle ca. 20 mm tief angebohrt. Vor dem Aufkleben der Aluminium-Prüfstempel mit 50 mm Durchmesser mit einem Acrylatkleber wurde die Mörteloberfläche mit einer Drahtbürste von Staub gereinigt. Die kreisförmigen Klebeflächen wiesen einen maximalen Durchmesser von 48 mm auf, was einer Fläche von 1809,6 mm<sup>2</sup> entspricht. Nach 20minütiger Erhärtungszeit des Klebers wurden die Stempel mit einem Handprüfgerät der Firma S.A.T. TEC. in der 12, rue Brancion Paris IV abgezogen. **Abbildung 5** zeigt einzelne Stadien des Prüfvorgangs.



**Abbildung 5: Durchführung der Bestimmung der Haftzugfestigkeit**

links: Abzug des aufgeklebten Stempels  
rechts oben: ca. 20 mm tiefes Ausbohren der Abzugsfläche  
rechts Mitte: aufgeklebter Abzugstempel  
rechts unten: abgezogener Stempel und Abrissfläche

Zur Feststellung der Abrissflächen vom Mörtel wurden kalibrierte Fotos der Stempel mit dem anhaftenden Mörtel ausgedruckt und zunächst der Stempel mit auf 150 mm vergrößertem Durchmesser ausgeschnitten und die Masse  $m$  des kreisrunden Druckerpapiers bestimmt ( $m = 1,54$  g). Anschließend wurde die Fläche des abgerissenen Betons aus der Papierscheibe herausgeschnitten und die Masse  $m_n$  ( $n =$  Probennummer) des verbliebenen Papiers bestimmt.

Die Abrissfläche ergibt sich dann durch Multiplikation von  $24^2 \times \pi = 1809,6 \text{ mm}^2$  mit dem Faktor  $m_n/m$ . Für die Größe der Abrissfläche gilt, dass diese kleiner bzw. gleich der Fläche des angebohrten Kreises sein muss. Die Messergebnisse sind in **Tabelle 2** zusammengefasst, die Abrissflächen sind in den **Abbildungen 6 und 7** dokumentiert.

**Tabelle 2: Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfungen**

GE	Messung No.	F [N]	Fläche [mm <sup>2</sup> ]	$\beta_{HZ}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Bemerkung
1	1	320	974,4	0,33	Abriss im Mörtel
1	2	3600	1571,5	2,29	Abriss im Mörtel
2	3	1690	1521,7	1,11	auf Reparatur, Abriss überwiegend im Sandstein
3	4	700	1266,7	0,55	auf grobkörnigem Reparaturmörtel
4	5	500	1765,4	0,28	auf geschlossener Putzfläche, Abriss überwiegend im Sandstein
6	6	300	1575,0	0,19	auf geschlossener Putzfläche, Abriss im Sandstein
6	7	500	1621,1	0,31	auf grobkörnigem Reparaturmörtel, Abriss überwiegend im Mörtel
7	8	700	1696,5	0,41	auf geschlossener Putzfläche (oberer Stempel), Abriss im Mörtel
7	9	1720	1603,9	1,07	auf geschlossener Putzfläche (oberer Stempel), Abriss im Mörtel
8	10	100	1594,1	0,06	auf verwitterter Putzfläche, Abriss im Mörtel

GE = Gerüstebene



**Abbildung 6: Abrissflächen bei Haftzugfestigkeitsprüfung**

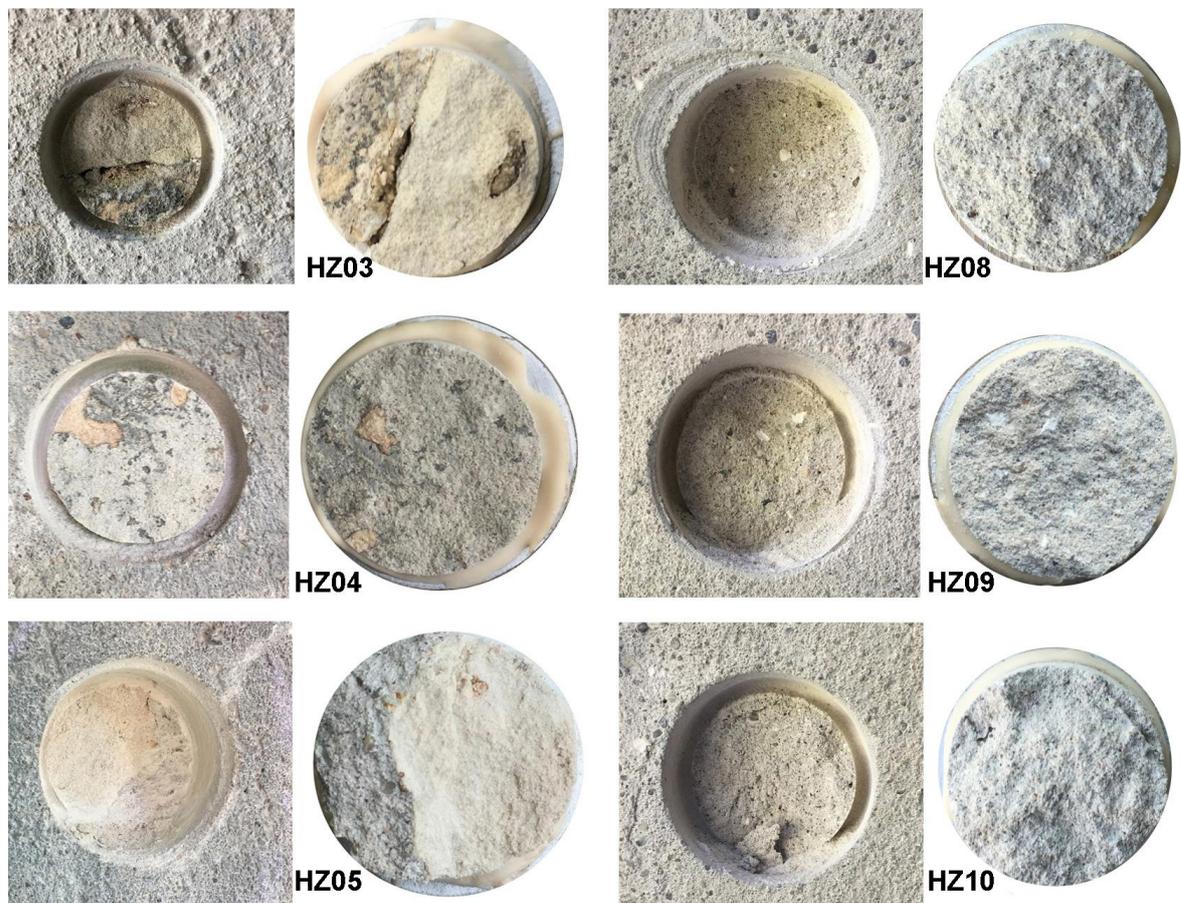


Abbildung 7: Abrissflächen bei Haftzugfestigkeitsprüfung

### 3 Untersuchungen an Baustoffproben im Labor

Dem Bauwerk wurden gemeinsam mit den Diplom-Restauratoren Helen Jacob und Tom Zimmermann bzw. an von den beiden bezeichneten Stellen Mörtel- und Sandsteinproben für Untersuchungen im Labor entnommen. Dabei geht es um die Bestimmung wasserlöslicher Salzgehalte in den Baustoffen, die Untersuchung typischer Mörtelproben hinsichtlich der Phasenzusammensetzung, chemischen Zusammensetzung, der Korngrößenverteilung des Zuschlags und des Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisses sowie der Ermittlung bauphysikalischer Kennwerte von Sandstein- und Mörtelproben.

#### 3.1 Bestimmung wasserlöslicher Salzgehalte in Sandsteinproben

Zur quantitativen Analyse der wasserlöslichen Salzgehalte in zwei stark absandenden Werksteinen mit Salzausblühungen wurden diesen Proben entnommen und 2 g davon mit 100 ml destilliertes Wasser (Ansatz 1:50) in einen PE-Behälter gegeben, dieser verschlossen und 12 Stunden lang über Kopf geschüttelt. Die Bestimmung der eluierten Salze erfolgte nach der DIN EN ISO 11885 E22 für die Kationen und nach der DIN ISO 10304-1 für die Anionen. Plausibilität und Qualität der Analysen wurden durch Ionenbilanzierung und den Vergleich von gemessener und berechneter elektrischer Leitfähigkeit der Eluate unter Einbeziehung des pH-Wertes (= Hydroxylionen-konzentration) kontrolliert.

**Tabelle 3: Wasserlösliche Salzgehalte in den Sandsteinproben**

Probe No.	Sulfat [Masse%]	Nitrat [Masse%]	Chlorid [Masse%]	Calcium [Masse%]	Magnesium [Masse%]	Natrium [Masse%]	Kalium [Masse%]	Gesamtgehalt [Masse%]
1	1,50	0,03	0,02	0,60	0,00	0,01	0,01	2,18
2	0,85	0,06	0,02	0,32	0,01	0,01	0,01	1,27

Zur Interpretation der Salzbelastung von Baustoffen gibt es verschiedene Bewertungsskalen (**Tabelle 4**). In diesem Bericht wird die Skala von Grassegger (1997) verwendet. In **Tabelle 3** mit den Ergebnissen der Salzanalysen wurden die Anionengehalte entsprechend der Farbgebung für die Intervalle „gering“, „mittel“, „hoch“ und „extrem“ in Tabelle 4 farblich markiert. Die farbliche Kennzeichnung des Gesamtsalzgehaltes orientiert sich nicht am Absolutwert, der beispielsweise bei stark alkalisch reagierenden Mörteln aufgrund des Calciumhydroxidgehalts hohe Werte annehmen kann, ohne dass bauschädliche Salzgehalte i. e. S. vorliegen, sondern am Gehalt **und** der Art der vorliegenden Anionen und deren Kombination mit Kationen, um die unterschiedliche Bauschädlichkeit von Salzen zu berücksichtigen.

**Tabelle 4 : Bewertungsskalen für die Salzbelastung von Baustoffen**

Anion	unbelastet	gering			mittel			hoch		extrem	
Sulfat [M.-%]	<0.024	<0.5	< 0.10	> 0.024 <0.077	0.5 – 1.5	0.1 - 0.5	> 0.077 <0.24	>1.5	>0.5	>0,24 <0.77	> 0.77
Nitrat [M.-%]	<0.016	<0.1	<0.05	> 0.016 <0.05	0.1 – 0.3	0.05 - 0.15	> 0.05 <0.18	>0.3	>0.15	>0,18 <0.50	> 0.50
Chlorid [M.-%]	<0.008	<0.2	<0.05	> 0.008 <0.026	0.2 –0.5	0.05 - 0.5	> 0.026 <0.08	>0.5	>0.5	>0,08 <0.28	> 0.28

WTA-Merkblatt 4-5-99/D

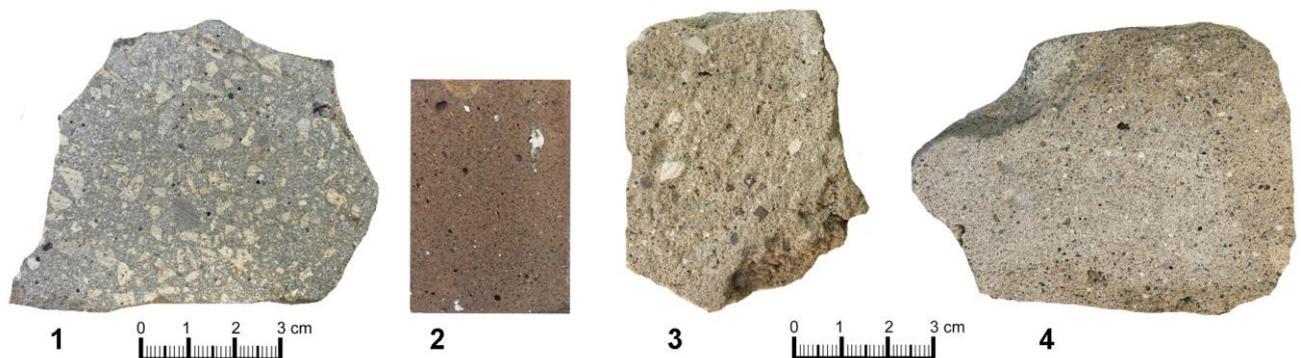
- gering: Maßnahmen im Ausnahmefall erforderlich - mittel: weitergehende Untersuchungen erforderlich, Maßnahmen im Einzelfall erforderlich - hoch: weitergehende Untersuchungen und Maßnahmen erforderlich

G. Grassegger: Die Verwitterung von Natursteinen an Bauten und Baudenkmälern.- in Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, hrsg. vom Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e. V., Ebner Verlag Ulm, 1997, 53 Seiten

C. Arendt & J. Seele: Feuchte und schädliche Salze in Gebäuden“, Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinfelden-Echterdingen, 2000

### 3.2 Untersuchung von Mörtelproben

Von den Restauratoren wurden vier makroskopisch deutlich unterscheidbare Mörtel (**Abbildung 8**), die als Putze, Steingergänzungen, etc. Verwendung fanden und sich verschiedenen Reparaturphasen zuordnen lassen, beprobt und im Labor hinsichtlich der Zusammensetzung und verschiedener Kennwerte untersucht.



**Abbildung 8: Typische Reparaturmörtel 1 – 4 von der Nordseite der Moritzkirche**

### 3.2.1 Phasenanalyse und chemische Analyse der Mörtelproben

Die Phasenzusammensetzung der „Mörtelproben“ wurde durch Röntgenpulverdiffraktometrie bestimmt. Bei Bestrahlung mit Röntgenlicht erzeugt jeder kristalline Festkörper durch Interferenz der an den Netzebenen des Kristallgitters gebeugten Röntgenstrahlen ein substanz-spezifisches Diffraktogramm. Diesem werden die Reflektions- bzw. Beugungswinkel bei gegebener Wellenlänge der Röntgenstrahlung entnommen und mit der Bragg'schen Gleichung in die entsprechenden Netzebenenabstände umgerechnet. Da die Netzebenenabstände phasen-charakteristisch und für viele Tausend anorganischer und organischer Verbindungen in Datenbanken abgelegt sind, lassen sich durch Vergleich gemessener und tabellierter Werte kristalline Phasen identifizieren.

Bei Phasengemischen lassen sich die einzelnen Bestandteile, wenn sie mit ca. 1 Masse% und mehr an der Zusammensetzung beteiligt sind, durch die charakteristischen Beugungspeaks bestimmen. Unter günstigen Voraussetzungen (größenordnungsmäßig vergleichbare Massenschwächungskoeffizienten der auftretenden Phasen und Abwesenheit von Textureffekten) können die Peak-Intensitäten zur Abschätzung des mengenmäßigen Anteils einer Verbindung in einem Phasengemisch verwendet werden.

Die Proben wurden durch Zerreiben im Achatmörser zerkleinert, und die Schluff-Fractionen (< 0,063mm) mit einem Sieb für die Herstellung der Präparate abgetrennt. Die Ergebnisse der röntgenographischen Phasenanalysen sind der **Tabelle 5** zu entnehmen. Die Mengenanteile der Phasen werden durch die Position in der Aufzählung (von links nach rechts in abnehmender Menge), Schriftgröße und Fettdruck semiquantitativ ausgedrückt..

**Tabelle 5: Qualitative Phasenzusammensetzungen der Mörtelproben**

Probe No.	Identifizierte Phasen
<b>MÖR_1</b>	<b>Quarz, Calcit, Portlandit, Plagioklas, Gips, Ettringit, Kalifeldspat</b>
<b>MÖR_2</b>	<b>Quarz, Calcit, Gips</b>
<b>MÖR_3</b>	<b>Quarz, Calcit, Kalifeldspat, Plagioklas</b>

### 3.2.2 Energiedispersive Röntgenfluoreszenzspektroskopie (EDXRF)

Von drei Mörtelproben wurde die chemische Zusammensetzung mit der EDXRF bestimmt. Zu diesem Zweck wurden die Proben analysenfein aufgemahlen, homogenisiert und mit Zusatz von Karnaubawachs und 2%iger Mowiollösung zu Tabletten gepresst. Die Prüflinge wurden im Hochvakuum mit Elektronen beschossen und zur Aussendung von Röntgenphotonen angeregt, deren Energie für jedes Element charakteristisch ist und vom Detektor gemessen wird. Die Intensität des Signals bei der jeweils charakteristischen Energie ist der Konzentration des betreffenden Elements in der Probe proportional. Die Messergebnisse in Masseprozent der detektierten Elemente sind in **Tabelle 6** zusammengefasst.

**Tabelle 6 : Chemische Zusammensetzung von Mörtelproben**

Probe No.	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	Summe
<b>MÖR_1</b>	0,21	0,82	1,62	60,42	-	2,11	4,06	27,91	0,39	-	2,54	-	100,00
<b>MÖR_2</b>	1,09	1,01	3,46	34,79	1,31	6,76	5,91	20,08	0,75	1,16	23,15	0,52	100,00
<b>MÖR_3</b>	0,39	1,55	1,45	20,08	-	2,84	4,29	67,39	0,04	-	1,96	-	100,00

Die Röntgenbeugungsdiagramme und Röntgenfluoreszenzspektrogramme der Mörtelproben MÖR 1 – 3 sind in den **Abbildungen 9 – 11** dargestellt.

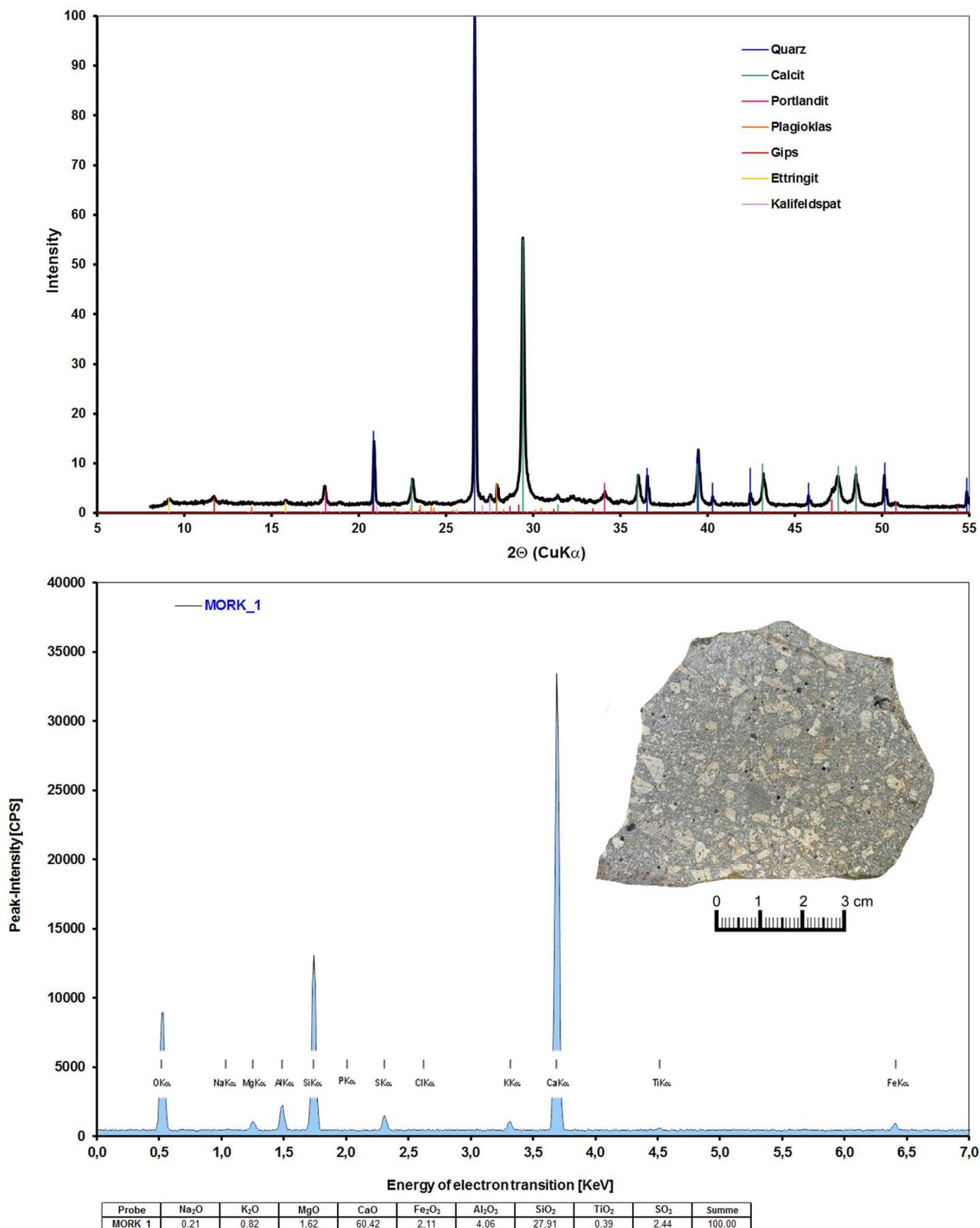


Abbildung 9: Röntgendiffraktogramm und Röntgenfluoreszenzspektrum der Mörtelprobe 1

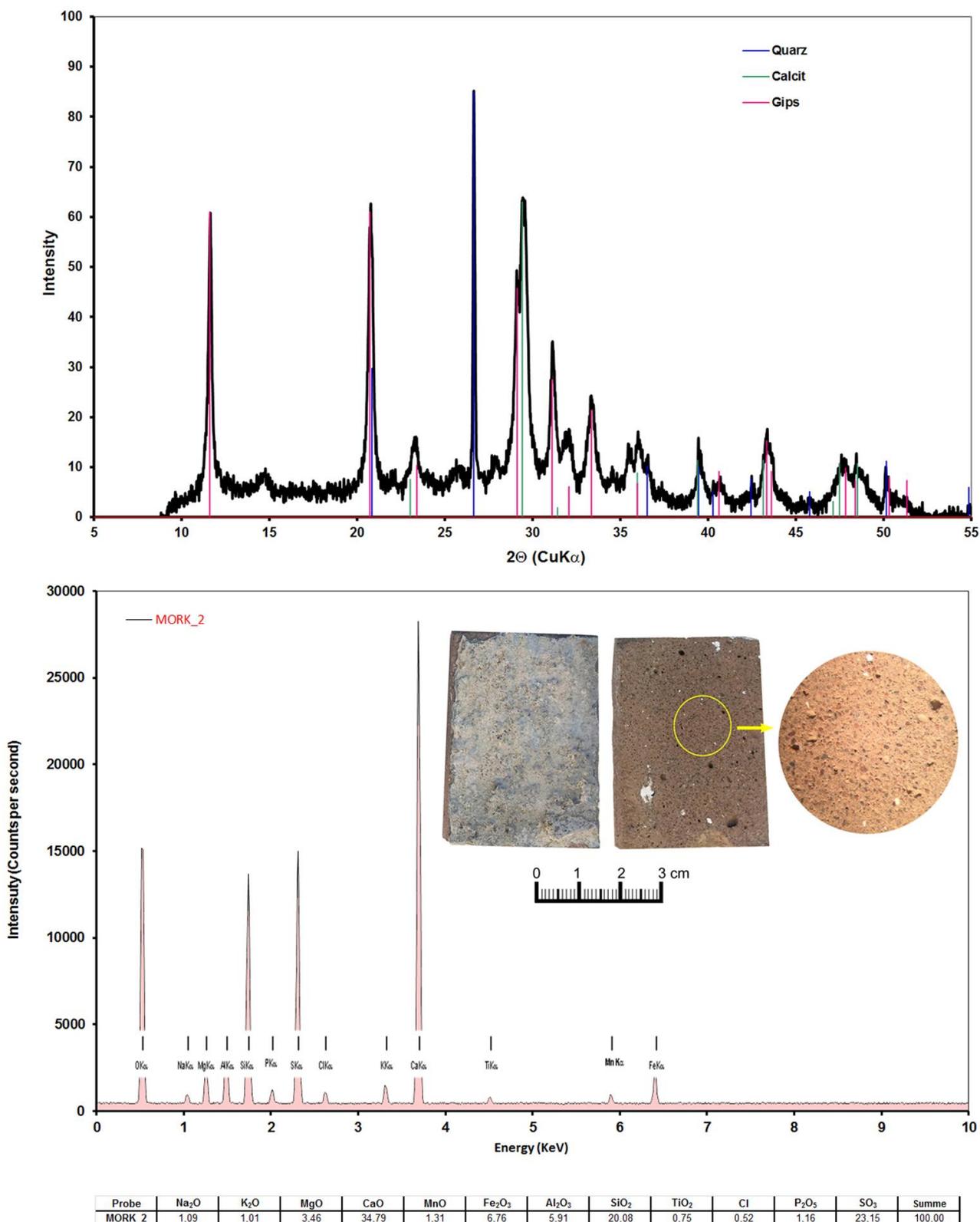


Abbildung 10: Röntgendiffraktogramm und Röntgenfluoreszenzspektrum der Mörtelprobe 2

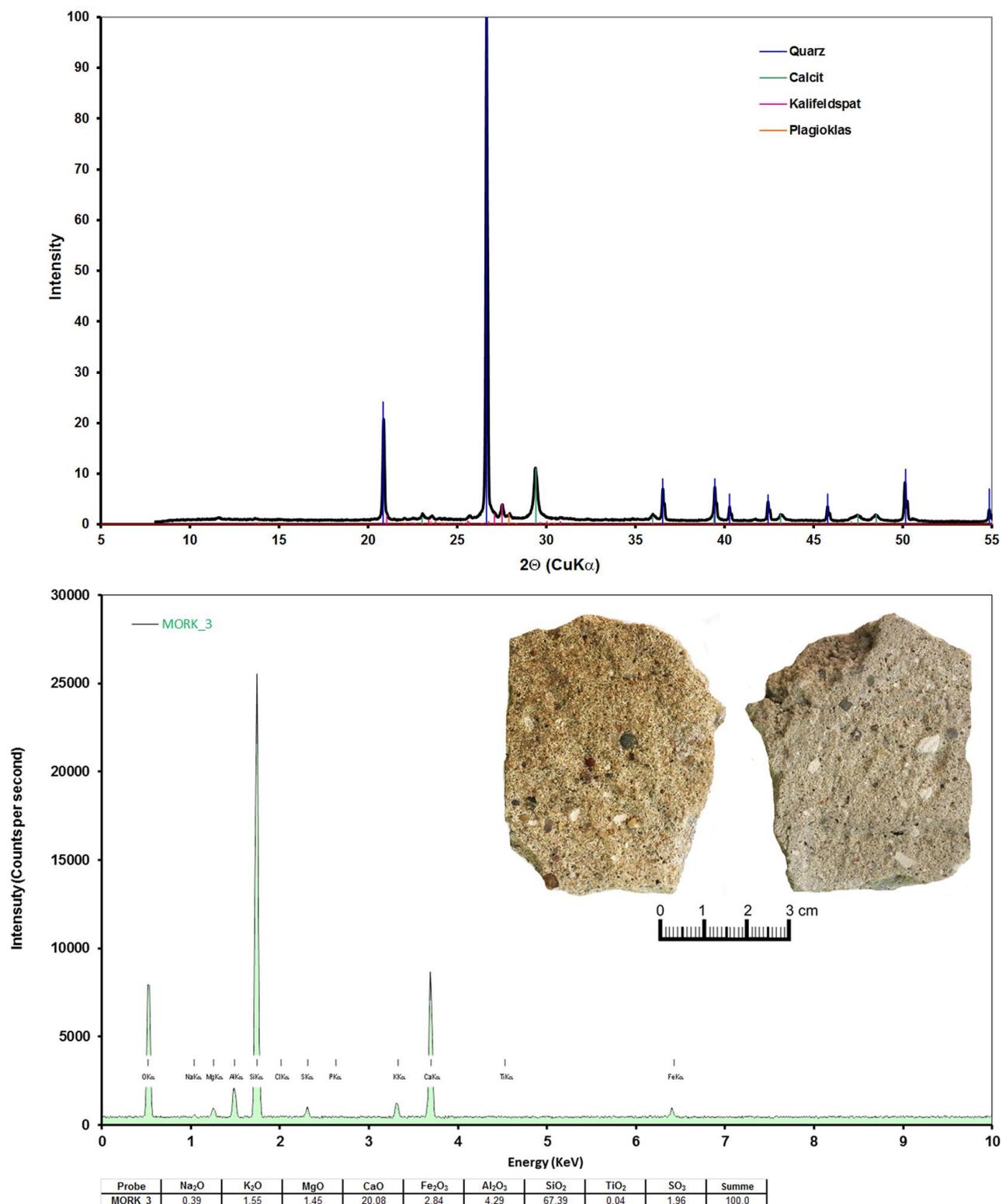


Abbildung 11: Röntgendiffraktogramm und Röntgenfluoreszenzspektrum der Mörtelprobe 3

### 3.2.3 Bestimmung der Sieblinie und des Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisses der Mörtelproben

Von den vier in **Abbildung 8** gezeigten Mörtelproben erfolgte die Bestimmung der Sieblinie und des Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisses. Zu diesem Zweck wurden die zuvor schonend zerkleinerten Mörtelproben mit 1n Salzsäure behandelt. Dabei werden Calciumcarbonat, das aus der Reaktion von Portlandit (Kalkhydrat) mit Luftkohensäure hervorgegangen ist, und CSH-Phasen als Hydratationsprodukte von hydraulisch reagierenden Bindemittelphasen (Di- und Tricalciumsilikat) aufgelöst bzw. in gallertartiges, wasserlösliches Silikat überführt. Nach dem Lösen des gallertartigen Silikats mit einem Überschuss an Wasser und Dekantieren der aufgerührten Lösung und Abfiltrieren des mehrfach mit destilliertem Wasser gewaschenen, säureunlöslichen Rückstands werden gelöste und dispergierte Bindemittelbestandteile vom Zuschlag getrennt. Die Massendifferenz zwischen Probeneinwaage und getrocknetem Rückstand entspricht dem Bindemittelanteil. Das Bindemittel/Zuschlag- (B/Z-)Verhältnis ist der auf 1 im Zähler normierte Quotient von Bindemittel und Zuschlag in Masseprozent. Vom säureunlöslichen Rückstand wurden das Histogramm (**Abbildung 12**) und die Sieblinie (**Abbildung 13**) der Korngrößenverteilung des Zuschlags mit einem acht Siebe umfassenden Prüfsiebsatz nach der DIN 4188 ISO 565-T1 ermittelt.

Die Zuschlagsbestandteile wurden unter dem Binokular begutachtet und identifiziert. Durch die Mikroskopie des Zuschlages werden eventuell vorhandene, den Mörtel charakterisierende Zuschlagkomponenten erkannt. Dies können beispielsweise Ziegelsplitt oder Schlacke mit leicht hydraulischer Wirkung oder Holzkohle zum Fernhalten des Bewuchses mit Moosen und Algen sein.

Charakteristische Gesteinsbruchstücke wie Schiefer, Granit, Porphyr oder Schwerminerale wie Granat, Disthen, Staurolith, Turmalin, Titanit, Zirkon, Magnetit, etc. verweisen auf die Herkunft des Sandes. In der Regel dominieren in den Kornfraktionen >2 mm und >1 mm noch Gesteinsbruchstücke.

Mit abnehmendem Korndurchmesser liegt die Größe der die Gesteine aufbauenden Minerale im Bereich der Siebmaschenweiten, so dass es zu einer Auftrennung des Gesteins in die Einzelminerale Quarz, Feldspat, Glimmer, etc. kommt. Daher ist im Regelfall ab der Kornfraktion > 0,5 mm Quarz der dominierende Zuschlagbestandteil. Von Bedeutung ist ferner der Rundungsgrad der Körner. Die Porosität gut gerundeter Sande ist kleiner als die von splittrigen Sandkörnern und mit ihnen hergestellte Mörtel benötigen weniger Bindemittel zur Füllung des Porenraumes.

In den **Tabellen 7a und 7b** beschränken sich die Angaben zur Mineralogie der Zuschläge auf die ersten fünf größten Kornfraktionen. Nur bei Abweichungen vom oben geschilderten Regelfall und beim Auftreten von mörteltechnisch interessanten Bestandteilen erfolgen auch Angaben zur qualitativen Zusammensetzung kleinerer Kornfraktionen.

**Tabelle 7a: Korngrößenverteilung des Zuschlags in Masse%, Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis und qualitative Zusammensetzung des Zuschlags**

Kornfraktion	Probe MÖR 1	Zuschlagkomponenten	Probe MÖR 2	Zuschlagkomponenten
<0,100	85,45		1,7	
>0,100	5,60		12,6	
>0,200	3,56		32,2	
>0,315	1,73		16,9	
>0,400	1,12	Quarz, Feldspat	14,1	Quarz, Feldspat
>0,500	0,71	Quarz, Feldspat	9,4	Quarz, Feldspat
>0,630	0,81	Quarz, Feldspat	11,3	Quarz, Feldspat
>1,000	1,02	Quarz, Feldspat	1,8	Quarz, Feldspat
>2,000	0,0		0,0	
<b>Summe</b>	100,0		100,0	
<b>Größtkorn [mm]</b>	2		1,5	
<b>B/Z-Verhältnis <sup>1)</sup></b>	<sup>1)</sup>		1:2,2	

<sup>1)</sup> nicht auswertbar, da der Zuschlag zu einem großen Teil aus Calcitsplitt besteht

Tabelle 7b: Korngrößenverteilung des Zuschlags in Masse%, Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis und qualitative Zusammensetzung des Zuschlags

Kornfraktion	Probe MÖR 3	Zuschlagkomponenten	Probe MÖR 4	Zuschlagkomponenten
<0,100	3,22		12,57	
>0,100	12,32		14,57	
>0,200	22,59		33,00	
>0,315	13,25		16,05	
>0,400	12,09	Quarz, Feldspat	11,62	Quarz, Feldspat
>0,500	10,52	Quarz, Feldspat	6,28	Quarz, Feldspat
>0,630	13,08	Quarz, Feldspat	4,59	Quarz, Feldspat
>1,000	7,51	Quarz, Feldspat, Granit, Flint	1,32	Quarz, Feldspat
>2,000	5,43	Quarz, Feldspat, Granit, Flint	0,00	
Summe	100,0		100,0	
Größtkorn [mm]	5		1,5	
B/Z-Verhältnis *)	1:4		1:2	

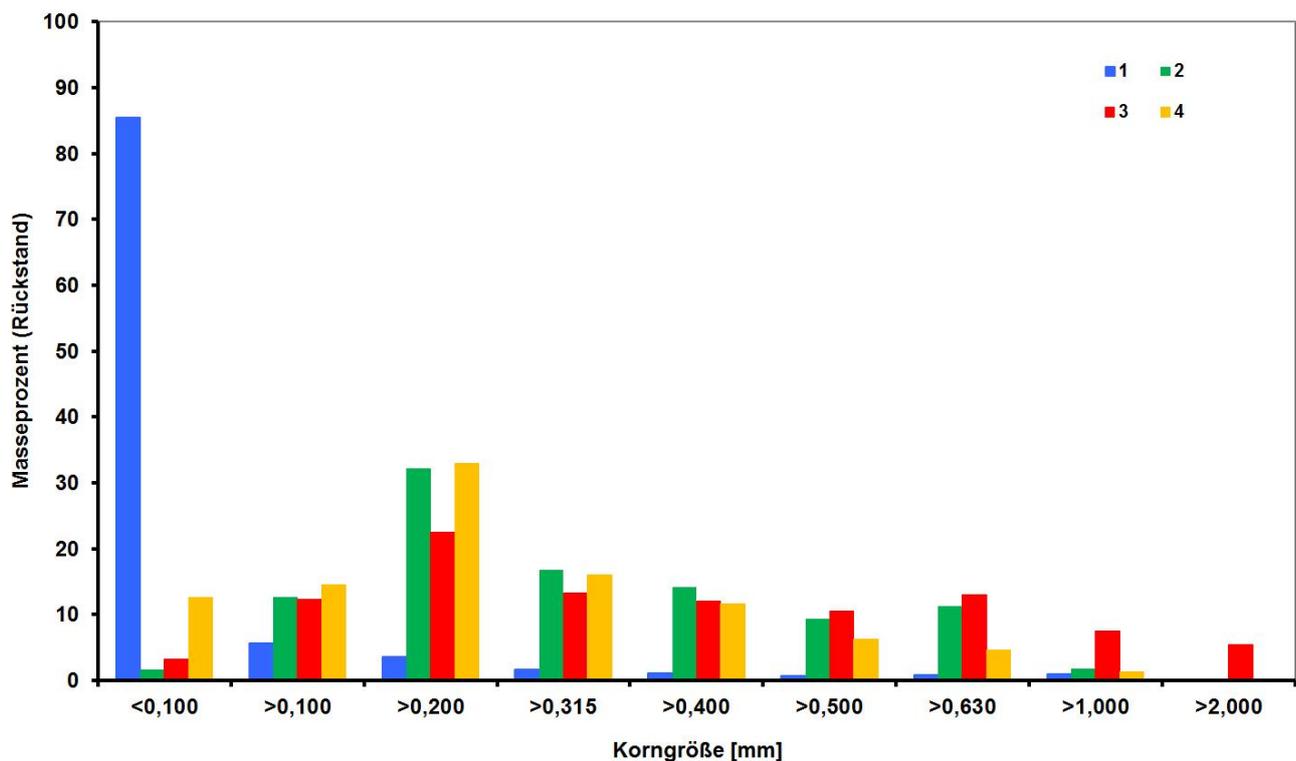


Abbildung 12: Histogramme Korngrößenverteilungen des Zuschlags in den Mörtelproben 1 – 4 (siehe Abbildung 8)

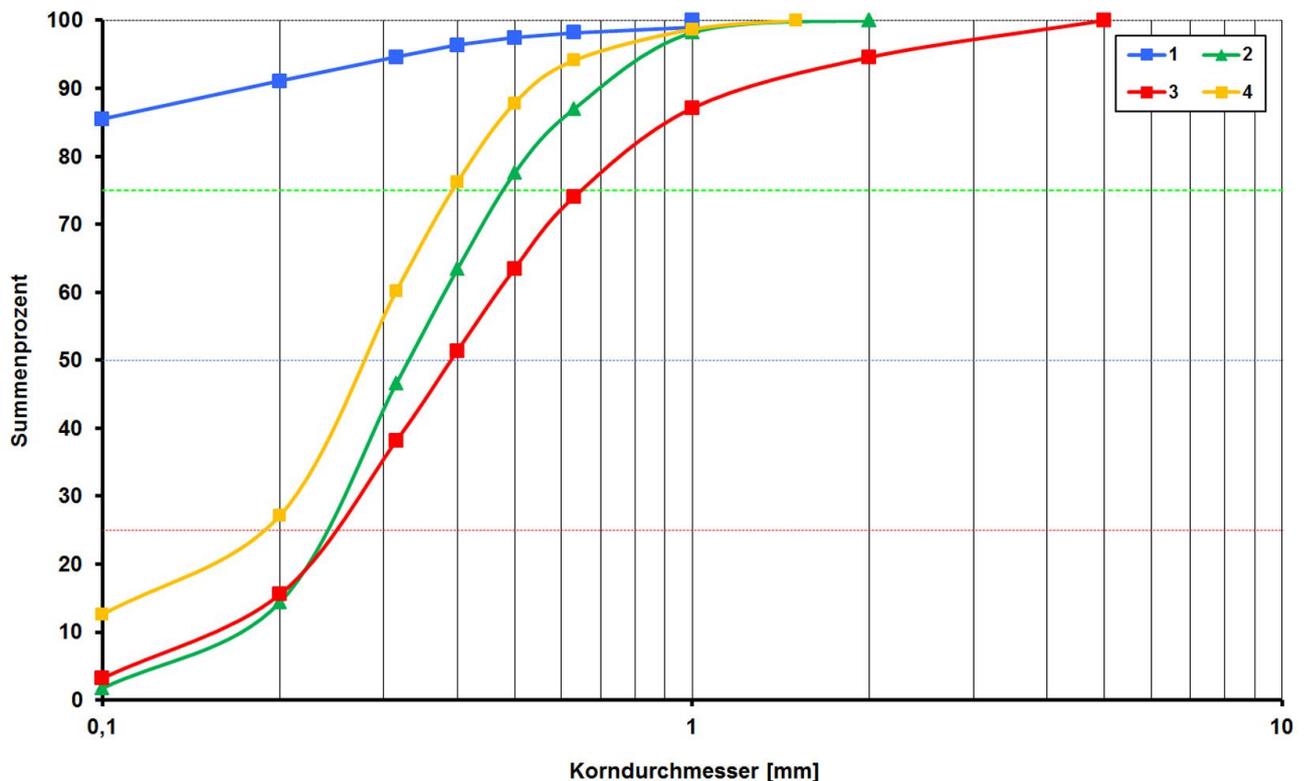


Abbildung 13: Sieblinien des Zuschlags in den Mörtelproben 1 – 4 (siehe Abbildung 8)

### 3.2.3 Bestimmung bauphysikalischer Kennwerte von Sandstein- und Mörtelproben

Von Sandstein- und Mörtelproben wurden wichtige bauphysikalische Kennwerte wie die Rohdichte, die Wasseraufnahme bei 24stündiger Lagerung unter Wasser bei Atmosphärendruck und im Unterdruck, der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient, die dynamischen Elastizitätsmoduli und die Druckfestigkeit bestimmt. Für den Vergleich dieser Werte mit publizierten Werten ist zu beachten, dass die Rohdichte, die Wasseraufnahme, der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient und die Druckfestigkeit nach den entsprechenden DIN-Vorschriften (DIN EN 1925, 1926, 1936, 13755, ) bestimmt wurden und deshalb mit anderen, ebenfalls normgerecht gemessenen Proben vergleichbar sind. Die Kompressions-, Dehn- und Scherwellengeschwindigkeit und der der dynamische Elastizitätsmodul, wurden mit der Dehnwellen-Resonanzfrequenz-Methode nach Erfurt und Krompholz (1996) an zylindrischen bzw. prismatischen Prüfkörpern bestimmt. Alle ermittelten Werte sind in **Tabelle 8** zusammengefasst.

Vergleicht man den dynamischen E-Modul des Sandsteins in Tabelle 8 (18,2 kN/mm<sup>2</sup>) mit den E-Modul-Angaben für die Sandsteinbohrkerne in **Tabelle 9** (alle Werte  $\leq 10,95$  kN/mm<sup>2</sup>) stellt sich die Frage, welcher Wert ist korrekt? Die Antwort hierauf ist, dass beide Werte methodenspezifisch korrekt sind, d. h. das Ergebnis ist methodenabhängig und direkt vergleichbar sind nur Kennwerte, die mit der gleichen Methode bestimmt wurden. Da die Entnahme größerer Proben, die zur Anfertigung normgerechter Prüfkörper erforderlich wären, am (Bau)denkmal oft nicht in Frage kommt, die Entnahme von Bohrkernen aber bisweilen toleriert wird, hat sich ein von Wittmann und Prim (1983) entwickeltes Auswertungsverfahren für Biegezugfestigkeitstests an Bohrkernscheiben etabliert, welches auch hier bei der Beurteilung der Ergebnisse der KSE-Festigungstests angewendet wurde. Es liefert Werte für die Biegezugfestigkeit und den E-Modul, die aber wiederum nicht direkt mit Werten nach der DIN EN 12372 (Biegezugfestigkeit) und DIN EN 14580 (statischer Elastizitätsmodul) vergleichbar sind.

Tabelle 8: Bauphysikalische Kennwerte von Sandstein- und Mörtelproben

Petrophysikalischer Kennwert	[Einheit]	Probe			
		Sandst.	MÖR 1	MÖR 2	MÖR 3
$\rho_{\text{roh}}$ [DIN EN 1936]	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,09	2,08	1,92	2,08
$\Phi$ [DIN EN 1936]	[%]	19,3	-	-	-
$W_{\text{atm}}$ [DIN EN 13755]	[Masse%]	6,51	6,16	10,70	8,83
$W_{\text{vak}}$	[Masse%]	9,23	7,07	12,69	10,87
<b>S</b>	[-]	0,71	0,87	0,84	0,81
w-Wert [DIN EN 1925]	[kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> ]	2,12	-	-	-
$v_{p1}$ [UNG, UPE 20 kHz]	[km/s]	2,95	4,19	3,75	3,88
dyn. E-Modul [ $v_p^2 \times \rho_{\text{roh}}$ ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	18,17	36,45	27,11	31,35
$v_{p2}$ [Dehnenwellenprüfköpfe]	[km/s]	3,10	4,21	3,56	3,72
$v_D$	[km/s]	2,87	4,00	3,42	3,53
$v_S$	[km/s]	1,83	2,59	2,23	2,28
Resonanzfrequenz	[kHz]	22,28	29,3	36,93	33,11
dyn. E-Modul	[kN/mm <sup>2</sup> ]	17,17	33,45	22,50	25,70
G-Modul	[kN/mm <sup>2</sup> ]	6,95	14,0	9,55	10,72
Poisson-Zahl	[-]	0,24	0,20	0,18	0,20
$\beta_D$ // sf [DIN EN 1926]	[MPa]	32,6	45,7	-	-
$\beta_D$ $\perp$ sf [DIN EN 1926]	[N/mm <sup>2</sup> ]	33,7	-	-	-

#### 4 Versuche zur Festigung von absandenden Werksteinoberflächen mit Kieselsäureester

Da absandende und abschälende Naturwerksteine keine geeigneten Untergründe für das Antragen von Steinerfüllmörteln darstellen, müssen die verwitterten Oberflächen zuvor gefestigt werden. Hierfür eignen sich Kieselsäureester-Produkte, die mit unterschiedlichen Gelabscheidungsraten (10%, 30% und 50%) angeboten werden. Je mehr Feststoff nach dem Verdunsten des Lösungsmittels im Porenraum zurückbleibt, desto stärker ist die festigende Wirkung. Leider geht die stärkere Festigung mit einem weniger tiefen Eindringen des höher konzentrierten Kieselsäureesters und dem Risiko der induzierten Schalenbildung einher. Aufgrund der mäßigen kapillaren Wasseraufnahme (w-Wert = 1,2 – 3,0 kg/m<sup>2</sup>h<sup>0,5</sup>) der Sandsteinbohrkerne schied die Verwendung eines Kieselsäureesters mit 50% Gelabscheidungsrate von vornherein aus, und die Versuche zur Festigung absandender Werksteinoberflächen wurden mit Funcosil 100 (10% Gelabscheidungsrate) und Funcosil 300 (30% Gelabscheidungsrate) durchgeführt.

Die Bohrkerne stammen aus Werksteinen eines Pfeilers auf der Nordseite des Chores. Es wurden jeweils zwei Bohrkerne dicht nebeneinander ausgebohrt (**Abbildung 14**), von denen der eine für den Test (gefestigt) und der andere als Referenz (ungefestigt) verwendet wurde.

Die Tränkung des Porenraums des Sandsteins mit Kieselsäureesters erfolgte auf unterschiedliche Weise: 1. kapillar saugend aus einer mit Funcosil 300 getränkten Zellulose-Schicht in der Petrischale (**Abbildung 15**) und 2. durch Applikation von Funcosil 300 bzw. Funcosil 100 aus einer Injektionsspritze auf die Kernoberfläche. Das erste Verfahren, vor Ort durch Auflegen KSE-getränkter Kompressen zu realisieren, diente dem Zweck, die maximal vom Sandstein aufnehmbare Menge zu bestimmen.

Zusätzlich wurde der Zustand des Sandsteins vor und nach der Festigung durch Ultraschallgeschwindigkeitsprofile parallel zur Kernachse charakterisiert (**Abbildung 16**).



Abbildung 14. Bohrkerne 1, 3 und 6 für KSE-Festigungsverfahren (Kerne 2, 4 und 4 Referenzproben)

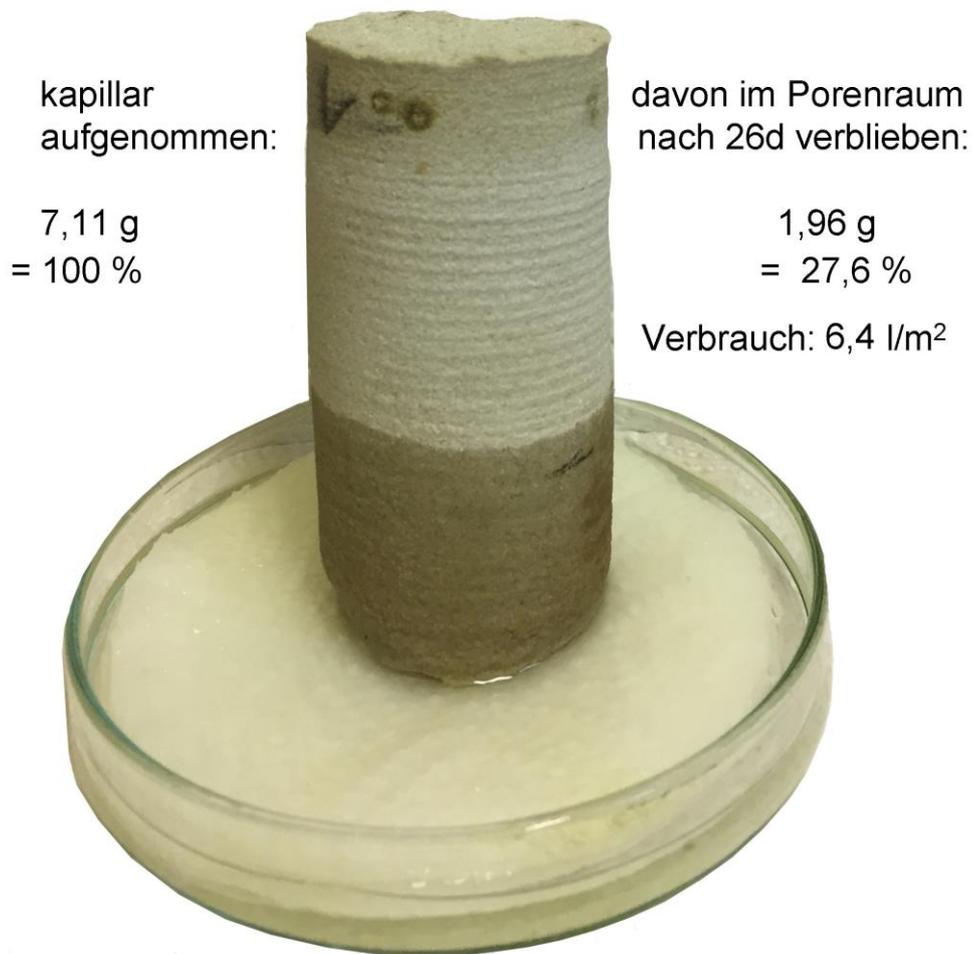


Abbildung 15: Aufnahme von Funcosil 300 durch kapillares Saugen (Steighöhe: 5 cm in 2,5 Std.)

Die Versuchsparameter sind der **Tabelle 9** zu entnehmen.

**Tabelle 9: Versuchsparameter der KSE-Festigung**

Bohrkern	KSE	Applikationsart	aufgenommenes KSE-Volumen [ml]	Verbrauch [Liter/m <sup>2</sup> ]	Gelabscheidung nach 28 d [%]
1	Funcosil 300	KSE-gesättigte Kompresse	8,9	6,4	27,6
3	Funcosil 300	Injektionsspritze	6,4	4,6	27,8
6	Funcosil 100	Injektionsspritze	5	3,6	14,2

Beim Versuch mit Funcosil 100 war nach 26 Tagen die 10%ige Gelabscheidung noch nicht erreicht. Beim Aufsägen der Kerne zur Herstellung der Scheiben für den Biegezugfestigkeitstest war ein deutlicher Lösungsmittelgeruch feststellbar, d.h. das Lösungsmittel war noch nicht vollständig verdunstet. Bei einem parallel verlaufenden Versuch mit Funcosil 100 in der Petrischale war nach 6 Wochen noch immer eine flüssige Phase unter einer dünnen Kieselgeschicht.

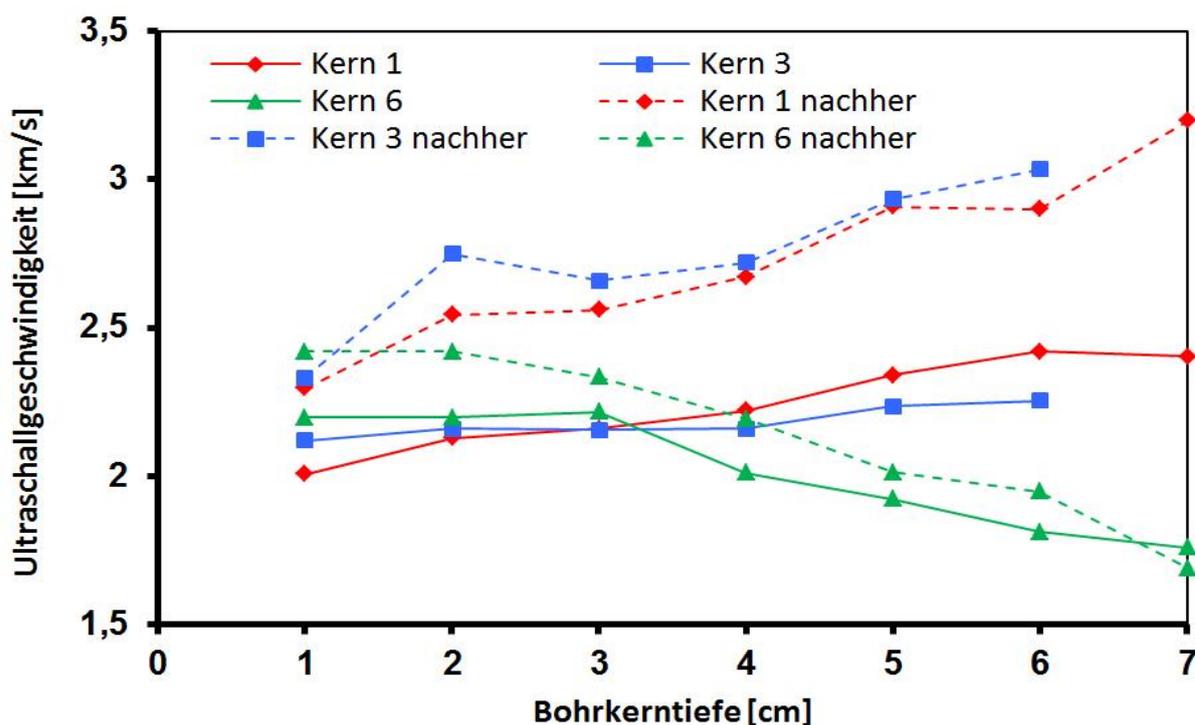


Abbildung 16: Ultraschall-Geschwindigkeitsprofile vor und nach der KSE-Festigung

Tabelle 10: Biegezugfestigkeiten und E-Moduli **ungefestigter** und **gefestigter** Bohrkernscheiben

Probe Nr.:	Tiefe [mm]	d [mm]	h [mm]	$\beta_{bz}$ [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>	E [kN/mm <sup>2</sup> ] <sup>1)</sup>
K 1	1,5-2	42,0	6,68	1,83	4,53
	4,5-5	42,2	6,4	3,19	10,95
	7-7,5	42,0	6,6	4,88	7,64
K 2	1,5-2	41,9	6,687	1,54	2,86
	4,5-5	42,2	6,39	1,81	3,88
	5-5,5	42,3	6,34	2,69	5,52
K 3	1,5-2	42,2	6,26	2,42	5,71
	4,5-5	42,2	6,62	3,93	5,77
	5-5,5	42,2	6,32	4,43	7,84
K 4	1-1,5	41,2	6,36	0,95	1,13
	2,5-3	42,3	6,53	1,25	2,94
	3,5-4	42,2	6,57	1,61	2,88
K 5	1,5-2	42,2	6,19	1,56	1,07
	2-2,5	42,1	6,43	0,52	0,49
	2,5-3	42,0	6,2	0,53	1,1
K 6	1-1,5	42,4	6,67	1,85	3,04
	2,5-3	42,4	6,48	2,11	3,33
	5-5,5	42,2	6,43	0,9	1,01
	5,5-6	42,4	6,48	1,28	1,34

<sup>1)</sup> nach Wittmann und Prim (1983)

Wie beim Vergleich der Ultraschallgeschwindigkeitsprofile und der Biegezugfestigkeiten der ungefestigten und gefestigten Bohrkernscheiben in Abbildung 16 bzw. in Tabelle 19 zu sehen ist, fällt die festigende Wirkung bei Anwendung von Funcosil 300 für beide Applikationsarten erheblich besser aus als dies aufgrund des mäßigen kapillaren Saugvermögens für Wasser zu erwarten war.

## **5 Anmerkungen zu den Ergebnissen**

### **Kapillare Wasseraufnahmekoeffizienten von Sandstein und Mörtel**

Bei den kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten des Sandsteins und der Mörtel fällt auf, dass diese von gleicher Größenordnung sind. Die meistens eintretende Erhöhung des  $w$ -Wertes bei Reinigung der Oberfläche zeigt, dass die Messwerte stark durch Verschmutzung beeinträchtigt werden. Besonders auffällig ist die beim stark verschmutzten Sandstein am Ort der Messung W7, wo von durchschnittlich  $3 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0.5}$  lediglich  $0,2 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0.5}$  übrig geblieben sind. Dass eine solche Steinoberfläche ohne vorausgehende Reinigung keinen Kieselsäureester aufnimmt und sich damit nicht festigen lässt, versteht sich von selbst. Das Problem ist, wie reinige ich eine verwitterte, stark verschmutzte Oberfläche ohne sie zu schädigen, damit ich sie anschließend festigen kann.

### **Bohrhärte**

Die Bohrhärtemessungen auf Sandsteinoberflächen haben eindrucksvoll die allerdings auch haptisch/visuell feststellbare oberflächennahe, hochgradige Entfestigung und Schalenbildung nachgewiesen (Messungen 2, 3, 6, 7, 8, 9). Beim Mörtel auf Naturstein ließ sich die Dicke der Mörtelschicht, wenn sie nicht über 30 mm hinausging, gut nachweisen (Messung 10). Bei anderen Messungen auf Mörtel machten sich bis zu 5 mm große Zuschlagkörner aus Quarz bemerkbar, die angebohrt wurden und zu ansonsten unerklärlichen Anstiegen der Bohrhärte führten (Messungen 1, 4).

### **Haftzugfestigkeit des Antragsmörtels auf Naturstein**

Wenn beim Abziehen des Stempels der Abriss vollständig oder überwiegend im Sandstein erfolgte, wie bei den Messungen 3, 5 und 6, dann wurde tatsächlich die Haftzugfestigkeit des Mörtels am Sandstein bestimmt. Wie Ergebnisse für die genannten Messungen in Tabelle 2 zeigen, können die Werte in Abhängigkeit vom Verwitterungsgrad des Sandsteins sehr unterschiedlich ausfallen. Erfolgte der Abriss im Mörtel, kann der Messwert als eine Art Zugfestigkeit des Mörtels interpretiert werden, die ebenfalls von der Verwitterung abhängig ist. Beispielhaft seien hier Werte von  $2,29 \text{ N/mm}^2$  für eine intakte, schadensfreie Mörtelschicht auf Sandstein im Sockelbereich und  $0,06 \text{ N/mm}^2$  für ein stark verwitterten, abgängigen Putz unterhalb der Dachtraufe genannt.

### **Salzgehalte**

Beim Gehalt wasserlöslicher Salze im Sandstein handelt es sich im Wesentlichen um Gips, was angesichts der zum Teil sehr dicken Gipskrusten nicht überraschend ist. Dicke Gipskrusten werden sich wohl nur durch die Kombination von Anlösen mit Ammoniumcarbonatkompressen und Abtragen mit dem Skalpell ausdünnen oder entfernen lassen.

### **Mörtel**

Von den vier untersuchten Reparaturmörteln fällt der Mörtel 1 dadurch auf, dass er sich auch heute noch am Bauwerk in exzellenter Verfassung zeigt. Er wurde mit Kalksteinsplitt als Zuschlag hergestellt und weist eine sehr hohe Druckfestigkeit auf. Durch die Verwendung von Kalksteinsplitt ließ sich allerdings nicht das Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis ermitteln, da die Salzsäure beim Auflösen von Calciumcarbonat keinen Unterschied macht bei carbonatischem Bindemittel und carbonatischem Zuschlag. Dieser Mörtel zeigt auch die geringste Wasseraufnahme.

Ebenfalls auffällig ist aufgrund eines deutlichen Gipsgehalts die Mörtelprobe 2, die sich auch durch einen sehr feinkörnigen Zuschlag und rötlichen Farbton auszeichnet. Möglicherweise war sie als Steingängungsmörtel für roten Buntsandstein gedacht. Als konventionelle Kalkzementmörtel lassen sich die Mörtelproben 3 und 4 ansprechen, die sich im Wesentlichen durch die Sieblinien unterscheiden. Aufgrund der hohen Wasseraufnahme zweigen sie bei entsprechender Exposition eine entsprechende Verwitterungsanfälligkeit.

Durch die Untersuchungen wurden für die Konzipierung des Instandsetzungskonzeptes wesentliche Kennwerte von am Bauwerk befindlichen Baumaterialien ermittelt. Die Notwendigkeit einer vorausgehenden Reinigung stark verschmutzter Sandsteinoberflächen, die mit Kieselsäureester gefestigt werden sollen, wurde aufgezeigt. Die Festigungstests haben gezeigt, dass die Anwendung von Funcosil 300 zu guten Ergebnissen führt. Allerdings dürfte der hohe Verbrauch pro m<sup>2</sup> einer großflächigen Anwendung entgegenstehen, und der KSE primär bei der Konservierung von Bauzier zum Einsatz kommen. Ferner haben die Untersuchungen gezeigt, dass der bei vorausgegangenen Instandsetzungsarbeiten eingeschlagene Weg anstelle von großvolumigem Steinaustausch Reparaturen an stark verwittertem Naturstein mit angepassten Mörteln vorzunehmen, nicht verkehrt war und für die anstehenden Arbeiten wegweisend sein kann.