



Stendal, St. Marien

DBU-Projekt „Entwicklung eines Kompressensystems zur Entsalzung der Ziegeloberflächen“ - 1. Zwischenbericht zu den Voruntersuchungen an ausgewählten Ziegeloberflächen



Beauftragt durch: Förderverein Glocken St. Marien Stendal
Bearbeiter/in: Dr. Jeannine Meinhardt
Anzahl der Seiten: 22

Halle, 12.02.2010

Veröffentlichungen von Untersuchungsberichten, auch auszugsweise, und Hinweise auf Untersuchungsergebnisse zu Werbezwecken bedürfen in jedem Einzelfall der schriftlichen Einwilligung des Instituts für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Arbeitsstellen in den Ländern:

Sachsen:

Schloßplatz 1
01067 Dresden

Tel.: 0351-48430-408/09/10/27
Fax.: 0351-48430-468

Internet: www.idk-info.de

Sachsen-Anhalt:

Domplatz 3
06108 Halle

Tel.: 0345-472257-21/22/23
Fax.: 0345-472257-29

e-mail: info@idk-info.de

Vorstand:

Prof. Stephan Pfefferkorn
Boje E. Hans Schmuhl
Ellen Schmid-Kamke

Geschäftsführer:

Dipl.-Ing. Uwe Kalisch

Registergericht Dresden: VR 2891

Bankverbindung:

Ostsächsische Sparkasse Dresden
Konto-Nr.: 3120 115 524
BLZ: 850 503 00

Steuer-Nr. 201 140 11356

Ust-ID: DE234216408

Inhalt

1.	Einleitung.....	3
2.	Probenahme	4
3.	Methodik.....	9
4.	Ergebnisse.....	11
5.	Zusammenfassung	21
6.	Literatur	21

Abbildung Deckblatt: Seitenkapelle und umliegende Bereiche mit z.T. massiven Salzausblühungen, Südseite des Kirchenschiffes, St. Marien, Stendal

1. Einleitung

Das wesentliche Projektziel des zu bearbeitenden DBU-Vorhabens besteht in der Entwicklung geeigneter Entsalzungskompressen für die Ziegelsteinvarietäten der Kirche St. Marien in Stendal. Aus der Diversität der Backsteinqualitäten und den unterschiedlichen Versalzungsphänomenen (siehe Abb. 1), die auf eine Salzproblematik in Größenordnungen hinweisen, ergeben sich Problemstellungen, die aus den bisherigen Untersuchungs- und Forschungsergebnissen und dem Erfahrungsschatz bereits erfolgter Restaurierungsarbeiten nicht zu beantworten sind.



Abb. 1: Ausblühungen in verschiedenen Bereichen im Inneren der Kirche

Um die Schadstoffmengen in den Wandflächen des Kirchenschiffs und der Seitenkapellen zu ermitteln und deren Herkunft umfänglich zu klären, wurden im Rahmen des Ortstermins am 27. Oktober 2009 in repräsentativen Bereichen Tiefenprofile zur Ermittlung der Gehalte löslicher Bestandteile (auch Art der Salze) und der Feuchte angelegt. Zu dem sind oberflächliche Ausblühungen und Krusten (Wand und Fußboden, Außenfassade) für eine Röntgenanalyse entnommen worden. Des Weiteren wurden an verschiedenen Ziegelvarietäten erste Messungen der kapillaren Wasseraufnahme ausgeführt. (Zeitnah werden diese Messungen noch komplettiert. In einem gesonderten Bericht werden die entsprechenden Ergebnisse separat dargestellt.) Diese Vorinformationen sind notwendig, um einerseits Kenntnisse über die Ziegel zu bekommen, die relevant für die Komposition des Kompressenmaterials sind und zum anderen, um eine Grundlage zur Beurteilung der Entsalzungsmaßnahmen zu erhalten.

Im Rahmen der Voruntersuchungen finden bereits vorliegende Untersuchungen hinsichtlich der Salzbelastung ebenfalls Berücksichtigung.

Das Hauptaugenmerk der Voruntersuchungen liegt auf den löslichen Bestandteilen und der Materialfeuchte. Des Weiteren werden in diesem Bericht auch Ergebnisse zu drei Mörtelanalysen dargestellt.

In Vorbereitung der Entsalzungsmaßnahmen und weiterhin auch in deren Begleitung ist im Rahmen des Ortstermins am 27. Oktober durch das IDK ein Klimagerät zur Aufzeichnung der Temperaturen und relativen Luftfeuchten im Raum und direkt an der Ziegeloberfläche an der Südwand des Kirchenschiffes installiert worden (siehe Abb. 2).

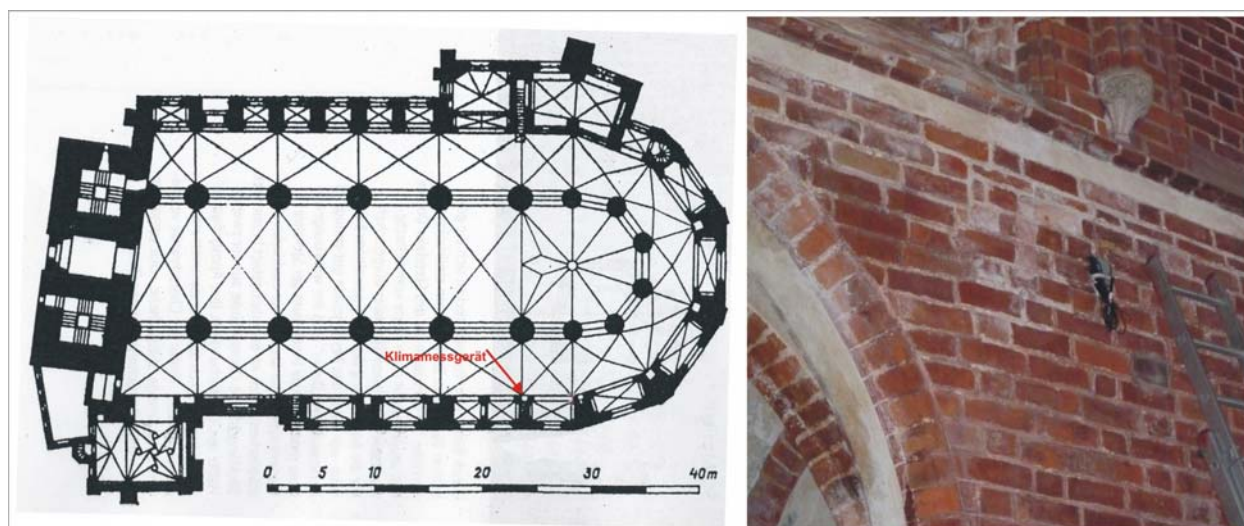


Abb. 2: Position des Klimagerätes

2. Probenahme

Die Probenahme erfolgt am 27. Oktober 2009 in Kooperation des IDK und der Remmers Fachplanung. Die Analysen wurden durch das IDK ausgeführt.

Nachfolgend werden die Bereiche der Beprobung in der Übersicht und im Detail gezeigt und erläutert. Die Tiefenprofile 1 und 2 befinden sich an der Südwand des Kirchenschiffes. TP 1 wurde im Ziegel und TP 2 in der darunterliegenden Fuge angelegt (siehe Abb. 3).



Abb. 3: Position der Tiefenprofile TP 1 (Ziegel) und TP 2 (Fuge), Südwand des Kirchenschiffes, oberhalb der Seitenkapelle

Das Profil TP 1 gibt folgende Mauertiefen wieder: 0-1 cm, 1-2 cm, 2-5 cm, 5-10 cm und 10-20 cm. Diese Messauflösungen sind bei den meisten Tiefenprofilen entsprechend eingehalten. Es werden damit zwei verschiedene Ansätze verfolgt. Einerseits eine besonders hohe Auflösung des für eine Entsalzung überhaupt in Frage kommenden Bereiches zwischen 0 bis ca. 3 cm Tiefe. Des Weiteren möchte man sich mit der großen Tiefe der Profile einen Überblick über noch vorhandene Schadsalzkontaminationen im Hintergrund der potentiell zu entsalzenden Bereiche verschaffen, um unter anderem daraus auf die Effizienz der Entsalzung zu schließen. An der Oberfläche des untersuchten Ziegels wurde die Ausblühung abgenommen und einer röntgenographischen Analyse zugeführt (St_TP1).

Tiefenprofil TP 2 im Fugenbereich hat eine geringer Tiefe: 0-1 cm, 1-2 cm und 2-5 cm. Die Fuge ist sehr weiß und extrem fest. Neben dem Loch des Tiefenprofils TP 2 wurde noch zusätzlich eine Mörtelprobe entnommen.

Die Tiefenprofile TP 3 und TP 4 sind auf der Fläche westlich des gleichen Kapellenbogens entnommen worden (0-1 cm, 1-2 cm, 2-5 cm, 5-10 cm und 10-20 cm). TP 3 ist direkt auf einem stark belasteten Ziegel mit massivem Belag an Ausblühsalzen angelegt worden (siehe Abb. 4). Die Ausblühsalze wurden ebenfalls beprobt (St_TP3). TP 4 hingegen wurde etwas unterhalb von TP 3 auf einem unbelastet wirkenden Ziegel, ohne sichtbare Ausblühungen, erbohrt (siehe Abb. 4).

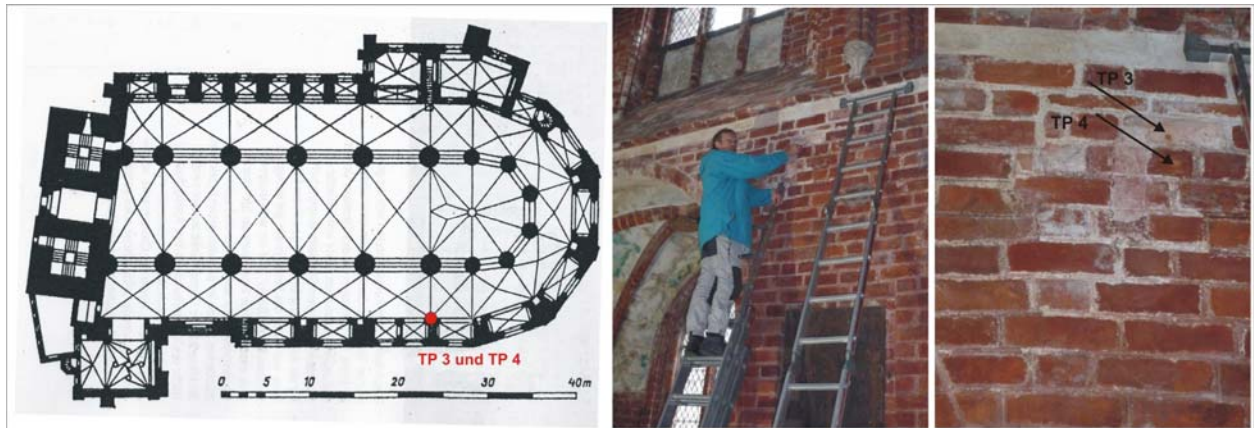


Abb. 4: Position der Tiefenprofile TP 3 (Ziegel mit Ausblühsalzen) und TP 4 (Ziegel ohne Ausblühsalze), Südwand des Kirchenschiffes, westlich der Seitenkapelle

Um verschiedene Problemstellung hinsichtlich der Entsalzung zu berücksichtigen, sind neben den Wandflächen insbesondere auch die Gurtbögen der Gewölbe näher untersucht worden. Im Falle einer tief reichenden Belastung könnte man an derartigen Bauteilen anstatt einer ausschließlichen Kompressenanwendung eine Unterdruckentsalzung einsetzen. Die Tiefenprofile TP 5 und TP 6 befinden sich an dem nord-westlichen Gurtbogen der Seitenkapelle, um die die bislang beschriebenen Profile angelegt wurden (siehe Abb. 5).



Abb. 5: Position der Tiefenprofile TP 5 und 6, in demselben Ziegel ohne Ausblühsalze, an der Westwand der Seitenkapelle

Beide Profile repräsentieren die Tiefen 0-1 cm, 1-2 cm und 2-3 cm und weisen somit eine sehr hohe Messauflösung auf. An der Oberfläche des Tiefenprofile TP 5 lagen fest anhaftende Ausblühungen, die ebenfalls beprobt worden sind. An der Oberfläche von TP 6 lagen keine sichtbaren Ausblühungen. An demselben Gurtbogen sind an der gegenüberliegenden Seite der Bohrlöcher TP 5 und 6 (etwas tiefer) ebenfalls Ausblühungen beobachtet worden, die relativ fest an dem Ziegel anhafteten. Benachbart dazu ist die Oberfläche aufgrund der Salzbelastung und den damit verbundenen Mechanismen schon deutlich geschädigt (siehe Abb. 6). In diesem Bereich ist ebenfalls eine Probe zur Röntgenanalyse entnommen worden (St_Gurtbogen).

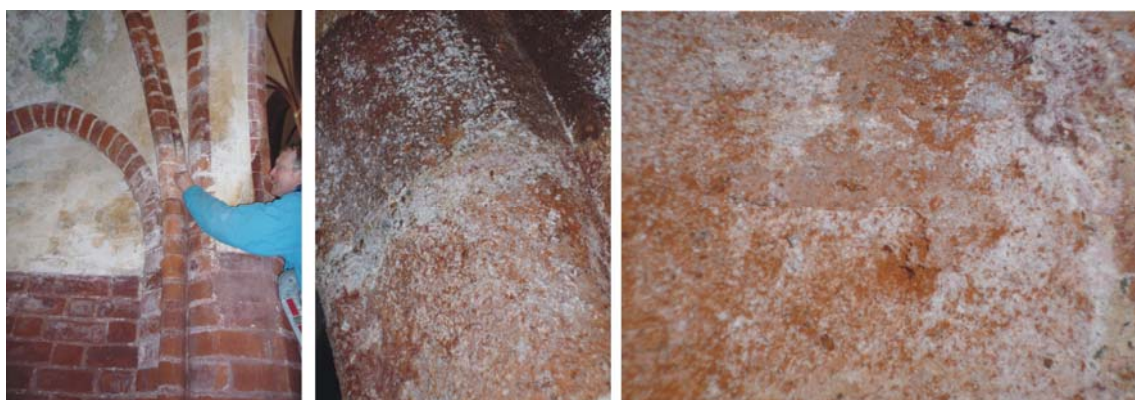


Abb. 6: Ausblühprobe auf der gegenüberliegenden Seite der Tiefenprofile TP 5 und 6

An der Rückwand der Seitenkapelle, um die herum bzw. in der sich auch die Tiefenprofile TP 1-6 befinden, wurden westlich des Fensters auch die Profile TP 7-9 höhenabhängig angelegt (siehe Abb. 7). Auf allen drei in dem Zusammenhang angebohrten Ziegeln konnten auf der Oberfläche keine offensichtlichen Salzausblühungen ausgemacht werden. Entsprechend repräsentieren diese Flächen den augenscheinlich weniger kontaminierten Bereich. Aus allen drei Profilen wurden Bohrmehle in folgenden Tiefenstufen gewonnen: 0-1 cm, 1-2 cm, 2-5 cm, 5-10 cm und 10-20 cm. Die jeweils letzten Proben waren feuchter als der Rest des Profils. Das Tiefenprofil TP 7 liegt 25 cm über dem Boden, TP 8 in einem Meter Höhe und TP 9 bei 1,50 m.



Abb. 7: Position der Tiefenprofile TP 7, TP 8 und TP 9), Südwand des Kirchenschiffes, Rückwand der Seitenkapelle, westlich des Fensters

Innerhalb dieser Kapelle wurde auch eine massive Salzausblühung auf dem Fußboden beprobt (St_Fußboden) (siehe Abb. 8).



Abb. 8: Ausblühung am Fußboden der Seitenkapelle, Südwand des Kirchenschiffes

An der Rückwand der Seitenkapelle, östlich des Fensters, sind Ausblühsalze von der Oberfläche eines Ziegels in ca. 1,55 m Höhe abgenommen worden (siehe Abb. 9). Es handelt sich dabei um einen massiven weichen Salzbelag.



Abb. 9: Ausblühung an der Rückwand der Seitenkapelle, Südwand des Kirchenschiffes

Von außen ist sowohl im Bereich der beprobten Seitenkapelle als auch dort, wo erste Untersuchungen in einer Kapelle weiter westlich gemacht worden sind, helle Sinterfahnen zu erkennen. Im westlichen Bereich wurden sie auf ihre Zusammensetzung hin exemplarisch untersucht (siehe Abb. 10).

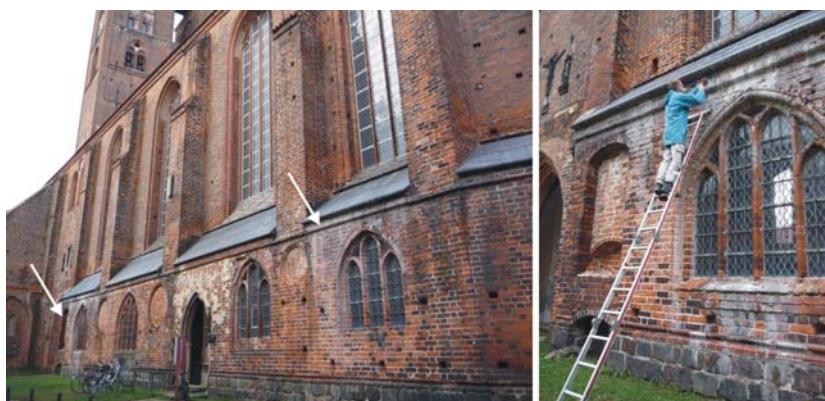


Abb. 10: Sinterfahnen an der Außenfassade (Süd) der Kirche St. Marien im Bereich der aktuell untersuchten Seitenkapelle (rechter Pfeil) und im Bereich der ersten Voruntersuchungen (linker Pfeil). Hier wurde auch eine Probe der versinterten Oberfläche entnommen.

Auf der Nordseite des Kirchenschiffs, im Bereich der Empore, zeigen sich auf der gesamten Fläche deutliche Salzausblühungen (siehe Abb. 11). Dieser Bereich fand ebenfalls Berücksichtigung in den aktuellen Voruntersuchungen.



Abb. 11: Belasteter und geschädigter Bereich an der Nordseite des Kirchenschiffes, oberhalb der Empore; Lage der Tiefenprofile TP 10 und TP 11

An dieser Wand wurden zwei Profile (TP 10 und TP 11) angelegt, jeweils mit folgenden Tiefen: 0-1 cm, 1-2 cm, 2-5 cm, 5-10 cm und 10-15 cm. Neben dem Tiefenprofil TP 10 wurde auch eine Putzprobe zur Analyse entnommen (siehe Abb. 12). Das Profil berücksichtigt den aufliegenden Putz nicht, es beginnt auf der Ziegeloberfläche.



Abb. 12: Lage der Tiefenprofile TP 10 und TP 11 und Entnahmestelle der Mörtelprobe benachbart zu Tiefenprofil TP 10, das komplett durch den Wandquerschnitt gebohrt worden ist (15 cm).

Im Tiefenprofil TP 10 wurde bei 15 cm bereits die Außenseite erreicht. Somit stellt dieses Profil einen kompletten Wandquerschnitt dar. Die geringe Wandstärke ist höchstwahrscheinlich für die massiven Schäden, die sich insbesondere auf den rot angestrichenen und in Ziegeloptik gestalteten Putz beschränken. Im Umfeld von TP 11 war der Putz noch auf der Ziegeloberfläche, allerdings lag er hohl.

Eine weitere Mörtelprobe wurde in der westlichen Seitenkapelle auf der Nordseite des Kirchenschiffes entnommen (Setzmörtel) (siehe Abb. 13).



Abb. 13: Entnahmestelle der Mörtelprobe in der westlichen Kapelle auf der Nordseite des Kirchenschiffes

3. Methodik

Quantitative Salzanalyse

Aus den Proben werden für die quantitative Salzanalyse durch ein standardisiertes Elutionsverfahren wässrige Auszüge im Labor des IDK erstellt. Es erfolgt eine Bestimmung des Anteils der löslichen Bestandteile vom Probematerial. Von den Extrakten wird mittels ionenselektiver Methode von Natrium (Na^+) und mittels Photometrie von den Kationen (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) und den Anionen (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) die jeweiligen Konzentrationen bestimmt. Die quantitative Ionenbestimmung erfolgte mittels HACH DR/2000 Direct Reading Spectrometer; Natrium HACH Sension 2.

Die Analyseergebnisse der Salzuntersuchungen werden in M.-% angegeben und bewertet. Die Darstellung im Diagramm erfolgt in molaren Equivalentkonzentrationen, die sich aus der Massenkonzentration unter Berücksichtigung der Atom- bzw. Molekülmassen und der Ladung errechnen. Durch diese Normierung aller Ionen auf Masse und Ladung lassen sich die Konzentrationen direkt miteinander vergleichen. Bei Schadsalzuntersuchungen ist in der Regel ein kleiner Kationenüberschuss zu verzeichnen, der u. a. damit erklärt wird, dass etwaige OH^- und CO_3^{2-} -Ionen in der Analyse nicht erfasst werden können (Steiger 1998).

Salzanalyse - Röntgenanalytik

Zur qualitativen Materialanalyse sind die Effloreszenzen röntgendiffraktometrisch untersucht worden. Die Röntgenanalyse wurde mit einem Pulverdiffraktometer 1 X'Pert Pro System PANalytical am Institut für Geowissenschaften der MLU Halle-Wittenberg durchgeführt.

Feuchtebestimmung mit der Darrmethode

Die Darrfeuchten bzw. Entnahmefeuchten der für die Salzanalytik vorgesehenen Bohrmehlproben wird durch Trocknung bei 60 °C bis zur Massenkonzanz bestimmt.

Mörtelanalyse

An den Mörtelproben wurde eine nasschemische Mörtelanalyse durchgeführt. Die Analyse der in Salzsäure löslichen Kieselsäure lässt Rückschlüsse auf den Gehalt von hydraulischen Bindemitteln im unter-

suchten Mörtel zu. Durch den Ammoniumchlorid - Aufschluss der Proben werden die Calciumsilikathydrate der hydraulischen Bindemittel aufgelöst und das SiO_2 in einem zweiten Analysenschritt durch Natriumkarbonat in Lösung gebracht. Durch Differenzbildung vor und nach diesem zweiten Arbeitsgang wird der Gehalt an löslicher Kieselsäure bestimmt. Entsprechend dem Gehalt hydraulischer Bindemittel, wie z.B. Zement, hydraulischem Kalk oder Trass steigt der Anteil HCL-löslicher Kieselsäure.

Das HCL-unlösliche gilt als Zuschlagstoffanteil im Mörtel, wenn dieser Anteil als inert gegenüber Salzsäure anzusehen ist. Dazu erfolgt eine mikroskopische Untersuchung der Mörtelprobe auf Karbonatanteile im Zuschlagstoff. Die prozentuale Differenz zu 100 % wird bei der Mörtelanalyse in der Regel als Bindemittelanteil gerechnet, so dass aus der Kenntnis des HCL-unlöslichen das Bindemittel / Zuschlagstoff - Verhältnis hervorgeht.

Die Metallionen werden bis auf die Erdalkali- und Alkalielemente als Hydroxyde abgetrennt. Im Ergebnis der Analyse werden die Metallionen in Form der Summe an Metalloxid (Me_2O_3) angegeben. Die Bestimmung der Summe der Metallionen lässt ebenfalls Rückschlüsse auf den Gehalt von Zement zu. Im Wesentlichen lässt er sich bei Zementen auf den Aufschluss von Aluminat- und Ferratphasen zurückführen. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass auch Bestandteile der Zuschlagstoffe sowie Verunreinigungen anderer Bindemittel zu erhöhten Metallionengehalten führen können.

Als Hauptbestandteile von Gips-, Kalk- und Zementbindemitteln ist die Bestimmung von CaO und MgO von grundlegender Bedeutung. Auf ihr beruht die quantitative Rückrechnung auf Bindemittelgemische, wie z. B. Kalk-Gipsmischungen sowie die Überprüfung der Summe der aufgeschlossenen Bindemittelbestandteile. Die Bestimmung dieser Elemente erfolgt chelatometrisch gegen Murexid und Eriochromschwarz T.

Die Bestimmung des nicht durch Karbonat-, Sulfat- oder Hydroxydverbindungen abgedeckten Calciumanteiles gibt im Vergleich mit der löslichen Kieselsäure ebenfalls einen Hinweis auf hydraulische Bindemittelbestandteile.

Die Bestimmung des Sulfatgehaltes erfolgt gravimetrisch durch Fällung mit Bariumchlorid.

Die Ermittlung des Kohlendioxidgehaltes durch einen Salzsäureaufschluss erlaubt einen rechnerischen Rückschluss auf den reinen Karbonatgehalt der Probe. In Verbindung mit der Calcium-, Magnesium- und Sulfatbestimmung ergibt sich ein Hinweis auf nicht karbonatisch oder sulfatisch gebundene Calcium- und Magnesiumionen, die aus hydraulischen Mörtelbestandteilen (z.B. Calciumsilikathydrat) stammen könnten. Dazu ist der Ausschluss von Calciumhydroxydverbindungen eine wesentliche Voraussetzung.

Die Bestimmung des Karbonatgehaltes erfolgt durch die volumetrische Bestimmung des aufschließbaren Kohlendioxids.

Wasseraufnahmeprüfung nach Karsten

Zur Wasseraufnahmeprüfung nach Karsten wird ein Karstenröhrchen mit geschmeidig geknetetem Kitt (z.B. Sanitärkitt plastic-fermit), der als dünne Wurst auf den Glasrand des Karstenröhrchens aufgeklebt wird, fest gegen die Wandoberfläche gedrückt. Außen überstehende Wülste werden mit einem kleinen Spatel oder Messer glasbündig abgeschnitten. Der bündige Abschluss des Kittes mit dem Glasrand ist erforderlich, um das mögliche Sickers des Wassers aus dem Röhrchen in die Umgebung beobachten zu können, was beispielsweise bei dem Verlust der Hydrophobie eine Rolle spielt. In Folge wird das Röhrchen zügig mit Hilfe einer Spritzflasche bis zur Linie von 0 ml befüllt. Hier sollte beachtet werden, dass nicht die Menisken, sondern die Wasserfläche die entsprechende Füllhöhe repräsentiert. Mit dem Erreichen der 0 ml – Marke wird die Stoppuhr gestartet. Die abgelesenen Wassermengen in ml und die dazugehörigen Eindringzeiten in Minuten und Sekunden werden dokumentiert. Zur Auswertung der Messung wird das Excel-basierte Programm Calkarow 3.2 verwendet.

4. Ergebnisse

4.1 Salzanalysen der Bohrmehlproben

Neben der Summe der löslichen Bestandteile wurde von allen Proben, die einen relevanten Gehalt aufwiesen, eine detaillierte Analyse der Kationen (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) und der Anionen (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) durchgeführt. Die entsprechenden Ergebnisse sind den nachfolgenden Tabellen (2-12) erfasst.

Zur Interpretation der Salzbelastung von Baustoffen gibt es verschiedene Bewertungsskalen, von denen einige in der folgenden Tabelle (1) vergleichend dargestellt sind. Der Hauptunterschied zwischen den ersten beiden Skalen zu der dritten nach Arendt & Seele besteht darin, dass die Chlorid- und Nitratgehalte unterschiedlich bauschädlich eingestuft und die Grenzen der einzelnen Bereich unterschiedlich genau angegeben sind. In diesem Bericht wird die WTA-Skala angewendet.

Tab. 1: Bewertungsskalen für die Salzbelastung von Baustoffen

Anion	unbelastet	gering			mittel			hoch		
Sulfat [M.-%]	< 0,024	<0,5	<0,1	>0,024 <0,077	0,5- 1,5	0,1- 0,5	>0,077 <0,24	>1,5	>0,5	<0,77
Nitrat [M.-%]	< 0,016	<0,1	<0,05	>0,016 <0,050	0,1- 0,3	0,05- 0,15	>0,05 <0,18	>0,3	>0,15	<0,5
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	<0,28

Die Bewertung der detektierten Anionen-Gehalte in den relevanten Proben jeder Messachse (nach WTA-Merkblatt „Mauerwerksdiagnostik“) erfolgt durch farbige Markierungen entsprechend Tabelle 1.

Im Tiefenprofil TP 1 (Ziegel) liegt im Bereich zwischen 0-1 cm eine hohe Sulfatkonzentration vor (siehe Tab. 2). In der dahinterliegenden Zone bis 2 cm Tiefe konnte dagegen nur noch ein geringer Sulfatgehalt detektiert werden. Das Sulfat liegt hauptsächlich in Assoziation mit Natrium vor, wie durch die röntgenographische Untersuchung der Ausblühprobe an der Oberfläche Bestätigung findet (siehe Kapitel 4.2).

Tab. 2: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben des Tiefenprofils (TP) 1

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasser-lösl. Bestandteile	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-
ST_StM_TP_1/1	4,15	0,011	0,056	0,529	1,161	1,951	0,036	<0,01
ST_StM_TP_1/2	1,48	<0,01	0,053	0,200	0,373	0,413	0,030	<0,01
ST_StM_TP_1/3	0,69	<0,01	0,035	0,053	0,156	0,135	0,024	<0,01
ST_StM_TP_1/4	0,18	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
ST_StM_TP_1/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb

Im Tiefenprofil TP 2, das in der Fuge unterhalb TP 1 erbohrt worden ist, wurde oberflächennah eine extreme Sulfatkonzentration ermittelt (siehe Tab. 3). Zwischen 1-2 cm Tiefe liegen entsprechend der Summe der löslichen Bestandteile auch noch Schadsalze vor, allerdings in deutlich geringeren Konzentrationen. In der Zone zwischen 2-5 cm Tiefe liegen geringe Nitratgehalte in der Fuge vor. Je nach Saugvermögen des Materials geht man davon aus, dass Bereiche > 3 cm Tiefe durch Kompressenmaterial nicht entsalzt werden können. Eine Nachuntersuchung wird hier zeigen, inwieweit möglicherweise in den Fu-

gen das Nitrat herausgelöst werden kann. Im benachbarten Ziegel (TP 1) ist Nitrat nicht detektiert worden.

Tab. 3: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben des Tiefenprofils (TP) 2

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasser-lösl. Bestandteile	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-
ST StM TP 2/1	7,03	<0,01	0,083	0,992	1,974	2,728	0,043	<0,01
ST StM TP 2/2	2,01	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
ST StM TP 2/3	1,03	<0,01	0,040	0,174	0,347	0,110	0,033	0,112

Tiefenprofil 3 und 4 liegen westlich der Öffnung der untersuchten Seitenkapelle, TP 3 auf einem offensichtlich kontaminierten Ziegel und TP 4 auf einem optisch unbelasteten Stein. Die detektierten Belastungen gehen mit dem optischen Eindruck konform. Auf dem offensichtlich belasteten Ziegel des TP 3, wo an der Oberfläche auch die Ausblühung beprobt wurde (siehe Kapitel 4.2), liegt oberflächennah eine hohe bzw. mittlere Nitrat- und Sulfatbelastung auf (siehe Tab. 4). Auch Chloride konnten in unkritischen Gehalten ermittelt werden. Die Belastungen liegen in dem Bereich, der durch eine Kompressenentsalzung theoretisch erreicht werden kann.

Tab. 4: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben des Tiefenprofils (TP) 3

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasser-lösl. Bestandteile	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-
ST StM TP 3/1	3,00	0,061	0,061	0,516	0,819	0,789	0,127	0,700
ST StM TP 3/2	0,90	0,019	0,025	0,111	0,308	0,140	0,078	0,215
ST StM TP 3/3	0,36	<0,01	0,025	0,040	0,124	0,060	0,043	0,064
ST StM TP 3/4	<0,12	nb	nb	nb	nb	Nb	nb	nb
ST StM TP 3/5	nb	nb	nb	nb	nb	Nb	nb	nb

Das Profil TP 4 wurde in unmittelbarer Nähe zu TP 3 angelegt. Allerdings zeigte der entsprechende Ziegel keine offensichtlichen Salzausblühungen. Diese Unterschiede in der Belastung bei unmittelbar benachbarten Steinen sind bemerkenswert. Unterhalb des Ziegels des TP 4 folgen auch wieder Steine mit Ausblühungen. Wie in Tabelle 5 zu erkennen ist, weist der untersuchte Ziegel keine nennenswerte Belastung auf. Oberflächennah liegen lediglich geringe Sulfatgehalte vor.

Tab. 5: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben des Tiefenprofils (TP) 4

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasser-lösl. Bestandteile	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-
ST StM TP 4/1	0,45	<0,01	0,067	0,048	0,139	0,323	0,025	0,054
ST StM TP 4/2	0,16	nb	nb	nb	nb	Nb	nb	nb
ST StM TP 4/3	0,17	<0,01	0,040	0,007	0,021	0,020	<0,01	<0,01
ST StM TP 4/4	<0,12	nb	nb	nb	nb	Nb	nb	nb
ST StM TP 4/5	nb	nb	nb	nb	nb	Nb	nb	nb

Die Tiefenprofile TP 5 und 6 sind in einem Gurtbogen angelegt worden. Die Oberfläche vor TP 5 wies Ausblühungen auf (siehe Kapitel 4.2), TP 6 nicht. Aufgrund des geringen Querschnittes des Gurtbogens liegen die Untersuchungstiefen nur maximal bei 3 cm (0-1 cm, 1-2 cm und 2-3 cm). Im Profil TP 5 konnte oberflächennah eine hohe Sulfat- und eine mittlere Nitratbelastung festgestellt werden (siehe Tab. 6).

Tab. 6: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben des Tiefenprofils (TP) 5

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasser-lösl. Bestandteile	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	NO_3^{-}
ST StM TP 5/1	1,80	<0,01	0,052	0,757	0,704	1,513	0,037	0,147
ST StM TP 5/2	1,69	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
ST StM TP 5/3	1,51	<0,01	0,033	0,277	0,425	0,371	0,051	<0,01

In dem hinteren Bereich des Gurtbogens (TP 6) liegen in dem vorderen Zentimeter mittlere Sulfatbelastungen vor (siehe Tab. 7). In beiden Fällen sind die kritischen Gehalte in Zonen, die theoretisch durch eine Kompressenentsalzung erreicht werden können.

Tab. 7: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben des Tiefenprofils (TP) 6

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasser-lösl. Bestandteile	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	NO_3^{-}
ST StM TP 6/1	3,70	<0,01	0,121	0,642	1,216	0,966	0,063	0,020
ST StM TP 6/2	1,25	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
ST StM TP 6/3	1,11	<0,01	0,067	0,093	0,267	0,163	0,087	<0,01

Die nachfolgend dargestellten Tiefenprofile TP 7-9 sind höhenabhängig an der Rückwand (Süd) der untersuchten Kapelle angelegt worden. Das bodennahe Profil TP 7 weist oberflächennah mittlere bzw. hohe Sulfat- und Nitratgehalte auf. Untergeordnet liegen auch Chloride vor (siehe Tab. 8).

Tab. 8: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben des Tiefenprofils (TP) 7

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasser-lösl. Bestandteile	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	NO_3^{-}
ST StM TP 7/1	3,27	0,032	0,162	0,081	0,159	0,508	0,122	0,319
ST StM TP 7/2	0,63	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
ST StM TP 7/3	0,14	0,035	0,020	0,019	0,036	0,015	0,023	<0,01
ST StM TP 7/4	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
ST StM TP 7/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb

In einem Meter Höhe (TP 8) hingegen sind keine Nitratre mehr vorhanden. Die mittlere Sulfatbelastung liegt auch hier oberflächennah vor (siehe Tab. 9).

Tab. 9: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben des Tiefenprofils (TP) 8

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasser- lösl. Be- standteile	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	NO_3^{-}
ST_StM_TP_8/1	2,45	0,121	0,141	0,219	0,237	0,740	0,095	0,021
ST_StM_TP_8/2	0,25	<0,01	0,049	0,037	0,066	0,073	0,032	<0,01
ST_StM_TP_8/3	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
ST_StM_TP_8/4	0,43	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
ST_StM_TP_8/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb

Im Tiefenprofil TP 9 (1,50 m Höhe) liegen an diesem Wandausschnitt keine detektierbaren Belastungen mehr vor (siehe Tab. 10).

Auf allen drei untersuchten Ziegeln (TP 7-9) waren an den Oberflächen keine Ausblühungen erkennbar.

Tab. 10: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben des Tiefenprofils (TP) 9

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasser- lösl. Be- standteile	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	NO_3^{-}
ST_StM_TP_9/1	0,27	<0,01	0,058	0,025	0,009	0,262	<0,01	<0,01
ST_StM_TP_9/2	0,14	<0,01	0,044	0,006	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01
ST_StM_TP_9/3	0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
ST_StM_TP_9/4	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
ST_StM_TP_9/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb

Die Tiefenprofil 10 und 11 sind oberhalb der Empore an der Nordseite in einem offensichtlich kontaminierten Bereich angelegt worden. Aufgrund der geringen Wandmächtigkeiten reichen die Profile nur bis in 15 cm Tiefe. Damit wurde bei dem Profil TP 10 bereits die Außenfassade erreicht. Kritische Belastungen liegen hier allerdings nur oberflächennah im Inneren der Kirche vor, kurz unterhalb des desolaten Putzes, der im Profil nicht berücksichtigt wurde. Es sind kritische Chlorid- und Nitratgehalte detektiert worden (siehe Tab.11). Sulfate kommen nur untergeordnet vor. Die Schadhaftigkeit des Putzes geht höchstwahrscheinlich auf die geringe Wandstärke und der damit verbundenen engeren Ankopplung an das Außenklima zurück.

Tab. 11: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben des Tiefenprofils (TP) 10

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasser- lösl. Be- standteile	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	NO_3^{-}
ST_StM_TP_10/0	1,77	0,217	0,057	0,033	0,176	0,321	0,210	0,289
ST_StM_TP_10/1	0,48	0,079	0,033	0,007	0,009	0,224	<0,01	0,014
ST_StM_TP_10/2	0,13	0,034	0,034	<0,005	0,006	0,123	<0,01	<0,01
ST_StM_TP_10/3	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
ST_StM_TP_10/4	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
ST_StM_TP_10/5	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb

Im Profil TP 11, das etwas östlich neben TP 10 angelegt wurde, konnten oberflächennah mittlere Sulfatgehalte ermittelt werden (siehe Tab. 12). In diesem Fall wurde der Putz im Profil mit erfasst. Durch ihn wird im Wesentlichen der belastete Bereich repräsentiert.

Tab. 12: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben des Tiefenprofils (TP) 11

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasser-lösl. Bestandteile	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	NO_3^{-}
ST_StM_TP_11/0	0,87	0,160	0,035	0,013	0,018	0,574	0,020	0,053
ST_StM_TP_11/1	0,16	0,023	0,046	<0,005	0,007	<0,01	0,011	0,010
ST_StM_TP_11/2	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
ST_StM_TP_11/3	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
ST_StM_TP_11/4	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb

4.2 Röntgenographische Salzanalysen

Wie im Kapitel „Probenahme“ beschrieben, wurden an der Oberfläche einiger Tiefenprofile und darüber hinaus am Fußboden Ausblühproben für die Röntgenanalyse (RDA) entnommen. Nachfolgend werden die Diagramme der einzelnen Proben dargestellt und erläutert.

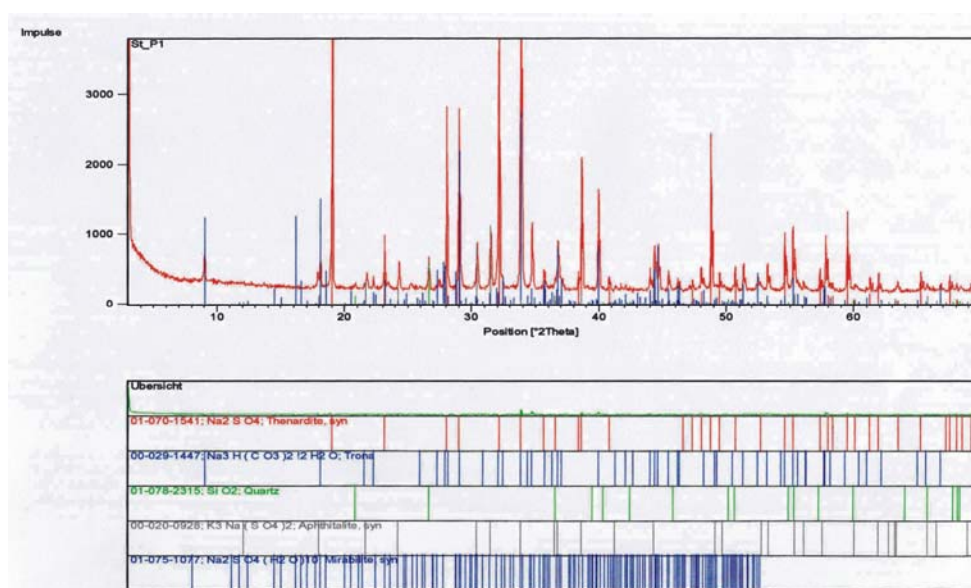


Abb. 14: Ergebnis der Röntgenanalyse der Oberflächenprobe vor dem Tiefenprofil TP 1

Hauptsächlich konnten in der Ausblühprobe (St_TP1) die wasserfreie Phase des Natriumsulfats (Thenardit) und Natriumhydrogenkarbonat detektiert werden (siehe Abb. 14). Insbesondere das Natriumsulfat, von dem auch die hydratisierte Phase (Mirabilite) in geringem Maß in der Probe festgestellt werden konnte, stellt aufgrund seiner erheblichen Volumenveränderungen zwischen den einzelnen Phasen – in Abhängigkeit von der Luftfeuchte – ein besonders bauschädliches Salz dar. Jedesmal, wenn die kritische relative Luftfeuchtigkeit, die zur Kristallisation der jeweils anderen Phase führt, über- oder unterschritten wird, kommt es zu Umkristallisationsprozessen, die die Zerstörung des Materials vorantreiben (siehe dazu Abb. 15).

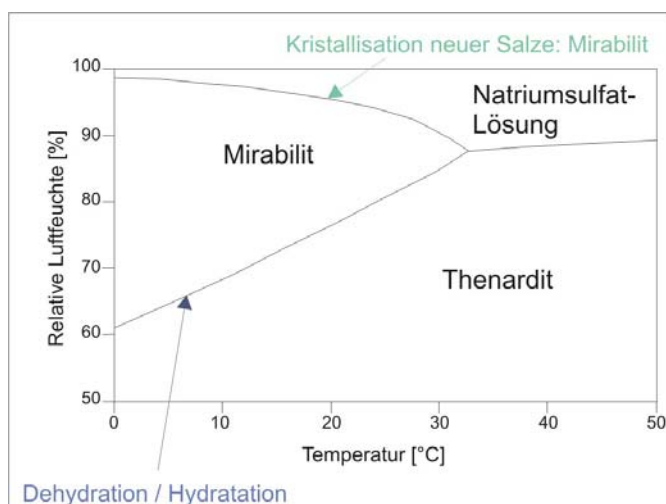


Abb. 15: Phasendiagramm Natriumsulfatlösung – Thenardit (Na_2SO_4) – Mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte (verändert nach Steiger und Dannecker 1998)

In dem folgenden Diagramm (siehe Abb. 16) ist das Röntgenspektrum der Ausblühprobe vor dem Tiefenprofil TP 3 dargestellt (St_TP3). Der Ziegel war flächendeckend und mächtig damit belegt.

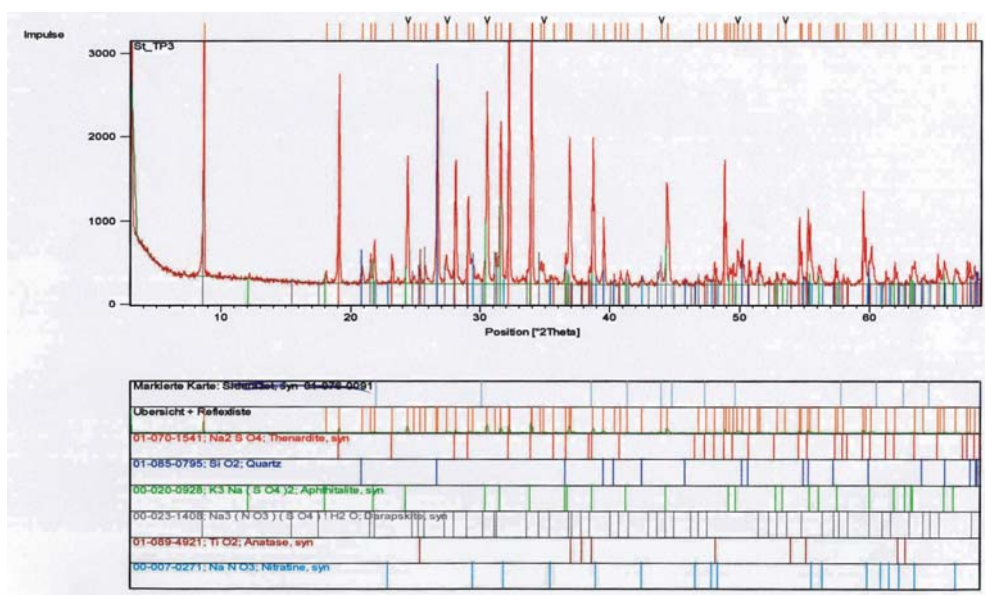


Abb. 16: Ergebnis der Röntgenanalyse der Oberflächenprobe vor dem Tiefenprofil TP 3

Auch in dieser Probe ist im Wesentlichen die dehydratisierte Phase des Natriumsulfats enthalten. Des Weiteren wurde auch noch ein Kalium-Natrium-Sulfat detektiert. Untergeordnet konnten Nitrate festgestellt werden. Im Ziegel sind insbesondere auch Nitrate in kritischen Gehalten enthalten (siehe Kap. 4.1). Das ermittelte Titanoxid geht vermutlich auf eine Farbfassung zurück.

Im weiteren Verlauf der Probenahme ist eine oberflächliche, feste Verkrustung auf einem Ziegel des Gurtbogens abgenommen worden (St_Gurtbogen). Das entsprechende Röntgenspektrum ist in Abbildung 17 dargestellt.

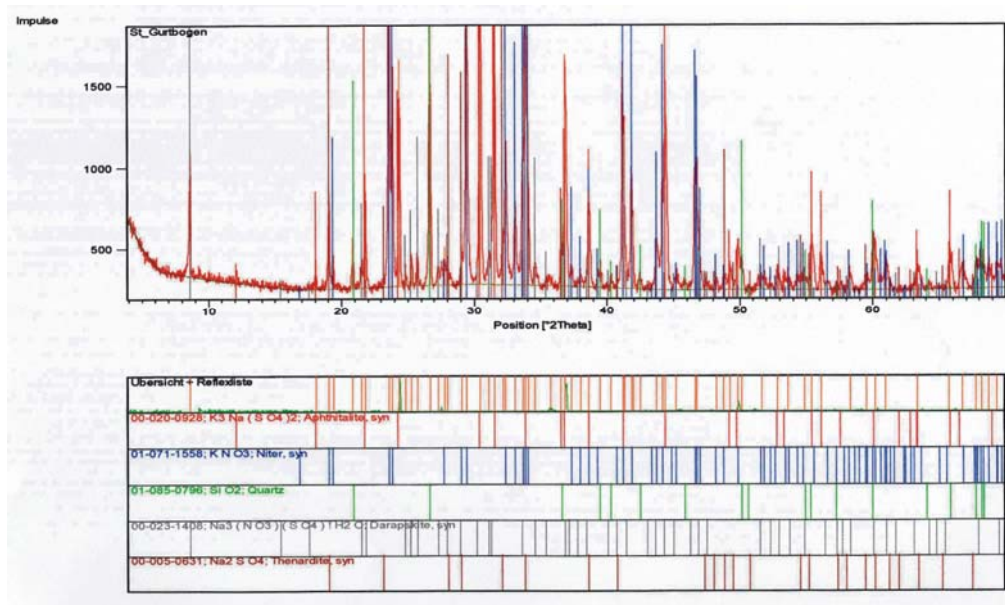


Abb. 17: Ergebnis der Röntgenanalyse der Oberflächenprobe vom Gurtbogen, nahe TP 5 und TP 6

Diese Probe setzt sich hauptsächlich aus dem bereits bei TP 3 in geringem Maße ebenfalls detektierten Kalium-Natrium-Sulfat und Kaliumnitrat zusammen. Thenardit kommt nur sehr untergeordnet vor.

Benachbart dazu, auf der anderen Seite des Ziegels, liegt das Tiefenprofil 5, an dessen Oberfläche ebenfalls eine Ausblühprobe entnommen wurde (St_TP5). Gemäß Abbildung 18 besteht sie hauptsächlich aus Thenardit und auch dem Kalium-Natrium-Sulfat.

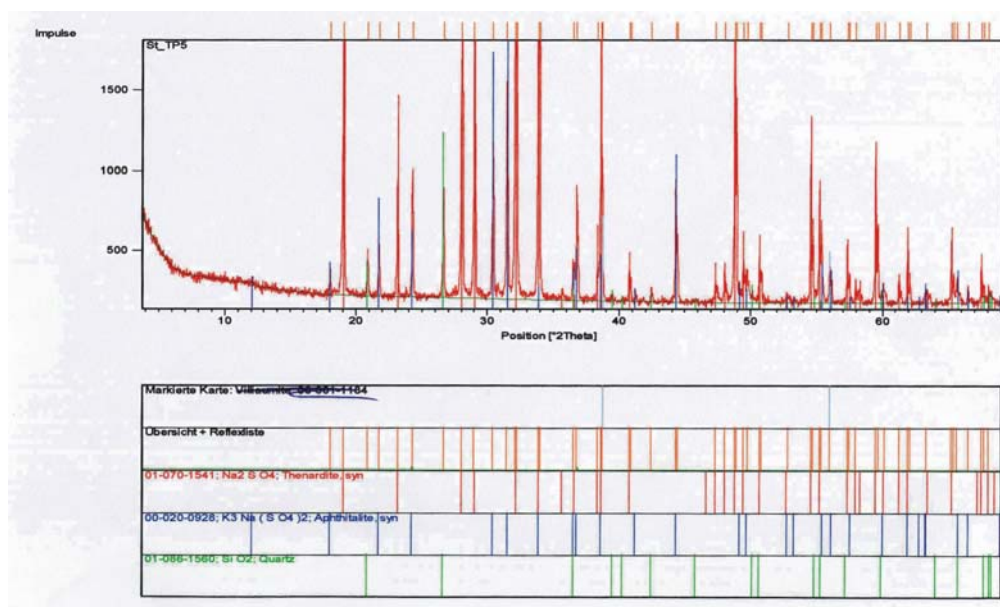


Abb. 18: Ergebnis der Röntgenanalyse der Oberflächenprobe vor dem Tiefenprofil TP 5

Beide Salze kommen auf den Oberflächen (Gurtbogen und St_TP5) vor, lediglich deren Gehalte sind jeweils verschieden.

Im Fußbodenbereich der Seitenkapelle, die von den Tiefenprofilen TP1-6 umgeben ist, waren stellenweise hochaufragende Ausblühungen erkennbar (St_Fußboden). Wie aus dem Diagramm in Abbildung 19 deutlich wird, handelt es sich dabei im Wesentlichen um Nitrate.

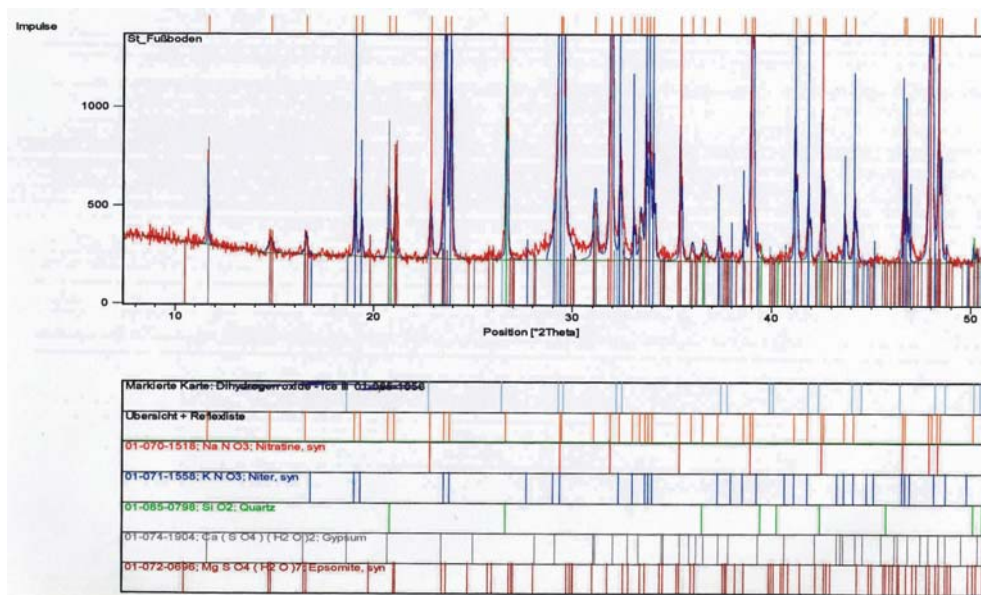


Abb. 19: Ergebnis der Röntgenanalyse der Oberflächenprobe vom Fußboden der Seitenkapelle

Ganz untergeordnet konnte in der Probe noch Gips und Magnesiumsulfat detektiert werden.

Die Ausblühprobe auf einem der Ziegel auf der Rückwand der untersuchten Seitenkapelle (östlich des Fensters) enthielt gemäß der Röntgenanalyse Magnesiumsulfat (Epsomit, hydratisierte Phase) und untergeordnet Gips.

Im westlichen Teil der Südfassade wurde an der Außenwand ein massiver Weißschleier beprobt (St-Kalksinter_außen). Die makroskopische Einschätzung vermittelt den Eindruck einer versinterten Oberfläche. Der Analysebefund gab eindeutig Calcit, Kalksinter, wieder (siehe Abb. 20).

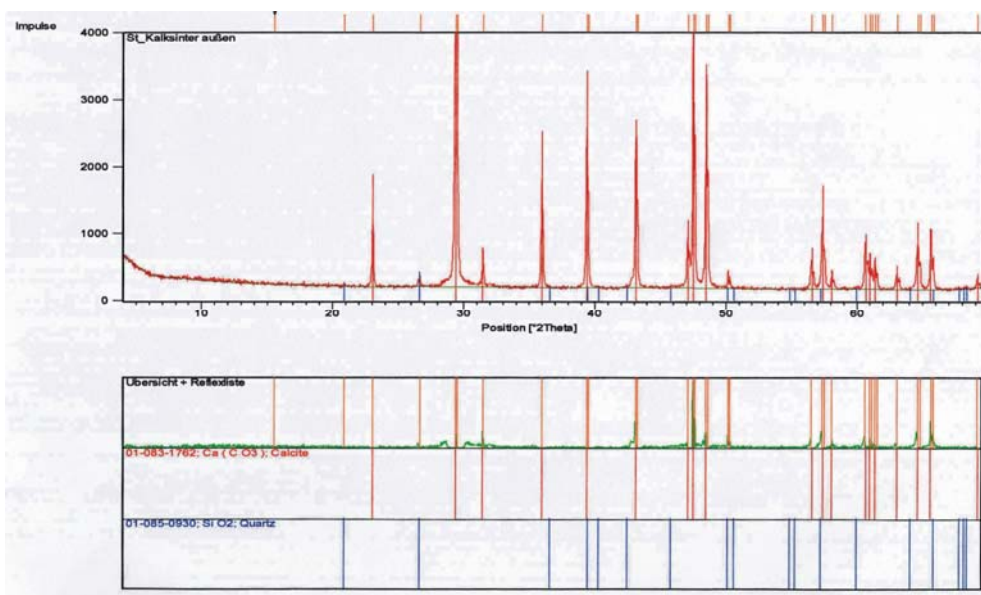


Abb. 20: Ergebnis der Röntgenanalyse der Oberflächenprobe von der südlichen Außenfassade (Kalksinter)

4.3 Feuchtebestimmungen

In der nachfolgenden Tabelle (13) sind die Ergebnisse der Darrfeuchtebestimmung aller Messachsen dargestellt. Es liegt nur ein Wert in einem Feuchtebereich, der eine leichte Belastung markiert. Es handelt sich um die Probe ST_StM_TP 7/5, die in der Tabelle grün gekennzeichnet ist. Alle anderen Proben repräsentieren vollkommen unproblematische Feuchtegehalte des entsprechenden Mauerwerks.

Tab. 13: Feuchtegehalte der Bohrmehlproben [M.-%] der Messachse (MA) 1

Probe	Feuchtegehalt [M.-%]
ST_StM_TP_1/1	0,62
ST_StM_TP_1/2	3,00
ST_StM_TP_1/3	0,34
ST_StM_TP_1/4	0,19
ST_StM_TP_1/5	0,26
ST_StM_TP_2/1	1,70
ST_StM_TP_2/2	1,35
ST_StM_TP_2/3	1,17
ST_StM_TP_3/1	1,61
ST_StM_TP_3/2	0,86
ST_StM_TP_3/3	0,41
ST_StM_TP_3/4	0,17
ST_StM_TP_3/5	0,13
ST_StM_TP_4/1	0,30
ST_StM_TP_4/2	0,18
ST_StM_TP_4/3	0,08
ST_StM_TP_4/4	0,05
ST_StM_TP_4/5	0,64
ST_StM_TP_5/1	1,21
ST_StM_TP_5/2	1,08
ST_StM_TP_5/3	1,07
ST_StM_TP_6/1	1,20
ST_StM_TP_6/2	1,34
ST_StM_TP_6/3	1,50
ST_StM_TP_7/1	2,47
ST_StM_TP_7/2	2,39
ST_StM_TP_7/3	1,80
ST_StM_TP_7/4	2,54
ST_StM_TP_7/5	5,23
ST_StM_TP_8/1	1,90
ST_StM_TP_8/2	0,68
ST_StM_TP_8/3	0,75
ST_StM_TP_8/4	1,81
ST_StM_TP_8/5	3,67
ST_StM_TP_9/1	0,19
ST_StM_TP_9/2	0,10

ST_StM_TP_9/3	0,12
ST_StM_TP_9/4	0,21
ST_StM_TP_9/5	1,07
ST_StM_TP_10/0	0,15
ST_StM_TP_10/1	0,13
ST_StM_TP_10/2	0,09
ST_StM_TP_10/3	0,05
ST_StM_TP_10/4	0,05
ST_StM_TP_10/5	0,10
ST_StM_TP_11/0	1,45
ST_StM_TP_11/1	0,07
ST_StM_TP_11/2	0,05
ST_StM_TP_11/3	0,04
ST_StM_TP_11/4	0,03

Man erkennt an den Werten deutlich, dass in den untersuchten Bereichen keine wesentliche Feuchteproblematik besteht. Der Zustand ist insgesamt unkritisch. Allerdings muss die Beobachtung, dass die letzten Proben der Tiefenprofile TP 7-9, die an der Rückfläche der untersuchten Seitenkapelle angelegt worden sind (Außenwand), bei der Entnahme als haptisch feucht beschrieben wurden, unbedingt beachtet werden. Die Werte geben zwar keine sehr hohe Feuchtigkeit wieder, der höchste Wert von über 5 M.-% wurde in der bodennahen hinteren Probe ermittelt. Dennoch scheint es, dass die Feuchte im Inneren der Wand, nach außen hin, zunimmt.

4.4 Mörtelanalysen

Die Mörtelprobe, die in der westlichsten Seitenkapelle an der Nordseite des Kirchenschiffes entnommen worden ist, verfügt über ein Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis von 1:1. Der Gehalt an löslichem SiO₂ ist erhöht und deutet somit eindeutig auf ein hydraulisches Bindemittel hin. Der Gehalt an Sulfat ist leicht erhöht und geht etwas über den eines sekundären Eintrages hinaus. Daher wird davon ausgegangen, dass dem Material ursprünglich Sulfat (Gips/Anhydrit) beigegeben worden ist. Mittlere Gehalte an Metallionen und Magnesium wurden detektiert. Es handelt sich um einen natürlich hydraulischen Kalkmörtel, dessen Kalkanteil zu geringen Teil auch aus Dolomit bestanden haben wird.

Bei dem Mörtel, der neben dem Tiefenprofil TP 2 entnommen wurde, handelt es sich um einen ganz leicht hydraulischen Kalkmörtel mit einem geringen Sulfatanteil, der wohl sekundär in das Material eingetragen worden ist. Leichter Magnesiumgehalt. Das Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis beträgt 1,15-1.

Der Putz, der um die Oberfläche des TP 10, oberhalb der Empore an der Nordseite entnommen wurde, hat ein Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis von 1:1. Es handelt sich um einen Kalkmörtel (geringe Magnesiumgehalte).

4.5 Kapillare Wasseraufnahme nach Karsten

Zu diesem Zweck wurden in der schwerpunktmäßig im Rahmen der dargelegten Voruntersuchung begutachteten Seitenkapelle an makroskopisch verschiedenartigen Ziegeloberflächen, die mit den Tiefenprofilen TP 7-9 übereinstimmen, erste Karstenmessungen durchgeführt (siehe Abb. 21).

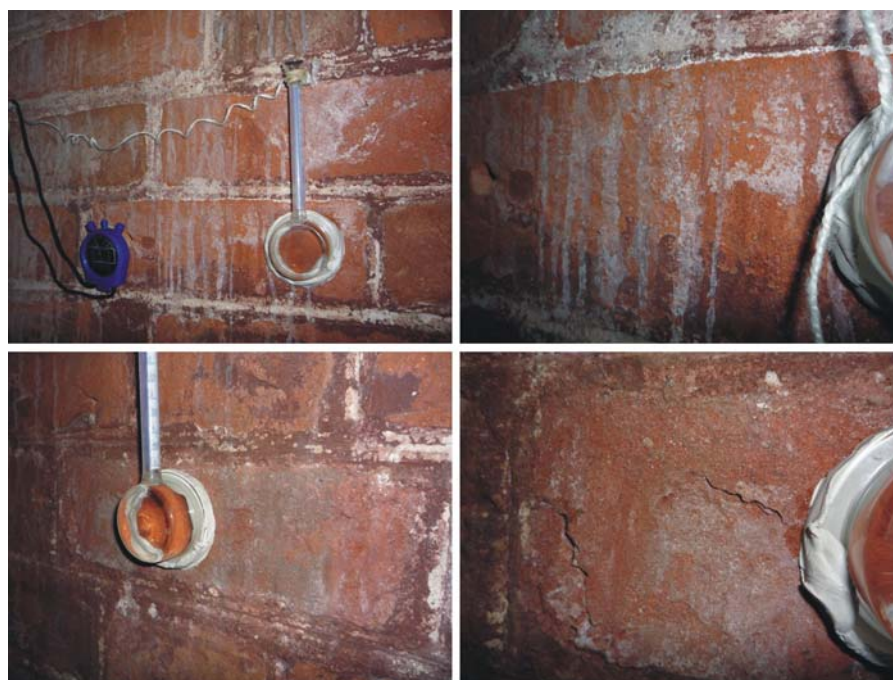


Abb. 21: Zwei verschiedenen Ziegel, auf denen Karstenmessungen durchgeführt worden sind; oben: feine, dichtere Oberfläche, unter: gröbere und anscheinend offenerporigere Oberfläche

Da damit messtechnisch noch nicht alle Varietäten abgedeckt werden konnten, folgen im März noch weitere Untersuchungen. Die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse erfolgt gemeinsam nach Abschluss der Messungen in einem gesonderten Bericht.

5. Zusammenfassung

Wie optisch bereits wahrnehmbar, liegen zum Teil massive Salzbelastungen vor. Es kommen sowohl Sulfate als auch Nitrate als wesentliche Schadsalze vor. Chloride sind nur untergeordnet detektiert worden. Bei den Sulfaten spielen insbesondere die Schadsalze der Mischkristallreihe des Natriumsulfats eine wesentliche Rolle (Thenardit/Mirabilit). In den meisten Fällen konzentrieren sich die Belastungen auf die oberflächennahen Bereiche, die theoretisch mit Hilfe von Kompressenmaterialien zu erreichen sind.

Kritische Feuchtezustände konnten insgesamt nicht ermittelt werden. Allerdings wird dem Phänomen, dass an der Rückwand der untersuchten Seitenkapelle die Feuchte in großer Tiefe (nach außen hin) leicht ansteigt, in einer weiterreichenden Feuchteuntersuchung noch einmal nachgegangen.

In Folge der Voruntersuchungen, die im März noch durch weitere Messungen der kapillaren Wasseraufnahme ergänzt werden, sollen im späten Sommer/Herbst die Entsalzungsmaßnahmen nach einigen Vor-test – gerade mit Hinblick auf die Applikation des Kompressenmaterials, das Umgebungsklima und die Nachreinigung – durch die beteiligten erfahrenen Restauratoren erfolgen. Im Nachhinein werden die Entsalzungsmaßnahmen durch gezielte Nachuntersuchungen bewertet.

6. Literatur

- Arendt, C.& Seele, J. (2000): Feuchte und bauschädliche Salze an Gebäuden, Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinefelden-Echterdingen.
- Grassegger, G. (1997): Die Verwitterung von Natursteinen an Bauten und Baudenkmälern, In: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, Hrsg. Berufsbildungswerk des Steinmetz und Bildhauerwerks e.V., Ebner Verlag Ulm, 53 S..

- Steiger, M., Neumann, H.-H., Grodten, T., Wittenburg, C., Dannecker, W. (1998): Salze in Natursteinmauerwerk - Probennahme, Messung und Interpretation. In R. Snethlage, Ed. Denkmalspflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II, Stuttgart, S. 61-91.
- Steiger, M & Dannecker, W. (1998): Die Bedingungen für die Kristallisation verschiedener Salzhydrate am Beispiel Thenardit/Mirabilit. In: Jahresbericht Steinzerfall-Steinkonservierung, Bd. 6, 1994-1996, Stuttgart, S. 123-133.
- WTA-Merkblatt 4-5-99/D „Mauerwerksdiagnostik“