

Gefördert mit Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU

Gefördert durch die



DEUTSCHE STIFTUNG
DENKMALSCHUTZ



Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd

Gefördert durch die



DEUTSCHE STIFTUNG
DENKMALSCHUTZ

gefördert durch



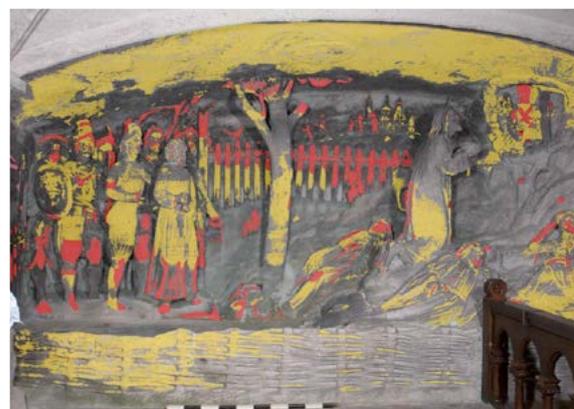
Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd

Abschlusskolloquium DBU Projekt St. Salvator,
4. und 5. Mai 2015, Schwäbisch Gmünd

Tagungsband



Fraunhofer IRB  Verlag

**Modellhafte Konservierung der anthropogen
umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator
in Schwäbisch Gmünd**

Tagungsband

Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd

Abschlusskolloquium DBU Projekt St. Salvator, 4. und 5. Mai 2015, Schwäbisch Gmünd

Tagungsband

Veranstalter:

Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA)

Pfaffenwaldring 32

70569 Stuttgart

Katholische Kirchengemeinde Heilig-Kreuz Schwäbisch Gmünd

Katholisches Verwaltungszentrum Schwäbisch Gmünd

Franziskanergasse 3

73525 Schwäbisch Gmünd

Fraunhofer IRB Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print) 978-3-8167-9451-6

ISBN (E-Book) 978-3-8167-9452-3

Abschlussbericht zum von der Deutschen Stiftung Denkmalschutz geförderten Forschungsprojekt AZ 28983-45

„Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator (Schwäbisch Gmünd) in Verbindung mit der Ermittlung eines neuen Steinkonservierungsmittels zur Anwendung in unserem Umfeld“

Projektlaufzeit: 15.12.2010 – 14.12.2014

Abschlusskolloquium

Tagungstermin: 04. und 05. Mai 2015

Tagungsort: Katholisches Verwaltungszentrum "Franziskaner"
Franziskanergasse 3
73525 Schwäbisch Gmünd

Veranstalter: Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA), Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart;
Email: denkmal@mpa.uni-stuttgart.de
www.mpa.uni-stuttgart.de

Katholische Kirchengemeinde Heilig-Kreuz Schwäbisch Gmünd; Katholisches Verwaltungszentrum
Schwäbisch Gmünd, Franziskanergasse 3, 73525 Schwäbisch Gmünd
www.kvzsgd.de

Herausgeber, Redaktion: Dr. Jürgen Frick, Dr. Judit Zöldföldi

Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart

Satz: Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA), Stuttgart

Druck und Bindung: Mediendienstleistungen des Fraunhofer IRB, Stuttgart

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2015

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 7 11 9 70 -25 00

Telefax +49 7 11 9 70 -25 08

irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Titelbilder: Felsenkirche St Salvator in Schwäbisch Gmünd [Quelle: Karl Fiedler], Schadenskartierung Ölbergrelief, Obere Kapelle [Quelle: Karl Fiedler, Bildgrundlage: Landesamt für Denkmalpflege im RP Stuttgart, Felix Pilz]

Vorwort

Das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), der Deutschen Stiftung Denkmalschutz und dem Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart geförderte Forschungsprojekt widmete sich dem bisher ungelösten Problem der Konservierung von dauerfeuchten Untergründen, wie sie in Felsbauwerken, Zonen mit aufsteigender Feuchte und Kellern anzutreffen sind. Besonderes Augenmerk wurde auf die Problematik Salzbelastung und mikrobieller Befall gelegt, für die ein spezielles Klimakonzept entwickelt wurde. Es gelang ein Festigungsmittel zu entwickeln und zu erproben, dass im Porensättigungsbereich von 20 bis 50 % anwendbar ist. Es wurden Eindringtiefen von 20 mm bei weitgehendem Offenhalten des Porenraums erreicht, so dass die Gefahr einer Schalenbildung minimiert und eine weitere Behandlung möglich ist. Natürlich ist dies im vorliegenden Fall nur für den hier anstehenden Stubensandstein gezeigt worden, aber die entwickelte Methodik ist mit begleitenden Untersuchungen übertragbar auf andere Objekte. Ein weiterer Erfolg war die Umstellung der Fertigung vom Labormaßstab auf eine Pilotproduktion. Dies bietet für die beteiligten kleinen und mittleren Unternehmen eine Chance für eine künftige Vermarktung.

Dem Konsortium aus universitärer Forschungseinrichtung, dem Eigentümer, fünf kleinen und mittleren Unternehmen, das vom Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart fachlich begleitet wurde, gelang die Sicherung der wertvollen Substanz von St. Salvator. Das entwickelte Wartungs- und Überprüfungskonzept bietet die Gewähr, dass die Kapellen auf Dauer gesichert sind.

Im Abschlusskolloquium werden die Projektergebnisse vorgestellt und mit weiteren Objekten mit Feuchte und Salzproblematik verglichen. Im Einzelnen sind dies die Felsenmonumente in Petra / Jordanien, das Felsrelief des Steinernen Festbuchs in Großjena und die spätkarolingische Krypta von St. Georg auf der Reichenau.

Im Namen des gesamten Projektteams sei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Förderung des Projektes gedankt. Die zusätzlichen Eigenmittel wurden im Wesentlichen durch den Eigentümer, die katholische Kirchengemeinde Heilig-Kreuz Schwäbisch Gmünd, erbracht. Diese beruhen auf einer weiteren Förderung durch die Deutsche Stiftung Denkmalschutz, Zuschüssen des Landesamts für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart, Spenden der Förderinitiative Salvator Freundeskreis und Eigenmitteln. Den hier genannten Institutionen gilt gleichfalls ein großer Dank für die Förderung. Weiterhin danken wir Herrn Dr. Jörg Bowitz für Infrarotreflektionsuntersuchungen, Frau Dr. Johanna Leissner und Frau Gabriele Maas-Diegeler für die Glassensorstudie und den Gastbeitrag, Herrn Dr. Johannes Pfander für die Zurverfügungstellung von Musterflächen sowie Herrn Werner K. Meyer, Salvator Freundeskreis, Herrn Dr. Kurt Heinrichs, Frau Dr. Jeannine Meinhardt, Herrn Dr. Klaus Graf, Herrn Prof. Dr. Harald Garrecht und Frau Simone Reeb für die Gastbeiträge.

Stuttgart, im April 2015

Dr. Jürgen Frick
Dr. Judit Zöldföldi

Inhaltsverzeichnis

Einführung in Problemstellung und Zielsetzung des Forschungsprojekts St. Salvator <i>Jürgen Frick</i>	9
Das Kulturdenkmal St. Salvator in Schwäbisch Gmünd. Beschreibung und denkmalpflegerischer Wert <i>Ulrike Schubart, Edeltrud Geiger-Schmidt, Richard Strobel</i>	15
Der Schwäbisch Gmünder Salvator - Geschichte und Geschichten * <i>Klaus Graf</i>	21
Hydrogeologische Situation der Felsenkapellen <i>Dieter Frey, Jürgen Frick</i>	31
Erdgeschichtliche Betrachtungen bei einem Gang über die Wallfahrtsstätte Salvator in Schwäbisch Gmünd * <i>Werner K. Mayer</i>	39
Das Ölbergrelief am Salvator in Schwäbisch Gmünd. Bestand / Zustand / Konservierung <i>Karl Fiedler</i>	61
Monitoring des St. Salvators mit drahtlosen Sensornetzen <i>Markus Krüger, Eric Price</i>	83
St. Salvator - Materialtechnische Analysen am Stubensandstein der Ölberggruppe. Naturwissenschaftliche Untersuchungen zu Festigungsmaßnahmen <i>Judit Zöldföldi, Jörg Bowitz, Friedrich Grüner, Sara Larisch</i>	93
Mikrobiologische Untersuchung der Felsenkapellen St. Salvator in Schwäbisch Gmünd <i>Stefanie Scheerer</i>	105
Rezeptierung, Erprobung und Anwendung von feuchtetoleranten Steinfestigern für poröse Gesteine mit erhöhtem Feuchtegehalt <i>Eberhard Wendler</i>	125
Klimakonzeption zur präventiven Konservierung des St. Salvators <i>Markus Krüger</i>	133
Detektion von klimabedingten Schädigungspotentialen mittels Glassensoren im Rahmen des EU Projekts "Climate for Culture". Vergleich der Exposition in St. Salvator mit anderen Standorten * <i>Johanna Leissner, Gabriele Maas-Diegeler</i>	145

* Gastbeitrag

Untersuchung der Salzverwitterung an Felsmonumenten in Petra / Jordanien unter Einsatz eines Funksensornetzwerkes * _____	153
<i>Kurt Heinrichs</i>	
Das Steinerne Album in Großjona - barockes Kleinod unter dem Einfluss der Umwelt * _____	163
<i>Jeannine Meinhardt</i>	
DBU-Forschungsprojekt – Raumklimastabilität zum Erhalt der Wandmalereien in der Kirche St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau * _____	167
<i>Harald Garrecht, Simone Reeb</i>	

Einführung in Problemstellung und Zielsetzung des Forschungsprojekts St. Salvator

Erstmalige Konservierung dauerfeuchter Untergründe

Jürgen Frick

Abstract: Der Beitrag beschreibt die Problemstellung und Zielsetzung des Forschungsprojekts "Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd". Es wird ein Überblick über die Vorarbeiten, die durchgeführten Arbeitspakete des Forschungsprojekts und den Projektverlauf gegeben.

Keywords: Musterkonservierung, Festigung feuchter Untergründe, intelligentes Klimakonzept; mikrobiologische Schädigung, Nutzungs- und Überwachungskonzept

1 Problemstellung

St. Salvator in Schwäbisch Gmünd wurde 1617 – 1621 durch Kaspar Vogt als natürliche Felsenkirche oberhalb von Schwäbisch Gmünd in eine obere und untere Kapelle ausgebaut. Der Berghang ist aus Stubensandstein des mittleren Keupers aufgebaut. Durch seine weiträumige Verbreitung in Württemberg hat der Stubensandstein in der Vergangenheit eine bedeutende Rolle als Naturwerkstein gespielt. Er wurde besonders gerne für die Errichtung von Massivmauerwerk eingesetzt. In der Regel wurden dafür aber besonders gute Bausteinhorizonte ausgewählt.

Stubensandstein ist ein weißlicher bis gelblicher, grobkörniger Sandstein mit überwiegend tonig – kieseliger Zementation. Seine Widerstandsfähigkeit gegenüber Verwitterungsprozessen ist in Abhängigkeit von der diagenetischen Entwicklungsgeschichte stark unterschiedlich.

Die Wandoberflächen in der oberen Felsenkapelle zeigen eine bildliche Reliefdarstellung aus dem Leben Christi (Ölbergdarstellung, entstanden 1620, siehe Bild 1). Diese in Deutschland einzigartige Darstellung ist direkt aus dem Felshang herausgearbei-

tet. Verwitterungsvorgänge, die überwiegend durch das natürliche, dauerfeuchte Milieu des Felsen überwiegend bestimmt werden, haben zu einem starken Kornbindungsverlust geführt. In Teilbereichen haben sich schwarze Krustenbildungen mit dahinter liegenden Auflockerungszonen sowie mikrobieller Befall entwickelt.



Bild 1: Um 1620 entstandene Ölbergdarstellung in der oberen Kapelle.

Ein fortschreitender Verlust der originalen Oberflächen war festzustellen und eine baldige konservierende Behandlung daher unumgänglich. Aufgrund der natürlichen, hohen Bergfeuchte, die jahreszeit-

lichen Schwankungen unterliegt, gab es bisher keine geeigneten Gesteinsfestigungsmittel bzw. Konservierungsverfahren, die gefahrlos für das Objekt eingesetzt werden konnten. Ein Austrocknen des Reliefs barg die Gefahr, dass es, aufgrund des fragilen Zustands, zu verstärkten und schnellen Materialverlusten kommt. Dies ist vermutlich auch unmöglich, da aus dem Felsuntergrund ständig Feuchte nachgeliefert wird.

2 Vorarbeiten

Voruntersuchungen an den St. Salvator Kapellen [Grüner 1995, 1998] zeigten, dass das Gesamtobjekt eine hohe dauerfeuchte Belastung aufweist. Quantitative Salzuntersuchungen haben hohe Sulfatanreicherungen in den obersten 3 mm der Stubensandsteinoberflächen nachgewiesen. Oxalate sind als Stoffwechselprodukte einer hohen mikrobiologischen Aktivität vorhanden. Mikroskopische Untersuchungen haben eine sehr starke An- bzw. Weglösung von karbonatischen Anteilen, verwitterte Feldspatkristallen und Tonmineralzementen ergeben.

Eine erste restauratorische Erfassung von Bestand und Zustand und ein vorläufiger Maßnahmenkatalog wurden erarbeitet [Fiedler, 2009].

Das Landesdenkmalamt (Jetzt: Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg im Regierungspräsidium Stuttgart) hatte über einen Zeitraum von eineinhalb Jahren (Ende 1994 bis Mitte 1996) Raumklimamessungen in der Kapelle durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass es bedingt durch die Verteilung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Raum vor allem im Bereich der Ölberggruppe zu zeitweiligen Taupunktunterschreitungen und damit zur Kondensation von zusätzlicher Feuchtigkeit an den empfindlichen Reliefdarstellungen kommt. Wie groß der Einfluss der Kapillarkondensation ist, ist zu prüfen.

Mikrobiologische Untersuchungen [Eckardt 1996] konnten zeigen, dass ein üppiges Wachstum der verschiedensten Mikroorganismen auf den Gesteinsoberflächen vorhanden ist. Als Indikator für die hohe Wasserhaltigkeit des Gesteins können dabei Diatomeen und die hohe Anzahl von Cyanobakterien und Algen angesehen werden. Es sind verhältnismäßig viele Säurebildner nachgewiesen worden, was einen unmittelbaren Einfluss auf die Silikatverwitterung des Stubensandsteines hat.

3 Gegenstand und Ziele des Projekts

Die Voruntersuchungen zeigten, dass es zum damaligen Zeitpunkt keine Methoden zur Festigung gab, die unter den gegebenen Umständen nachweislich funktionieren. Dies war der Ausgangspunkt für das Forschungsprojekt. Ziel des Projekts war eine Musterkonservierung der beiden Felsenkapellen als exemplarische Restaurierung von dauerfeuchten Natursteinobjekten, dies beinhaltete die Entwicklung eines Festigungsmittels für dauerfeuchte Untergründe, und die Erarbeitung eines Überwachungs- und Maßnahmenkonzepts für die weitere Nutzung. Im Einzelnen wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

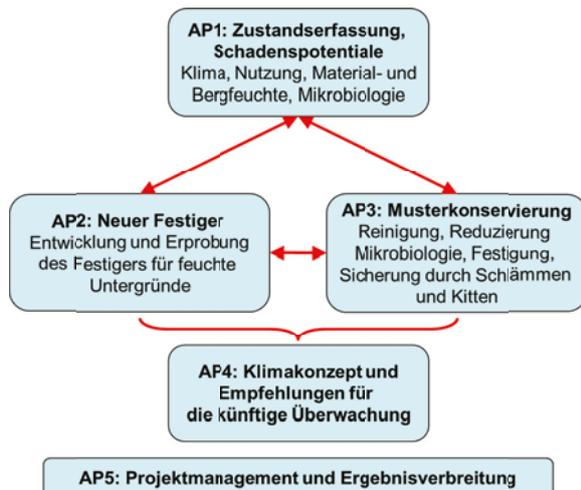


Bild 2: Übersicht über die Projektstruktur.

3.1 Arbeitspaket 1: Zustandserfassung, Erfassung von Schadenspotentialen (Klima, Nutzung, Material- und Bergfeuchte, Mikrobiologie)

Grundvoraussetzung für das Projekt war die Erfassung aller Schadenspotentiale aus klimatischen, hydrogeologischen, mikrobiellen und nutzungsbedingten Belastungen des Objekts. Weiterhin war der Fortschritt der Degradationsprozesse seit den letzten Untersuchungen zu bestimmen. Folgende Maßnahmen wurden durchgeführt:

- Erfassung und Analyse des Materialbestands im Hinblick auf Steinzustand, Salze, Krusten, Ergän-

zungsmassen, Überzüge, Mörtel, Fassungen etc. mit minimalinvasiven und zerstörungsfreien Methoden.

- Hydrogeologische Untersuchungen um den Feuchteeintrag aus dem umgebenden Felsen zu erfassen und geeignete Gegenmaßnahmen konzipieren zu können. Es wurden zwei Bohrungen erbracht und davon eine für Pegelmessungen zur Dauerüberwachung ausgebaut.
- Zustandserfassung Mikrobiologie: Untersuchung und Analysen zur Klärung der Art, Ausdehnung und Aktivität des biologischen Befalls.
- Monitoring von Klima- und Materialdaten über mehrere Jahre den jahreszeitlichen Wechsel und Schädigungszustände zu erfassen und davor zu warnen (z.B. Kondenswasserbildung). Hierbei wurde ein auf das Objekt angepasstes drahtloses Messsystem entwickelt, installiert und betrieben. Ein Online-Abruf über das Internet wurde für die Projektpartner eingerichtet.

3.2 Arbeitspaket 2: Entwicklung und Erprobung Festigung

Um die Steinoberflächen behandelbar zu machen, wurde ein Feuchte tolerantes Festigungsmittel entwickelt, das weitere konservatorische Maßnahmen wie Steinergänzungen durch Kittungen und Schlämmen, Abnahme der Mikrobiologie, und ggf. Entsalzung erlaubte. Wichtig war hierbei eine mögliche Wiederholbarkeit der Festigung zu gewährleisten. Folgende Maßnahmen wurden durchgeführt:

- Entwicklung und Erprobung eines neuartigen Verfahrens für die Gesteinskonservierung / -festigung, das in dauerfeuchtem Milieu einsetzbar und wirksam ist. Ziel war die Methodenverbesserung in der Anwendung von Steinfestigern auf dauerfeuchtem Untergrund. Hierbei sollte die mögliche Störung durch vorhandene Schadsalze berücksichtigt werden.
- Rezeptierung einer Mikroemulsion auf Basis von Ethylsilikat. Das unter Reaktion mit Wasser aushärtende Ethylsilikat wird zunächst, in mizellare Strukturen eingekapselt, durch Kapillarkräfte in das Gesteinsgefüge transportiert und löst dort (nach dem „Brechen“ der Mikroemulsion) die Hydrolysereaktion aus, durch anschließende Kondensation kommt es zur Gelbildung. Um Bindungsstellen an den Mineraloberflächen für das Gel zu schaffen, müssen ggf. dort sitzende Wasserfilme verdrängt werden. Dies kann im Bedarfsfall durch eine Modifizierung des Ethylsi-

likats mit funktionellen Silanen erzielt werden, wenn die funktionellen Gruppen eine höhere Affinität zum mineralischen Substrat besitzen als Wassermoleküle. Dieses Prinzip wird auch für natürliche Prozesse genutzt, beispielsweise für die Haftung von Muscheln auf feuchten Felsen. Die Produktentwicklung wurde durch chemisch-analytische Untersuchung an behandelten Proben unterstützt.

- Anlage von Musterfeldern für die Festigung am Objekt. Dies diente zum einen der Überprüfung der Verarbeitbarkeit und zum anderen zur Überprüfung des Eindringverhaltens.
- Kontrolle und Monitoring des Festigungserfolgs durch Probenahme und zerstörungsfreie Methoden. Klärung der Schadenstiefe und Ermittlung der daraus resultierenden erforderlichen Eindringtiefe. Untersuchung der Biorezeptivität des Konsolidierungsmittels im Hinblick auf die Gefährdung des entwickelten Festigungsmittels auf Abbau durch die vorhandene Mikroflora.

3.3 Arbeitspaket 3: Musterkonservierung: Reinigung, Reduzierung Mikrobiologie, Festigung, Ergänzung

Aufbauend auf die Ergebnisse der Festigung an Musterfeldern erfolgt die Konservierung des Objekts. Diese beinhaltet eine, Reinigung und Abnahme der vorhandenen Krusten, Reduzierung von Mikrobiologie, Festigung, Abnahme von schädigenden Mörtelergänzungen sowie restauratorische Kittungen und Schlämmungen. Im Einzelnen wurden folgende Maßnahmen durchgeführt:

- Restauratorische Dokumentation der Maßnahmen.
- Oberflächenreinigung und Abnahme der dunklen Krusten mittels Laser-Reinigung.
- Herstellen von repräsentativem Probenmaterial aus Stubensandstein, welcher mit der in St. Salvator vorgefundenen Mikroflora geimpft wurde. Diese Proben wurden in situ in Schwäbisch Gmünd ausgelagert und das Wachstum der Mikroflora überwacht.
- Tests von verschiedenen anti-mikrobiell wirkender Substanzen an auf Nährmedien gewachsenen Mikroorganismen und den mit Mikroflora bewachsenen Stubensandstein-Proben. Nach Auswahl des optimalen Behandlungsverfahrens

erfolgte die Reduzierung des akuten biologischen Befalls am Objekt.

- Festigung geschädigter Steinbereiche unter Berücksichtigung der Problematik des dauerfeuchten Zustands. Sicherung gefährdeter Steinbereiche durch konservierende Kittung / Schlämmung mit geeignetem Material.

3.4 Arbeitspaket 4: Klimakzept und Empfehlungen für die künftige Überwachung.

Die Auswertung der mehrjährigen Monitoringdaten von Klima, Material- und Bergfeuchte diente als Basis für ein Klimakzept, das die Nutzung der Kapellen und den konservierten Zustand berücksichtigt. Dies beinhaltet die Festlegung von klimatischen Grenzwerten, Empfehlungen für eine künftige instrumentelle Überwachung, sowie die Vorbereitung und Erprobung eines restauratorischen Wartungs- und Überprüfungsprogramms. Besonderes Augenmerk wurde hierbei auf die Einbindung des Eigentümers, der Nutzer und der Denkmalpflege gelegt.

3.5 Arbeitspaket 5: Projektmanagement und Ergebnisverbreitung

Dieses Arbeitspaket diente der Projektsteuerung und der Verbreitung der Ergebnisse des Projekts. Letzteres umfasste folgendes:

- Erstellung der Projekthomepage: www.shm.uni-stuttgart.de/j16/index.php/projects/st-salvator-schwaebisch-gmuend.
- Informationen vor Ort: Öffentliche Auftaktveranstaltung am 26.01.2011, Vortrag im Rahmen eines Treffens des Salvator Freundeskreises am 16.11.2011, Projektposter für Besucher der Landesgartenschau in der oberen Kapelle, Presetermin am 04.02.2015 und Abschlusskolloquium am 04. und 05. Mai 2015.
- Vorträge, Poster und Tagungsbeiträge: Sitzungen der Focus Area Cultural Heritage der German Construction Technology am 23.03.2011 in Oberhausen und am 16./17.2.2012 in Osnabrück, Poster und Handout auf der Konferenz des EU-Projekts Net-Heritage im Rahmen der Ausstellung „NetHeritageTouch“ am 24.03.2011. Tagungsbeiträge: „Archäometrie und Denkmalpflege 2012“, 28-31. März 2012, Tübingen [Zöldföldi, 2012a], EWCHP, September 2012 in Kjeller, Norwegen [Zöldföldi, 2012b], Tagung "Naturstein als Element der Kulturlandschaft", Juni 2013 in Osnabrück [Frick 2013], "Archäometrie und Denkmalpflege 2013", September 2013 in Weimar [Zöldföldi 2013].

4 Projektverlauf

Das ursprünglich auf zwei Jahre angelegte Projekt wurde zweimal um ein Jahr verlängert, so dass die offizielle Projektlaufzeit vom 14.12.2010 bis 13.12.2015 war. Die erste Verlängerung erfolgte aufgrund von Verzögerungen bei der Entwicklung des feuchtetoleranten Festigungsmittels. Die Klimasituation mit der maximalen Durchfeuchtung im Mai/Juni 2013 war ursächlich für die zweite Verlängerung. Im ganzen Sommer und Herbst war die Durchfeuchtung des Sandsteins so hoch, dass das Festigungsmittel nicht angewendet werden konnte. Erst im Jahr 2014, am Ende der Trockenperiode im Herbst waren die Verhältnisse für eine Festigung wieder günstig.

Mit der Entwicklung eines Festigungsmittels auf Basis von modifizierten Kieselsäureestern gelang es, zuerst im Labormaßstab, Steine im Feuchtebereich von 20 bis 50 % Porensättigung zu festigen. Es wurden Eindringtiefen von 20 mm erreicht. Umfangreiche Probefestigungen im Labor und an Musterflächen vor Ort, die von detaillierten Untersuchungen begleitet wurden, bestätigten die Ergebnisse. Für die eigentliche Konservierung wurde dann die Fertigung auf eine Pilotproduktion in größerem Maßstab umgestellt. Damit steht eine neue Produktklasse für dauerfeuchte Untergründe zur Verfügung, die allerdings auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden muss. Ein weiterer Schwerpunkt waren die Fragestellungen im Hinblick auf mikrobiellen Befall, Salzbelastung und begleitenden Materialuntersuchungen. Hinzu kam die Stabilisierung des Klimas zur Reduktion der Feuchtewechsel, um die Umkristallisation von Salzen mit schädigender Volumenveränderung zu vermeiden.

Dem Konsortium aus universitärer Forschungseinrichtung, dem Eigentümer, fünf kleinen und mittleren Unternehmen, das vom Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart fachlich begleitet wurde, gelang die Sicherung der wertvollen Substanz von St. Salvator. Das entwickelte Wartungs- und Überprüfungskonzept bietet die Gewähr, dass die Kapellen auf Dauer gesichert sind.

5 Literaturreferenzen

- [Eckardt 1996] Eckardt, Friedrich E.W.: Untersuchungen zum mikrobiologischen Befund der Sandsteinfliguren (Stubensandstein) in der "Ölbergsszene" (Obere Kapelle) bzw. des "Gnadenbilds" (Untere Kapelle) der Felsenkirche St. Salvator in Schwäbisch Gmünd und zu deren Verwitterung, Inst. f. Allgemeine Mikrobiologie, Universität Kiel, 15.03.1996, 19 Seiten
- [Fiedler, 2009] Fiedler, Karl: 1109 / 367 Schwäbisch Gmünd, St. Salvator, obere Felsenkapelle Ölbergrelief – Erste Erfassung Bestand / Zustand – Vorläufiger Maßnahmenkatalog, 2009, 11 Seiten
- [Frick, 2013] Frick, Jürgen; Zöldföldi, Judit; Grüner, Friedrich; Frey, Dieter; Wendler, Eberhardt; Scheerer, Stefanie; Krüger, Markus: Der Salvator in Schwäbisch Gmünd - Musterkonservierung der Felsenkapellen von Sankt Salvator in Schwäbisch Gmünd, In "Naturstein in der Kulturlandschaft", Hrsg. Siegesmund, Siegfried; Sneath, Rolf, Mitteldeutscher Verlag 2013, S. 220-230
- [Grüner, 1995] Grüner, Friedrich: Untersuchungsbericht: 32-17180, Felsenkirche St. Salvator in Schwäbisch Gmünd, vom 04.12.1995, 11 Seiten, 23 Beilagen
- [Grüner, 1998] Grüner, Friedrich: Untersuchungsbericht 32 - 28151, Schwäbisch Gmünd, Felsenkirche St. Salvator - hier: Zerstörungsfreie Untersuchung von Feuchtebelastungen mittels TDR - Sonde, vom 28.08.1998, 8 Seiten, 3 Beilagen
- [Zöldföldi 2012a] Zöldföldi, Judit; Frick, Jürgen; Grüner, Friedrich; Fiedler, Karl; Frey, Dieter; Scheerer, Stefanie; Wendler, Eberhardt; Krüger, Markus: Musterkonservierung der Wallfahrtskapelle St. Salvator in Schwäbisch Gmünd. In: Hauptmann, A., Pernicka E. (eds.) Archäometrie und Denkmalpflege 2012 in Tübingen. Kurzfassungen. Metalla Sonderheft 5. Bochum: Deutsches Bergbau-Museum Bochum. 62-64
- [Zöldföldi 2012b] Zöldföldi, Judit, Frick, Jürgen; Grüner, Friedrich: Preliminary Investigations in the Framework of the Project "Model Conservation of the St. Salvator Rock Chapels in Schwäbisch Gmünd, Germany", in Proceed-

ings of the 2nd European Workshop on Cultural Heritage Preservation (EWCHP), Ed. Dahlin, E., September 2012 in Kjeller, Norway, Norwegian Institute for Air Research, S. 177-183

- [Zöldföldi 2013] Zöldföldi, Judit; Bowitz, Jörg; Frick, Jürgen; Grüner, Friedrich: Vor-Ort Kartierung von bauschädlichen Salzen mittels zerstörungsfreier IR-Spektroskopie in den Felsenkapellen St. Salvator in Schwäbisch Gmünd, Archäometrie und Denkmalpflege, Weimar, 09/2013, S. 118-122

Autor

- Frick, Jürgen
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart
Tel.: +49-711-685-63381, Email:
Juergen.Frick@mpa.uni-stuttgart.de
- Studium der Physik an der Universität Stuttgart (Diplom)
- Promotion an der Universität Stuttgart
- Seit 1992 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der FMPA Baden-Württemberg (ab 2000 MPA Universität Stuttgart)



Das Kulturdenkmal St. Salvator in Schwäbisch Gmünd

Beschreibung und denkmalpflegerischer Wert

Ulrike Schubart, Edeltrud Geiger-Schmidt, Richard Strobel

Abstract: Die von Caspar Vogt 1617 bis 1621 ausgebaute doppelgeschossige Felsenkapelle mit einer aus dem Fels gearbeiteten Ölberggruppe bildet den End- und Höhepunkt der Wallfahrtsstätte St. Salvator. Diese einzigartige Darstellung verbindet sich mit einem in die Landschaft eingebetteten und von Kapellen und Bildstöcken gesäumten Wallfahrtsweg zu einem sakralen Gesamtkunstwerk. St. Salvator ist ein Kulturdenkmal von besonderer wissenschaftlicher und künstlerischer Bedeutung.

Keywords: Kulturdenkmal, denkmalpflegerischer Wert, Wallfahrtsstätte

1 Lage und historischer Hintergrund

Der ‚Salvator‘ stellt topographisch und historisch eine Besonderheit der Stadt Schwäbisch Gmünd dar. Die Anhöhe nordwestlich der Altstadt mit der Wallfahrtsstätte St. Salvator ist seit dem 17. Jahrhundert als Salvatorberg belegt. In den Archivalien des 14. bis 16. Jahrhunderts wird das Gebiet um St. Salvator u.a. als Naeber, Naeberstain, Eberstein oder Epperstein bezeichnet, was sich etymologisch vom Wort Näber („Bohrer“) ableiten lässt. Möglicherweise hat der Nepperberg, der am ‚Salvator‘ als kleine Sandstein-Felswand in Erscheinung tritt, zur Anlage der Wallfahrtsstätte angeregt. Der Dominikanermönch Felix Fabri beschreibt 1483/84 in seinem Bericht über die Reise ins Heilige Land einen Besuch der Jakobshöhle im Tale Josaphat bei Jerusalem und erwähnt darin eine ähnliche Höhle bei Gmünd, die Eberstein genannt wird. Die vorhandenen Höhlen in direkter Umgebung werden in den Quellen auch als Eremitorien interpretiert. Zum ursprünglichen Bestand, zum Erscheinungsbild der Höhlen und ihrer kultischen Nutzung liegen vor 1617 aber keine gesicherten Erkenntnisse vor.

St. Salvator liegt am Südhang des Nepperberges auf ca. 350 m über NN. Die an einem Vorplatz gelegene doppelgeschossige Felsenkapelle mit Turm bildet den Endpunkt eines von Osten ansteigenden Wallfahrtsweges, der von Kapellen, Stationshäuschen und Bildstöcken gesäumt wird. Die Anlage vermittelt das Bild einer barocken Sakrallandschaft (Bild 1, 2 und 3). Von Menschenhand mitgestaltete Natur und Sakralarchitektur sind an dieser Stelle eine enge Verbindung eingegangen. Die Besonderheit der Wallfahrtsstätte ist die Einbettung in die Landschaft. Als Vorbild der Anlage diente der vielfach auch an anderen Orten nachgeahmte Jerusalemer Kreuzweg; hier ursprünglich beginnend bei der Herrgottsruhkapelle im Tal unweit des Leonhardfriedhofs und endend auf dem Salvator als Kalvarienberg.

Positiv auf die Entwicklung der Wallfahrt dürften sich die religiösen Bestrebungen der Zeit der Gegenreformation ausgewirkt haben. 1644 wurden Kapuzinermönche mit der Wallfahrtsseelsorge auf dem ‚Salvator‘ betraut. Es wurde für sie ein dem Hl. Ulrich geweihtes, bescheidenes Kloster mit Kirche in der Stadt gebaut. Die Kapuziner blieben bis 1810 in Gmünd. Um 1825 gab es Bestrebungen, die Wallfahrt ganz einzustellen. Durch Pfarrer Khuen wurde sie Mitte des 19. Jahrhunderts wieder belebt.

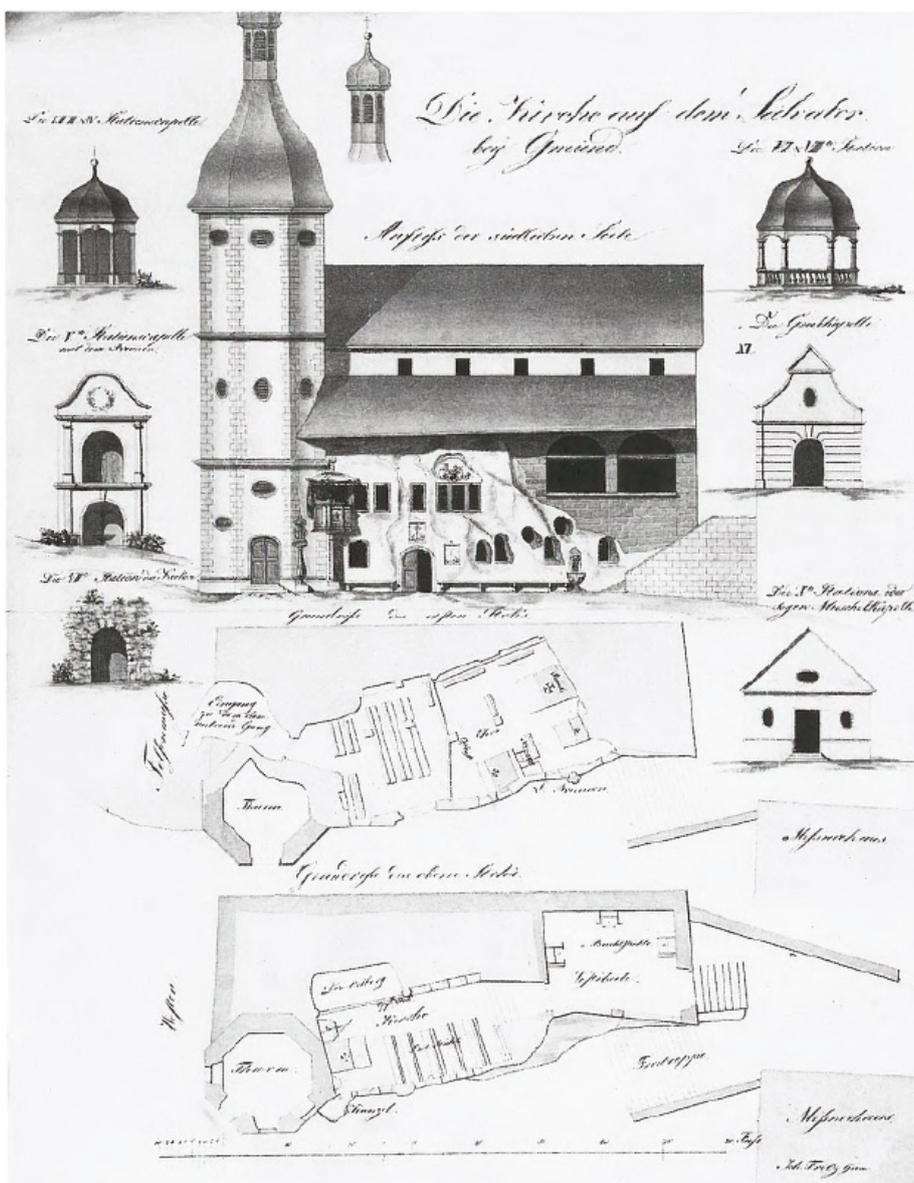


Bild 1 St. Salvator. Ansichten und Grundrisse von Johann Fritz 1829 (Pläne und Ansichten Nr. 7) [Quelle: Strobel, 2003, S. 118]

Ende der 1920er Jahre war die Zahl der Pilger auf jährlich 30.000 gestiegen. St. Salvator wurde insbesondere an den Freitagen in der Fastenzeit besucht. Der traditionsreiche Ort ist bis heute beliebte Ausflugs- und Wallfahrtsstätte und im Bewusstsein der Gmünder fest verankert. Mit fortschreitendem Schadensbild an der Ölberggruppe steigerte sich nicht nur bei den Fachleuten, sondern auch der Gmünder Bevölkerung das Interesse und Engagement für den Erhalt, die Pflege und Restaurierung dieses bedeutenden Wahrzeichens der Stadt.

2 Zur Baugeschichte der Wallfahrtsstätte

Der Ausbau der bestehenden, wohl schon mit Altären ausgestatteten Höhlen zur Kapelle erfolgte in einer ersten Bauphase von 1617 bis 1623. Der Gmünder Baumeister und Bildhauer Caspar II Vogt führte Um- bzw. Ausbaumaßnahmen an diesen kultisch genutzten Höhlen durch. Die untere Felsenkapelle wurde unter Beibehaltung des ursprünglichen Zustands instand gesetzt, die Altäre ergänzt bzw. erneuert.

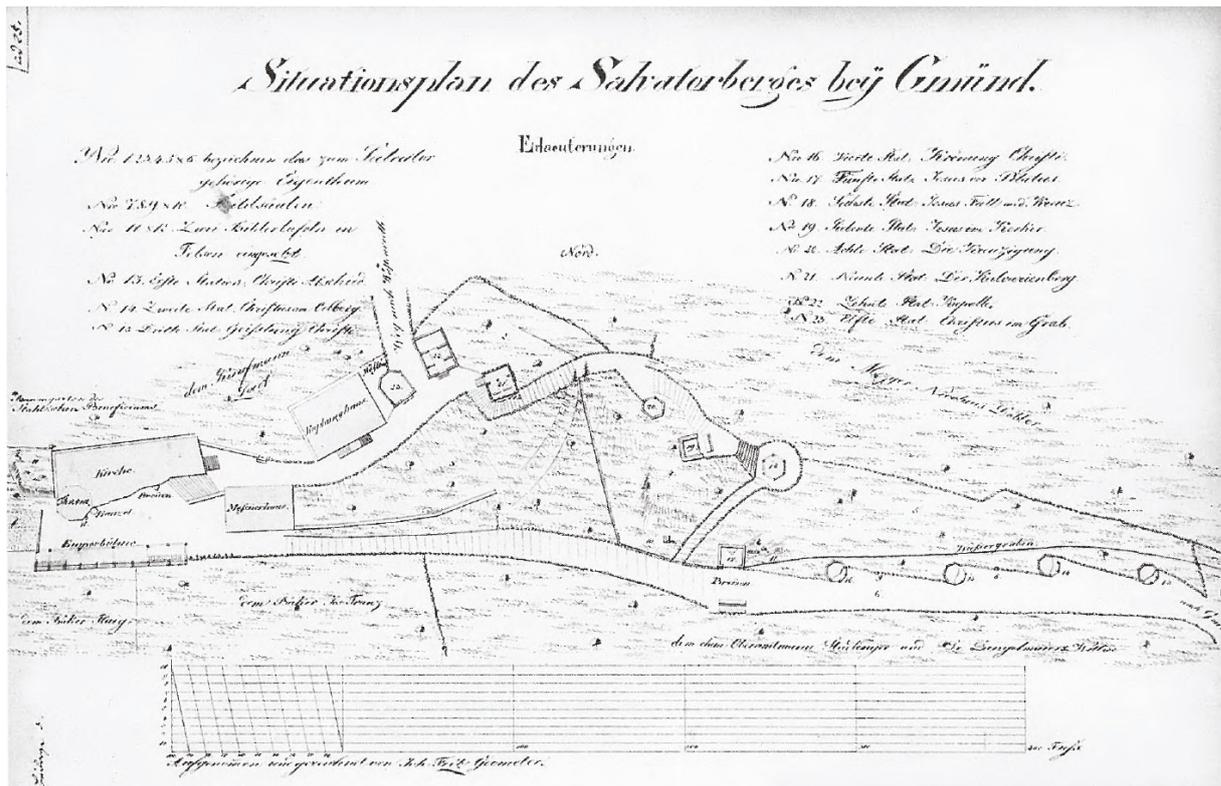


Bild 2 St. Salvator Kreuzweg. Situationsplan von Johann Fritz 1829, DAR [Quelle: Strobel, 2003, S. 134]

Die obere Felsenkapelle war als eine Eremitage – „die sog. Priesterwohnung“ – genutzt worden. Sie wurde im Anschluss ebenfalls durch Caspar II Vogt ausgebaut und mit dem aus dem massiven Felsen gehauenen Ölberg ausgestattet. 1618 wurde die untere, 1623 die obere Kapelle geweiht (Bild 4).

Zwischen 1621 und 1628 fertigte Caspar Vogt außerdem mehrere (wohl sechs oder sieben) steinerne Bildstöcke für einen Kreuzweg. Sie wurden an dem Weg aufgestellt, der noch heute in großer Z-Form zur Salvatorkapelle hoch führt.

Im späten 17. und frühen 18. Jahrhundert erfolgte der Ausbau des Kreuzwegs (Bild 2). Die steinernen Bildstöcke scheinen den religiösen Bedürfnissen der Gläubigen nicht mehr entsprochen zu haben, denn sie wurden durch zehn kleine Wegkapellen aus Fachwerk ersetzt. Für diese schuf der Gmünder Bildhauer Johann Michael Maucher um 1680/90 nicht ganz lebensgroße Holzskulpturen. Im frühen 18. Jahrhundert entstanden in der Folge die Ecce-Homo-Doppelkapelle als Brunnenkapelle und die Muschelkapelle als Andachts- oder Bußkapelle. Auch die Anfänge der Kerkerkapelle als Grottenarchitektur datiert in diese Zeit. Als Abschluss dieser Bauphase wurden zwei der geschlossenen Wegkapellen zu offenen Stationshäuschen umgestaltet.

Nach 1770 erfuhr die Wallfahrtsstätte St. Salvator eine umfassende Neu- und Umgestaltung. Der Gmünder Barockbaumeister Johann Michael Keller errichtete 1770 das Kaplaneihaus. 1785 erfolgten Maßnahmen am Turm der Felsenkapelle und an den bestehenden Kapellenbauten. Am Beginn des Stationsweges, wo nach einer historischen Ansicht zuvor ein Tor stand, wurden zwei Linden gepflanzt. Schließlich wurden ab 1789 die vier unteren geschlossenen Wegkapellen durch neue halboffene Stationshäuschen mit Eisengitter ersetzt. Neben dem Kaplaneihaus brach man 1792 ein Stationshäuschen ab und errichtete an dieser Stelle eine neue Heiliggrabkapelle. 1794 wurde sodann der breite, geradlinige, am Vorplatz der Felsenkapelle endende Weg an der südlichen Grundstücksgrenze angelegt. Anton Bez aus Waldstetten schuf 1798 neue Figuren für die beiden östlichen Stationshäuschen.

1872 und 1881 schuf der Gmünder Künstler C. Bohnenberger 14 Kreuzwegstationen in Form reliefierter Zinkplatten, die an Bildstöcken, Stationshäuschen und Kapellen angebracht sind und die älteren Stationen einerseits zu einem neuen Kreuzweg zusammenfassen, andererseits überlagern.

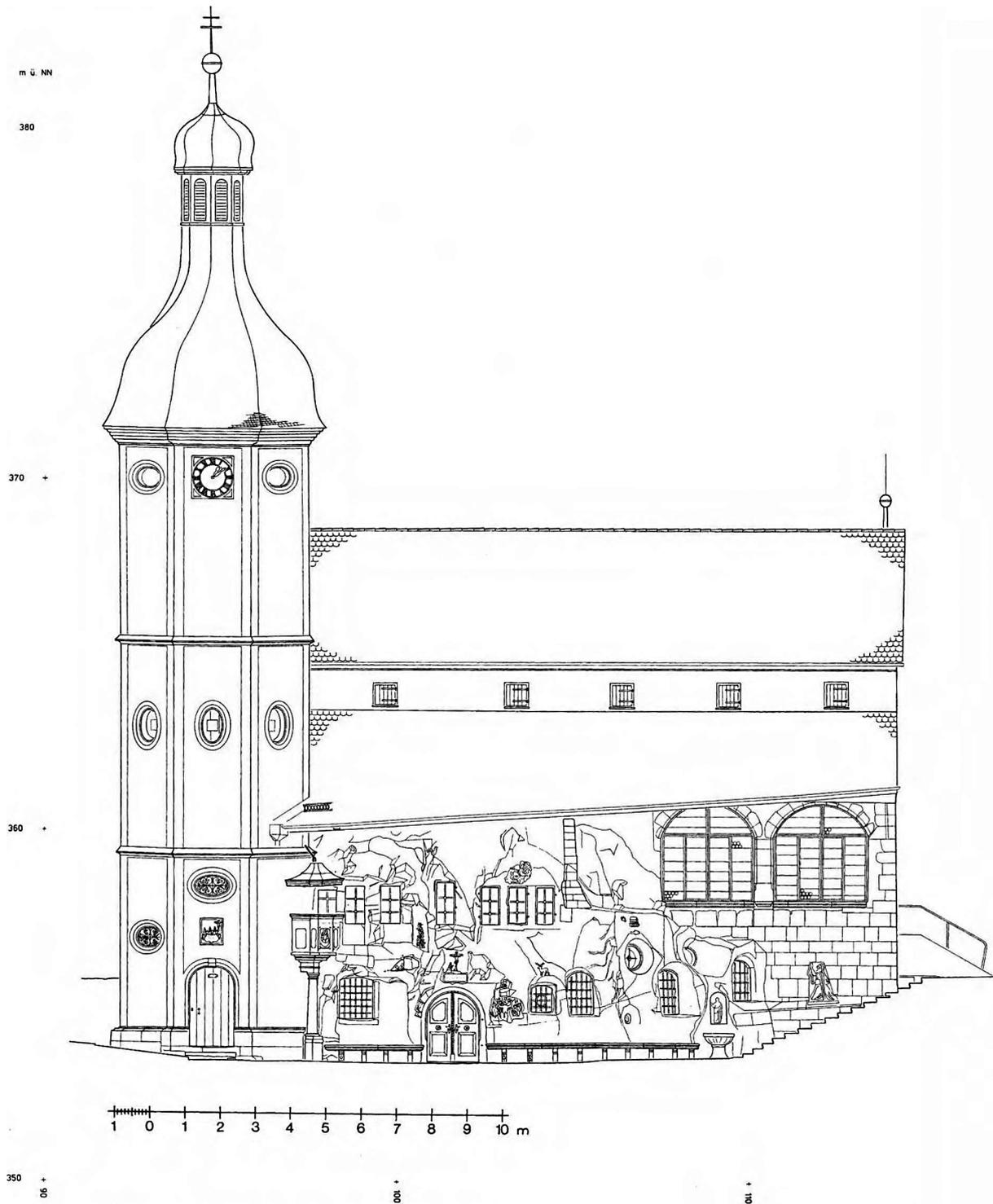


Bild 3 St. Salvator. Photogrammetrie der Südfassade 1994 [Quelle: Strobel, 2003, S. 119]

Restaurierungen wurden im 19. Jahrhundert zu-
meist in kleinerem Umfang vorgenommen, so 1889
an der Heiliggrabkapelle. 1905 wurde Bildhauer
Britsch mit der Überarbeitung und farblichen Neu-
fassung der Figuren in den Stationshäuschen beauf-
tragt. Instandsetzungs- und Restaurierungsmaß-
nahmen an den Kapellen fanden im 20. Jahrhundert

kontinuierlich statt. Der Kalvarienberg wurde 1973
wegen umfassender Schäden restauriert bzw. ko-
piert. Zum Schutz wertvoller Originalsubstanz wur-
den und werden seit den 1980er Jahren in Abstim-
mung mit der fachlichen Denkmalpflege überwie-
gend konservierende und substanzerhaltende Maß-
nahmen durchgeführt.

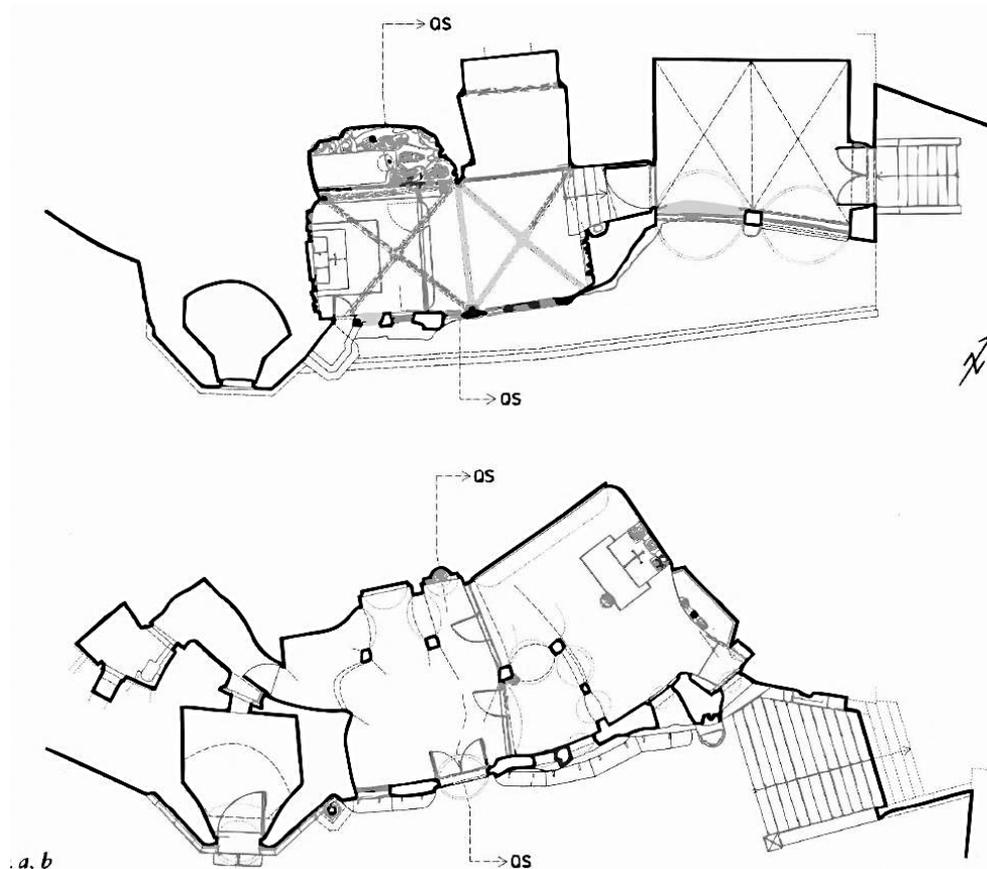


Bild 4 St. Salvator. Grundrisse der beiden Felskapellen [Quelle: Strobel, 2003, S. 120]

3 Beschreibung der Felskapelle

Der von Osten ansteigende Wallfahrtsweg endet an einem gepflasterten Vorplatz, über dem sich die aus dem Fels gearbeitete, zweigeschossige Felskapelle mit gemauerter Vorhalle erhebt. Die Unregelmäßigkeit in Grundriss und Fassadenaufriß spiegelt die gewollte Naturbelassenheit der Anlage deutlich wider. Unregelmäßig angeordnete Fensteröffnungen in wechselnden Formen und Formaten gliedern die der Stadt zugewandte Südfassade. Charakteristisch sind die vielen aus dem Stein herausgearbeiteten Reliefs mit biblischen und volkstümlichen Szenen sowie der so genannte Mosesbrunnen. Den westlichen Abschluss der Felskapelle bildet der weithin sichtbare achtseitige, dreigeschossige Turm mit schiefergedeckter Haube und hoher Laterne.

Die über den gepflasterten Vorplatz von Süden erschlossene Untere Kapelle ist in einen Bet- und Altarraum gegliedert und wird von einem flachen Kuppelgewölbe überspannt. Der Fels- und Höhlencharakter ist hier anschaulich überliefert. Die

Wände sind mit unterschiedlich großen Figuren- und Votivabennischen versehen, wobei die rechts vom Altar angeordnete Felsnische mit der Kreuzigungsgruppe das eigentliche Wallfahrtskultbild beherbergt. Die aus dem Fels gearbeiteten Figuren zeigen in Frontalansicht Maria und Johannes und Christus am Kreuz, das von einem blechernem Strahlenkranz hinterfangen wird. Auf den Figuren sind unterschiedliche Farbfassungen erkennbar.

Die Obere Felskapelle betritt man von Osten durch eine zweijochige, kreuzgratgewölbte Vorhalle. Der hintere Kapellenraum ist um einige Stufen tiefer gelegen und ebenso wie die untere Kapelle gänzlich aus dem Fels gearbeitet. Unter dem flachen Rippengewölbe befindet sich an der nordwestlichen Felswand der Ölberg. Die plastische Darstellung zeigt den knienden Jesus im umzäunten Garten Gethsemane, ihm zu Füßen die schlafenden Jünger Johannes, Petrus und Jakobus. Von links nähert sich Judas mit der Gruppe der Häscher, im Hintergrund erkennt man die Stadtsilhouette von Jerusalem. Trotz der erkennbaren, bereits weit fort geschrittenen Steinschäden und Substanzverluste besticht die Szene durch ihre Detailgenauigkeit.

4 Würdigung und denkmalpflegerischer Wert

Der Ausbau der Höhlen am Nepperberg zu einer Wallfahrtsstätte ist im Kontext der Gegenreformation zu sehen. Die Bekennung der Gmünder Obrigkeit und Bürgerschaft zum katholischen Glauben und die Anknüpfung an alte Bräuche und Traditionen hat auch das Wallfahrtswesen gefördert. In der Besinnung auf die Urform der Wallfahrt ins Heilige Land entstanden in den deutschen katholischen Gebieten vielerorts Wallfahrtsstätten. Die Verbindung sakraler Architektur mit Natur und Landschaft war dabei ein beliebtes Gestaltungsziel, weil sich dadurch der Kreuzweg Christi oder der Kalvarienberg besonders anschaulich darstellen ließen.

St. Salvator ist in diesem Sinne als Ausdruck der Volksfrömmigkeit und kirchlicher Erneuerung zu sehen. Die Anlage entstand außerhalb der ummauerten Stadt an der Fernstraße nach Stuttgart. Sie war weithin sichtbar und kennzeichnete die katholische Enklave im protestantischen Umland.

St. Salvator stellt mit seinen baulichen Elementen, insbesondere der Felsenkapelle und den Stationshäuschen, mit seiner Ausstattung, den Bildwerken und Plastiken, eine Anlage von hohem Symbolgehalt dar. Die herausragende ästhetische und gestalterische Qualität zeigt sich sowohl an der künstlerischen Gestaltung der einzelnen Elemente, als auch in der anschaulich überlieferten Anlage als Ganzes. Kennzeichnend und von dramatischer Wirkung ist die Abfolge des Kreuzwegs, der im Wechsel von Kapellen, Bildstöcken und Linden in Kurven aufwärts führt und nach der dichten Abfolge von Kapellen, Kaplanei- und Mesnerhaus schließlich den Blick auf die Felsenkapelle als Endpunkt und baulichen Höhepunkt freigibt.

Mit der plastisch und künstlerisch bis ins Detail durchgearbeiteten Felsenkapelle und dem Ölberg schuf der Gmünder Kirchenmeister, Bildhauer und Baumeister Caspar II Vogt sein Hauptwerk, das eng mit der Geschichte der Stadt Schwäbisch Gmünd verknüpft und fest im Bewusstsein der Bevölkerung verankert ist. Die Wallfahrtsstätte St. Salvator dient bis heute ihrer ursprünglichen Funktion und besitzt aufgrund ihrer Einzigartigkeit eine weit über die Grenzen Gmünds hinausreichende Bedeutung.

Das Bewusstsein und die Kenntnis um den hohen künstlerischen und denkmalpflegerischen Wert von St. Salvator waren und sind neben den Ergebnissen

der restauratorischen Untersuchungen wichtige Grundvoraussetzungen für den behutsamen und substanzschonenden Umgang mit diesem bedeutenden Kulturdenkmal und seinen möglichst dauerhaften Erhalt.

5 Literaturreferenzen

- Regierungspräsidium Stuttgart, Liste der Kulturdenkmale in Baden-Württemberg, Regierungsbezirk Stuttgart, Ostalbkreis, Schwäbisch Gmünd, St. Salvator: Begründung der Denkmaleigenschaft gemäß § 12 DSchG, August 2010.
- Numberger, Markus: Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse und Archivrecherchen zum St. Salvator und Nepperberg sowie zum Umfeld des St. Salvator, unveröffentl. Manuskript, Mai/Juni 2010.
- Strobel, Richard: Die Kunstdenkmäler der Stadt Schwäbisch Gmünd IV – Kirchen und Profanbauten außerhalb der Altstadt/Ortsteile, München 2003, S. 113-145 (s. dort weiterführende Literatur).
Bildnachweise darin:
Bild 1, 2: Druckvorlagen: Diözesanarchiv Rotenburg
Bild 3: Photogrammetrie: Landesamt für Denkmalpflege im RP Stuttgart
Bild 4: Aufmaß und Reinzeichnung: Büro Gromer (Claudius Homolka)

Autoren

- Schubart, Ulrike
Landesamt für Denkmalpflege
Dienstszitz Esslingen
Berliner Straße 12
73728 Esslingen am Neckar
ulrike.schubart@rps.bwl.de
- Geiger-Schmidt, Edeltrud
Landesamt für Denkmalpflege
Dienstszitz Esslingen
Berliner Straße 12
73728 Esslingen am Neckar
edeltrud.geiger-schmidt@rps.bwl.de
- Strobel, Richard
ehem. Landesamt für Denkmalpflege
Dienstszitz Esslingen

Der Schwäbisch Gmünder Salvator - Geschichte und Geschichten

Klaus Graf

Abstract: Der Beitrag behandelt die Geschichte des Schwäbisch Gmünder Wallfahrtsheiligtums St. Salvator unter drei Aspekten. Der erste Abschnitt ist eine Forschungsgeschichte seit dem Anfang des 19. Jahrhunderts, während sich der zweite den Anfängen des Salvators als Kultstätte widmet. Schon vor den gegenreformatorisch motivierten Bauarbeiten in den Jahren nach 1617 gab es eine kirchliche Nutzung: Eine Quelle von 1585 weiß von zwei Altären in den Felsenhöhlen, die man im Spätmittelalter und der frühen Neuzeit als Näberstein oder Nepperstein bezeichnete. Vorgeschlagen wird, die Kapelle hypothetisch mit einer am Anfang des 16. Jahrhunderts bezugten Wolfgangskapelle zu identifizieren. Der dritte Abschnitt zitiert Äußerungen aus Publikationen des 19. Jahrhunderts zur Bedeutung des Salvators und geht auch auf die "Volkssagen" ein, die sich an ihn als "Erzähl-Mal" knüpften.

Keywords: Gegenreformation; Schwäbisch Gmünd; St. Salvator; St. Wolfgang; Wallfahrt; Volkssage

1 Einleitung

Der St. Salvator ist bis heute ein stimmungsvolles Stück Gmünder Eigenart geblieben, an dem man hängt und auf das man stolz ist in der Stadt. Seit über dreieinhalb Jahrhunderten pilgern die Gmünder auf den Salvatorberg, einst aus Frömmigkeit, heute vielfach, um die Ruhe und die eigentümliche Atmosphäre der Stätte zu genießen. Das historische Ensemble aus Kreuzweg und den beiden Felsenkapellen verkörpert wie kaum ein anderes „Alt-Gmünd“, und dies nicht nur für die katholischen Bürger. Der Besucher des Heiligtums taucht gleichzeitig in eine ferne Vergangenheit ein, wird konfrontiert mit der Aura des „Altehrwürdigen“.

Hier kann es nicht darum gehen, eine gelehrte Gesamtdarstellung der Salvator-Geschichte vorzulegen. Vielmehr sollen, anknüpfend an eine frühere eigene Veröffentlichung¹, wichtige Aspekte näher

beleuchtet werden: die Forschungsgeschichte (Abschnitt 1), die Frage nach dem Alter des Salvators als Kultstätte (Abschnitt 2), die Wahrnehmung des Salvators im 19. Jahrhundert und „Salvator-Sagen“ (Abschnitt 3).

2 Forschungsgeschichte

Eigentlich müsste die Geschichte der Erforschung des St. Salvators mit den gelehrten Mutmaßungen des Juristen Leonhard Friz in seiner ungedruckten „Beiläufigen Beschreibung des Eppersteins oder Salvatoris“ aus dem Jahr 1620 beginnen, doch will ich die Besprechung dieses bemerkenswerten Werks zurückstellen. Joseph Alois Rink distanzierte sich in der ersten gedruckten Stadtgeschichte (1802) deutlich von den Friz'schen Kombinationen²:

freiburg.de/volltexte/5585/. Gewidmet sei dieser Beitrag dem dankbaren Gedenken an Dr. Peter Spranger (1926-2013), Verfasser des Salvator-Kirchenführers von 1999.

²Joseph Alois Rink: Kurzgefaßte Geschichte, und Beschreibung der Reichsstadt Schwäbisch Gmünd (1802), S. 64f. E-Text (mit Digitalisat) erreichbar über die Seite zu Schwäbisch Gmünd auf Wikisource: https://de.wikisource.org/wiki/Schw%C3%A4bisch_Gm%C3%BCnd.

¹Es handelt sich um eine teils erheblich erweiterte, teils gekürzte Neufassung von Klaus Graf: Das Salvatorbrunnlein. Eine bislang unbekannte Gmünder "Sage" aus der Sammlung des Stuttgarter Gymnasialprofessors Albert Schott d. J. (1809-1847). In: Einhorn-Jahrbuch 1995, S. 109-118. Online: <http://www.freidok.uni->

Nahe bey Gmünd rechts am Wege nach Lorch erhebt sich eine Kirche am Berge, die den Namen St. Salvator führet, und in großem Ansehen stehet. Die Kirche ist in einen Sand Felsen gegraben, und sieht mehr einem unterirdischen Gewölbe, als einer Kirche gleich, worüber aber nun ein Gebäu mit Dachung aufgeführt ist. Die Sage machte diese Felsen Höhle zu einem Versammlungs Ort der Christen zur Zeit der Verfolgung von den Heiden dieser Gegend, und so erhöheth sie ihr Alterthum bis auf die Regierung Jahre des Clodoväus († 511) besonders, weil an dem Hauptaltar der Höhle eine Lilie, das Wappen des Clodoväus, von jeher eingehauen war. Alles dieses ist sehr unwahrscheinlich, weil es die ganze Geschichte gegen sich hat. Um diese Zeit waren in unserer wilden, und unangebauten Gegend gewiß noch keine Christen, und die vom Himmel gebrachte Lilien Flagge gehört zu den frommen Fabeln der Vorzeit. Diese Felsenhöhle scheint nichts anders zu seyn, als das Kirchlein eines dabey wohnenden Eremiten, deren es im zwölften Jahrhundert, besonders viele gab. Diese erweiterten, und verschönerten die Felsenhöhle, jeder nach seinem Geschmack, immer mehr, oder liessen sie besser herstellen, bis endlich 1616 ein gewisser Pfarrer von Sulzfeld am Mayn, Heinrich Pfenningmann von Gmünd gebürtig, 200 fl. zur Verbesserung des Eppesteins, denn so heißt der Fels, stiftete. Itzt nahm sich der Magistrat darum an, und ließ diese Felsen Kirche 1617 durch den Stadt Steinmetzen, und Kirchenmeister Kaspar Vogt besser herstellen, und mit einer Dachung versehen. Von dieser Zeit fieng diese Kirche erst an, von den Benachbarten häufig besucht zu werden, und von dem nun reichlicher fallenden Opfer wurde sie immer mehr verschönert, und dem herbey eilenden Landvolke gefälliger gemacht. Damals waren Burgermeister Kilian Debler, Wilhelm Holzwarth, und Laurenz Ramser, Syndikus aber, der [66] uns diese Nachricht aufbewahrt hat, Leonard Fritz. Obgedachter Baumeister starb 1646 den 22. März im 60. Jahre seines Alters, und im 36. seines Kirchenmeister Amtes.

Dass verfolgte Christen sich im 6. Jahrhundert in eine Felsenhöhle beim Salvator geflüchtet haben, sei eine "haltlose Sage", befand die Oberamtsbeschreibung Gmünd (das Geschichtliche verantwortete der Weinsberger Dekan Hermann Bauer). Sie skizzierte auch die Baugeschichte der Salvatorkirche³. Eine kurze Geschichte und Beschreibung des

³Beschreibung des Oberamts Gmünd (1870), S. 258 (Zitat), 202f. Ebenfalls in Wikisource erfasst.

St. Salvators hatte auch die Stadtgeschichte von Michael Grimm (1867) geboten, wobei aber die Ablehnung des merowingischen Ursprungs einfach von Rink abgeschrieben worden war⁴. Grimm teilte (vor allem aufgrund der Chronik Dominikus Deblers) in einem anderen Kapitel seines Buchs farbige Details aus dem katholisch-kirchlichen Leben der Reichsstadt Gmünd mit. So heißt es zum Karfreitag⁵:

An diesem Tage gieng man schon frühe auf den Salvator, woselbst man viele Geißler, Ausspanner und Kreuzschleifer antraf. Die Geißler hatten weiße Hemden an und weiße Kaputzen auf dem Haupt; der Rücken war ganz bloß; sie peitschten sich so stark, daß das Blut herabrann. Die Kreuzschleifer hatten blaue Hemden und Kappen und schleppten ein Kreuz nach sich. Die Ausspanner waren wie diese gekleidet, hatten aber einen Stock durch die Arme. Öfters giengen alle diese bei der größten Kälte noch barfuß und schleppten große Ketten an den Füßen nach. Manche machten auch Bußgänge auf den Sct. Bernhards- und Rechberg. Viele trugen auch ehedessen während dieses Tages Bußkleider, bestehend aus einem wollenen Sack.

Fromme Wallfahrtsliteratur des 19. Jahrhunderts enthielt kürzere Zusammenfassungen der Salvatorgeschichte, wobei als Quelle insbesondere die Abhandlung von Friz und die handschriftlichen Fortsetzungen zu den Salvator-Wundern dienten⁶. So heißt es in Aegidius Müllers Beschreibung aller deutschen Wallfahrtsstätten (Erstausgabe 1887)⁷:

Im Jahre 1721 fuhr der lutherische Bürgermeister Michael Keser von Weiler mit einem mit Wein beladenen Wagen außerhalb der Stadt Gmünd an dem Katharinenhospital vorbei. als er plötzlich einen epileptischen Anfall bekam. Häufig nämlich litt er an solchen Anfällen. Eine in der Nähe befindliche Frau eilte ihm zu Hülfe und gab ihm den Rath. seine Zuflucht zu dem gnadenreichen Kruzifixbilde auf dem Salvatorberge zu nehmen, sie zweifle nicht daran, daß sein Gebet bei Gott Erhörung finden werde. Der Bürgermeister befolgte diesen Rath und machte

⁴Michael Grimm: Geschichte der ehemaligen Reichsstadt Gmünd [...] (1867), S. 276-281.

⁵Ebd., S. 423. In Wikisource erfasst. Vgl. auch Else Gündle: Brauchtum im alten Gmünd (1953), S. 22f.

⁶Von großem Wert ist die Bibliographie bei Richard Strobel: Die Kunstdenkmäler der Stadt Schwäbisch Gmünd 4 (2003), S. 113. Ergänzend: Karl Rolfus: Klänge aus der Vorzeit. Fromme Sagen und Legenden [...] 1 (1873), S. 125f.; Aegidius Müller: Das heilige Deutschland. 4. Auflage (ca. 1900), S. 521-523 (beide in Google Books, letzteres nur mit US-Proxy).

⁷Müller (zitiert nach der 4. Auflage), S. 522.

nun jedes Jahr eine Wallfahrt nah dem Salvatorberge, wo er seine Andacht verrichtete und ein Opfer niederlegte. Früher war er fast täglich von dieser Krankheit heimgesucht worden, aber jetzt trat alsbald Besserung ein und nach und nach verlor sich das Uebel gänzlich.

Eine solide kunstgeschichtliche Beschreibung verfasste Eugen Gradmann für das 1907 erschienene Inventar der Kunst- und Altertumsdenkmale⁸. Er war von der Stimmung der Wallfahrtsstätte ersichtlich beeindruckt: "Man wird bald an die Externsteine, bald an Subiaco erinnert und an den St. Petersfriedhof zu Salzburg. Die ganze Anlage atmet volkstümliche, von religiöser Mystik erfüllte Naturpoesie"⁹.

Den ersten Meilenstein der wissenschaftlichen Erforschung der Salvator-Geschichte legte mit Blick auf das dreihundertjährigen Jubiläum 1917 im Jahr 1916 Rudolf Weser (1869-1942) vor¹⁰, damals Stadtpfarrer in Söflingen und einer der besten Heimatforscher, die Schwäbisch Gmünd je aufzuweisen hatte. Er würdigt die Abhandlung von Friz, stellt die Abschriften dieses Werks vor und gibt Hinweise auf die weiteren Salvator-Schriften, die schon damals von außerordentlicher Seltenheit waren und womöglich heute gar nicht mehr alle in Exemplaren ohne weiteres nachweisbar sind. Weser eröffnete seine kritischen Darlegungen mit einer provokanten These: "Der Salvator als Kultort und Wallfahrtsort beginnt erst mit dem Bau der Felsenkapellen 1617 bis 1620 durch Kaspar Vogt, Kirchenmeister (= Kirchenbaumeister) von Gmünd"¹¹. Wesers grundlegende Studie ist heute noch lesenswert, auch wenn die zitierte These widerlegt werden konnte.

Aus kunsthistorischer Sicht widmete sich 1936/37 in den "Gmünder Heimatblättern" Walter Klein dem Erbauer des Salvators Kaspar Vogt¹². Eingangs wird die besondere Bedeutung des Salvators für das Volksleben der Stadt beschworen:

⁸Die Kunst- und Altertums-Denkmale im Königreich Württemberg (1907), S. 415-419.

⁹Ebd., S. 417.

¹⁰Rudolf Weser: Der Salvator in Gmünd und sein Erbauer. In: Archiv für christliche Kunst 34 (1916), S. 39-50, 62-79. Zu seiner Bibliographie:

https://de.wikisource.org/wiki/Rudolf_Weser.

¹¹Weser 1916, S. 42.

¹²Walter Klein: Der Erbauer des Salvators Caspar Vogt und sein Werk. In: Gmünder Heimatblätter 9 (1936), S. 113-122, 129-141, 145-151, 161-170, 177-184; 10 (1937), S. 1-10. Zu Kaspar Vogt vgl. jetzt Hermann Kissling: Künstler und Handwerker in Schwäbisch Gmünd 1300-1650 (1995), S. 201-204.

Kein Baudenkmal unserer Stadt ist im Volksleben so verwurzelt wie der sagenumwobene Kalvarienberg St. Salvator, um dessen Felsengrotten sich der Mythos urchristlicher Versammlungsstätten rankt, dessen Architektur und Plastik mit der Natur eine seltene und schöne Verbindung eingegangen ist.

Klein konnte der Quellenkritik Weser keine entscheidenden Argumente entgegensetzen, hatte aber das Gefühl, dass die Schärfe von Wesers These "ein Stück geheimnisvoll-duftender Frühgeschichte zerstöre"¹³. Klein referiert breit die Ausführungen von Friz und möchte ihm durchaus Glauben schenken, wenn dieser betont, bei den Arbeiten ab 1617 habe es sich um die Wiederherstellung eines früheren Kultorts gehandelt. Es schien Klein wahrscheinlich, dass der Salvator schon in der Romanik, im 13. Jahrhundert, kultisch genutzt wurde, was er mit stilkritischen Hinweisen auf alte Vorlagen der Plastiken in der unteren Kapelle und Erwähnungen von Bildwerken bei Friz begründete¹⁴.

Mehrere Studien zum Salvator hat der langjährige Gmünder Stadtarchivar Albert Deibele (1889-1972) vorgelegt. Neben einem Kirchenführer (1954), der zusammenfassend Darstellung im Rahmen der Quellensammlung zu St. Leonhard und den ihr angeschlossenen Pflügen (1971)¹⁵ und einem Aufsatz "Der St. Salvator in den Stürmen der Aufklärung"¹⁶, der sich mit den Versuchen in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts, die Wallfahrt zu unterdrücken, befasste, sind zwei Beiträge zur Frühgeschichte des Wallfahrtsorts zu nennen. 1954 wurde in den Gmünder Heimatblättern publiziert: "Über das Alter des Salvators als Kultstätte"¹⁷. Es ging Deibele um Widerlegung der Ansicht Deblers, ohne dass Deibele freilich gegenüber Klein wesentlich neue Argumente vorbringen konnte. Auch Deibele wollte Dr. Friz glauben und schloss mit der Feststellung: "Das Alter des Salvators als Kultstätte geht weit über das Jahr 1617 hinaus". Drei Jahre später wies Deibele - zu Recht - die Spekulation von Axel Hans Nuber zurück¹⁸, der in seiner hypothesenreichen Tübinger

¹³Klein, S. 119.

¹⁴Klein, S. 170 (Zusammenfassung).

¹⁵Albert Deibele: St. Leonhard in Schwäbisch Gmünd und die ihm angeschlossenen Pflügen (1971), S. 91-93 (S. 93f. folgt ein kurzer Beitrag von Hermann Kissling zum Ölberg); S. 178-180 Regesten Nr. 463-470.

¹⁶Albert Deibele: Der St. Salvator in den Stürmen der Aufklärung. In: Gmünder Heimatblätter 26 (1965), S. 52-56.

¹⁷Albert Deibele: Über das Alter des Salvators als Kultstätte. In: Gmünder Heimatblätter 15 (1954), S. 17-20, 25-27.

¹⁸Albert Deibele: Woher kommt der Name "Nepper"? In: Gmünder Heimatblätter 18 (1957), S. 62f. Vgl. auch die

Dissertation den Salvator als ehemalige Felsenburg des Stadtgeschlechts der Vetzer angesehen hatte, dessen Vornamen gern aus dem Stamm "Eber" gebildet wurden, was Nuber mit der Namensform Eberstein (so Felix Fabri) bzw. Epperstein (Friz) zusammenbrachte. Deibele konnte anhand archivalischer Quellen zeigen, dass der eigentliche Name Näberstein lautete (durchbohrter Stein, vom Begriff Näber = Bohrer) und Epperstein eine Sekundärform darstellt.

Am eher betulichen Diskurs der Gmünder Heimatforschung rüttelte der nur kurzzeitig als Gmünder Stadtarchivar amtierende Peter Scherer. 1971 vermutete er in seinen glänzend formulierten Überlegungen zur Volksfrömmigkeit des 17. und 18. Jahrhunderts, dass Leonhard Friz "der Initiator des ganzen Unternehmens" St. Salvator gewesen sei¹⁹.

1984 konnte ich in meiner Magisterarbeit zu den Gmünder Chroniken endlich einen eindeutigen Quellenbeleg für eine kirchliche Nutzung des Salvators vor 1617 beibringen. In einem Werk David Wollers von 1585 fand ich "zwei schöne Altäre" bei einem alten Burgstall vor der Stadt erwähnt, der den Salvator meinen muss²⁰.

Ohne von diesem Quellenfund Notiz zu nehmen, stellte Hans-Helmut Dieterich, Experte für die Geschichte der Gmünder Klöster, die Salvator-Geschichte in der Frühen Neuzeit 1993 in einem längeren Aufsatz dar²¹. Auch wenn manche Wünsche offen bleiben, enthält der Beitrag wertvolle Angaben zu frühneuzeitlichen Quellen, insbesondere zu den Aufzeichnungen der Gmünder Kapuziner, die den Salvator seelsorgerisch betreuten. Man erfährt wissenswerte Einzelheiten zu den großen Meßstiftungen des 18. Jahrhunderts (Stiftung der Stahlschen Erben 1745 und der Maria Theresia Debler 1770) und auch etwas über die 1705 gegründete Bruderschaft zu den heiligen fünf Wunden. Im gleichen Jahr beschrieb Hermann Kissling eine Zeichnung der unteren Salvatorkapelle, die 1622 der Gmünder Maler Christoph Friedel anfer-

tigte und die es ins Fogg-Museum der Harvard Universität verschlagen hat²².

1999 komprimierte Peter Spranger die bisherige Forschung in einem gut lesbaren und ansprechend illustrierten kleinen Kirchenführer, wobei er bereits auf das Manuskript des monumentalen Kunstdenkmälerinventars zurückgreifen konnte, das aus der Feder von Richard Strobel 2003 erschienen ist²³. Er erarbeitete die Baugeschichte (mit Einzelnachweisen) und legte eine erschöpfende Erfassung des vorhandenen Bestands der Bauten und ihrer Ausstattung vor. Leider hat mein Aufsatz von 1995 über das "Salvatorbrunnlein", der sich auch mit dem Alter des Salvators befasste, in diesem großartigen Opus keine Berücksichtigung gefunden.

Die bereits wiederholt erwähnte Salvatorschrift des Dr. Leonhard Friz ist zwar (leider) ungedruckt, aber seit 2012 auf mein Betreiben hin online, also nunmehr veröffentlicht. Digitalisiert wurde die älteste Handschrift (Universitätsbibliothek München 4° Cod.ms. 287) aus dem dritten Viertel des 17. Jahrhunderts²⁴. Diverse Texte aus dem 19. Jahrhundert zur Wahrnehmung des St. Salvator stellt Wikisource, ein Schwesterprojekt der Wikipedia, im Netz zur Verfügung²⁵.

3 Geschichtlichkeit: Stil als Erinnerung?

Dass die Kultstätte "uralt" sei - diese Auffassung wurde schon bei der Etablierung des Salvators als gegenreformatorisches Wallfahrtsheiligtum in den Jahren nach 1617 propagiert. Der Gmünder Jurist Leonhard Friz kam in seiner 1620 datierten "Beiläufigen Beschreibung des Eppersteins oder Salvatoris" zu dem Schluss, aufgrund einer eingehauenen Lilie, des Symbols der französischen Könige, an einem heute nicht mehr vorhandenen Altar in der Nähe des Eingangs zur unteren Kapelle dürfte der Kultort in der Zeit des Frankenkönigs Chlodwig (um 482) oder wenig später entstanden sein. Er habe den

Belege ab 1324 ("Wingarten an dem Naeber") bei Klaus Graf: Gmünder Chroniken im 16. Jahrhundert (1984), S. 163.

¹⁹Peter Scherer: Zur Volksfrömmigkeit des 17. und 18. Jahrhunderts am Beispiel Schwäbisch Gmünd. In: Schwäbisch Gmünd. Beiträge zur Geschichte und Gegenwart der Stadt (1971), S. 193-228, hier S. 194, 196.

²⁰Die Näberstein-Überlieferungen erörterte Graf: Gmünder Chroniken, S. 163-165.

²¹Hans-Helmut Dieterich: Der Salvator bei Schwäbisch Gmünd. In: Gmünder Studien 4 (1993), S. 69-94.

²²Hermann Kissling: Die untere Salvatorkapelle, eine Zeichnung des Gmünder Malers Christoph Friedel von 1622. In: Einhorn-Jahrbuch 1993, S. 131-135.

²³Strobel S. 113-146.

²⁴<http://epub.ub.uni-muenchen.de/15027/>. Vgl... Klaus Graf: Beschreibung des St. Salvators in Schwäbisch Gmünd von Leonhard Friz online. In: Archivalia vom 26. Dezember 2012. Online: <http://archiv.twoday.net/stories/232601530/> (mit neuen Quellenhinweisen zur Biographie des Dr. Friz).

²⁵Vgl. oben Anm. #.

damals noch verfolgten ersten Christen der Gegend als Zufluchtsort und Kapelle gedient.

Ein hohes Alter suggeriert auch die lateinische Inschrift über der Kreuzigungsgruppe in der unteren Kapelle: Das Bildwerk sei geschaffen worden, bevor Gmünd von einer Mauer umgeben war. Stadtgründung und Ummauerung setzte Friz mit den anderen Chronisten in das Jahr 1110. Die baulichen Maßnahmen nach 1617 galten ausdrücklich der "Reparation", also der Wiederherstellung und Erneuerung einer sehr alten Kultstätte. So ist eine lateinische Inschrift über dem Eingang der unteren Kapelle dem Andenken des im würzburgischen Sulzfeld am Main tätigen Priesters Heinrich Pfennigmann aus einer Gmünder Ratsfamilie gewidmet, der als "Wiederhersteller dieser Krypta" (*huius criptae reparatori*) bezeichnet wird - er hatte in seinem Testament von 1616 200 Gulden für die Wiederherstellung des Neppersteins gestiftet.

Es ging dem Rat, der 1622 den Maler Friedel beauftragte, diese "diese Wallfahrth oder Neperstein" für die Nachwelt bildlich festzuhalten (das sogenannte Salvatorbild, noch heute in der oberen Kapelle zu sehen), um die Legitimation seines nicht mit dem Diözesanbischof abgestimmten Unternehmens. Die nach juristischem Muster in 20 "Fragen" organisierte Abhandlung des Dr. Leonhard Friz liest sich wie eine Rechtfertigungsschrift²⁶. Darauf deuten die nach der 15. Frage (über die Reparatur des Eppersteins) behandelten Probleme hin: Frage 16 erörtert die Rechtsgültigkeit der testamentarischen Verfügung, und in Frage 17 fragt Friz, ob der Gmünder Rat überhaupt berechtigt gewesen sei, den Epperstein ohne Vorwissen des zuständigen Bischofs zu reparieren. Friz, der um 1625 aus den Gmünder Quellen verschwindet, war wahrscheinlich der juristisch führende Kopf der Gmünder Hexenjagd 1613-1618²⁷. Nach dem Ende der Verfolgung fand er in der Förderung des Salvator-Kults offenbar ein neues Tätigkeitsfeld.

Kennzeichnend für die Gegenreformation ist unter anderem die Wiederbelebung älterer Kulte, das Anknüpfen an mittelalterliche Traditionen und Ver-

ehrungsformen. Schon Peter Scherer sprach mit Blick auf die "Wiederherstellung" des Salvator-Kults von einem "archaisierenden Rückgriff"²⁸. Nicht zuletzt das kunsthistorische Phänomen der "Nachgotik" veranschaulicht, daß diese Bemühungen auch im Kirchenbau des 16. und 17. Jahrhunderts ihren Ausdruck fanden. Es ist somit kein Zufall, dass der am Salvator und der 1622, also etwa gleichzeitig errichteten Herrgottsruhkappelle tätige Gmünder Kirchenmeister Kaspar Vogt ein "Renaissance-Gotiker" war²⁹. Weniger bekannt ist die im 15. und 16. Jahrhundert gelegentlich zu beobachtende Erscheinung der „Romanik-Renaissance“, eines gezielten Wiederaufgreifens romanischer Formen in Architektur, Plastik und Malerei. Eine solche "retrospektive Tendenz" - "Stil als Erinnerung"³⁰ - erklärt wohl auch die Salvator-Darstellung auf dem Hochaltar der unteren Kapelle, deren „Archaismus" Walter Klein „am ehesten an ein im 17. Jahrhundert überarbeitetes Original aus dem 13. Jahrhundert" denken ließ³¹. Etwas später spricht er von Kopien nach alten Vorbildern. Leider hat es Richard Strobel vermieden, sich zur Frage alter Vorbilder zu positionieren. Er referiert die Aussagen von Friz, der zur unteren Kapelle versichert; es sei alles in seinem alten Wesen verblieben, geht aber bei der Baubeschreibung nicht auf die Datierung der Bauplastik und auf mögliche Vorbilder ein³². Man wird annehmen dürfen, dass er die Kreuzigungsgruppe und den Salvator mit Weltkugel als Verklärten ebenso wie die übrige Bauplastik in die Zeit Kaspar Vogts datiert. Natürlich ist es denkbar, dass die Darstellungen alten Vorbildern am Ort folgten. Denkbar ist aber auch, dass sie archaisierend anderen Vorlagen, die man andernorts fand, nachgeschaffen wurden.

Die alte Kontroverse, ob der Salvator bereits vor der Wiederherstellung ein Kultort gewesen sei, kann inzwischen durch den Hinweis auf Erwähnungen in handschriftlich überlieferten Werken des württembergischen Chronisten David Wolleber entschieden werden. In einer Arbeit dieses "Historicus" von 1585

²⁸Scherer S. 196.

²⁹Wolfgang Hipp: Studien zur "Nachgotik" [...]. Diss. Tübingen 1979, S. 1607.

³⁰Ich beziehe mich dabei auf eigene Studien zu diesen Phänomenen: Klaus Graf: Stil als Erinnerung. In: Wege zur Renaissance (2003), S. 19-29; Derselbe: Retrospektive Tendenzen in der bildenden Kunst vom 14. bis zum 16. Jahrhundert. Kritische Überlegungen aus der Perspektive des Historikers. In: Mundus in imagine (1996), S. 389-420.

³¹Klein 1936, S. 167.

³²Strobel S. 114f., 122f.

²⁶Scherer S. 195. Zur historiographiegeschichtlichen Bewertung der Schrift vgl. Klaus Graf: Die Geschichtsschreibung der Reichsstadt Schwäbisch Gmünd im 17. und 18. Jahrhundert. In: Barock in Schwäbisch Gmünd (1981), S. 193-242, hier S. 197-200.

²⁷Klaus Graf: Hexenverfolgung in Schwäbisch Gmünd. In: Hexenverfolgung. Beiträge zur Forschung - unter besonderer Berücksichtigung des südwestdeutschen Raumes (1995), S. 123-139, hier S. 132f..

heißt es, das alte Herkommen der Stadt sei auch aus einem alten "burgstall" vor der Stadt zu ersehen, der in einen Felsen gehauen sei und große Gemächer aufweise, "darinnen zwen schöne altar uffgericht, und ist sonst die gemaine reed, das darinnen die haiden solen gewohnnet haben"³³. In seinem am 12. Februar 1588 der Reichsstadt Nürnberg verehrten "Histori und Zeitbuch" erwähnt Wolleber: "ein gar alt burgstall, in welchem ein felß, darinnen wunderbarliche gemach mit zwayen altar ußgehawen"³⁴. 1591 variiert Wolleber den Wortlaut und spricht von einer "sehr alten wohnung nechst vor der statt gemeinlich das haidisch orth genant"³⁵. Man hat demnach den heutigen Salvator damals in der Stadt als Relikt der Heiden wahrgenommen.

Es gab also bereits im 16. Jahrhundert zwei Altäre auf dem Salvator. Vielleicht darf man - zugegebenermaßen spekulativ - die Kultstätte mit einer sonst nirgends unterzubringenden Wolfgangskapelle identifizieren, für die von der Stadt - nach dem Ämterbesetzungsbuch im Gmünder Stadtarchiv - von 1514 bis zum Ende der 1530er Jahre ein „Bruder“ (Mesner) besoldet wurde³⁶. Der "Bruder zu sant Wolffgang" hätte dann als eine Art Einsiedler die Verehrungsstätte des Regensburger Bischofs am Näberstein/Nepperstein (durchbohrter Stein) betreut. Die Existenz der Salvatorquelle könnte das Gmünder Heiligtum in die Reihe anderer Wolfgangkultstätten stellen, die sich häufig im Wald über Quellen an einer Felswand befinden. Das Wasser solcher Quellen soll gegen Augenkrankheiten helfen. Für meinen Vorschlag spricht auch, dass der Heilige Wolfgang der Legende nach zeitweise als Einsiedler in einer engen Höhle gelebt haben soll³⁷. In Ehingen an der Donau befand sich etwas abseits

der Stadt "in idyllischer Lage" eine Wolfgangskapelle mit Einsiedelei und Brunnlein³⁸.

Trifft meine Hypothese zu, hätte der Nepperstein bereits zu Beginn des 16. Jahrhunderts eine Kapelle beherbergt. In den 1480er Jahren sagt der Ulmer Dominikaner Felix Fabri, dass die Jakobshöhle bei Jerusalem genauso aussehe wie eine Höhle bei Schwäbisch Gmünd, die Eberstein genannt werde³⁹. Von einer kirchlichen Nutzung ist freilich nicht die Rede. Wenn ich eine solche schon für die romani-sche Zeit 1984 als gesichert ansah⁴⁰, so möchte ich heute nicht daran festhalten.

4 Wahrnehmung im 19. Jahrhundert und Erzähl-Mal

Die gelehrten Mutmaßungen über das hohe Alter und die Vergangenheit des Salvators und die bei Wolleber greifbare „gemeine Rede“ der Gmünder Bürger haben eines gemeinsam: Das außergewöhnliche Wallfahrtsheiligtum forderte - gleichsam als Erzähl-Mal - Geschichten und Erzählungen heraus. Am Ende des 16. Jahrhunderts wurde die Stätte als ehemalige Burg ("Burgstall") und einstige Wohnung der Heiden verstanden. Leonhard Friz macht uns nicht nur mit seinen scharfsinnigen Vermutungen über den Ursprung des „Eppersteins“ bekannt, sondern überliefert auch das - bis heute ungemein populäre - „gemeine geschwetz“ von einem unterirdischen Weg zum Kloster Lorch, der aufgrund seines Alters inzwischen eingefallen sei - womöglich bezieht sich das auf die Reste des römischen Limes. Solche Gang-Überlieferungen sind im Sagengut des 19./20. Jahrhunderts alles andere als selten. 1854 wusste Friedrich Vogt wohl aufgrund der lebendigen Gmünder Überlieferung: Vom Altar der oberen Salvator-Kapelle "soll ein unterirdischer Gang zur Stadt hinabführen"⁴¹.

Die wallfahrtsfeindliche Einstellung der Aufklärung konnte im 19. Jahrhundert dem Salvator nur wenig anhaben: Bei der „Stimmung des hiesigen Volkes und der großen Vorliebe für den Salvator“, wie es 1829 heißt⁴², tat sich der Katholische Kirchenrat, die staatliche Aufsichtsbehörde, schwer, den „Wallfahrtsunfug“ zurückzudrängen. Vermutlich hat auch

³³Graf: Gmünder Chroniken, S. 164 nach Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt Hs. 135, S. 181..

³⁴Universitätsbibliothek Leipzig, Rep. II.72a, Bl. 42.

³⁵In der Chorographia, Universitätsbibliothek Tübingen Mh 6, Bl. 195v. Digitalisat: <http://idb.ub.uni-tuebingen.de/diglit/Mh6-1/0402>.

³⁶Diesen Vorschlag habe ich unterbreitet in: Ein Wolfgang-Heiligtum auf dem „Näberslein"? Zur Vorgeschichte des St. Salvators, Rems-Zeitung Nr. 78 vom 1.4.1980, S. 12; Gmünder Tagespost Nr. 81 vom 5.4.1980, S. 15. Erstmals Ämterbesetzungsbuch 1509-1539 im Stadtarchiv Schwäbisch Gmünd, S. 38: Bruder jeweils zu St. Margaretha, St. Leonhard, St. Wolfgang. Strobel 2003 zitierte in seiner Bibliographie meine Artikel von 1980, griff aber meine These nicht auf.

³⁷Vgl. Ulrike Bausewein/Robert Leyh: Studien zum Wolfgangskult. In: Zeitschrift. für bayerische Kirchengeschichte 61 (1992), S. 1-26, hier S. 11-13.

³⁸Franz Michael Weber, Ehingen (1955), S. 258f.

³⁹Graf: Chroniken, S. 163f.

⁴⁰Ebd., S. 163.

⁴¹Friedrich Vogt: Die Schwäbische Alp (1854), S. 68. In Wikisource erfasst.

⁴²Deibele 1965, S. 55.

das problematische Verhältnis zum protestantisch geprägten Württemberg das Festhalten an traditionellen Frömmigkeitsformen gefördert - der Salvator galt als Bestandteil der katholischen Gmünder "Identität". Als Symbol der Gmünder Rückständigkeit erscheint er in den Lebenserinnerungen des württembergischen Publizisten und evangelischen Pfarrers Johann Gottfried Pahl (1768-1839), der in Gmünd zu Beginn des 19. Jahrhunderts seine rebellische Nationalchronik der Teutschen erscheinen ließ: "Zwar fehlte es auch in der Reichsstadt Gmünd nicht an Leuten, denen das Blatt zum großen Aergeruß gereichte, weil es sich auf eine am Fuße des Salvator nie erhörte Weise über Kirchenthum, Mönchthum und Papstthum erklärte"⁴³.

Kaum ein Reisehandbuch des 19. Jahrhunderts versäumte es, den Salvator wenigstens kurz als besondere Sehenswürdigkeit Gmünds zu erwähnen⁴⁴. Längere Ausführungen sind rar⁴⁵. Exemplarisch sei die besonders frühe Beschreibung aus der Feder des protestantischen Pfarrers Philipp Ludwig Hermann Röder zitiert⁴⁶:

Die Kirche St. Salvator steht ausser der Stadt, auf einem Hügel, jenseits der Remse, an der Landstrasse nach Lorch, und giebt der Gegend mit ihren mancherlei abwechselnden Gebäuden ein hübsches Ansehen. Sie ist ganz in Felsen gehauen, welcher Epperstein heisset, und besteht eigentlich aus zwei Kapellen, die übereinander liegen, und mit Einem Dach bedekt sind. Die obere ist der Maria, die untere der Verklärung Christi gewidmet. Bei der Kirche steht ein schöner Thurm. Sie ist eine Wallfahrtskirche, zu welcher aus der Stadt und der Gegend häufig gewallfahrtet wird, und man siehet beständig Leute herab und hinauf steigen. Denn vom Wallfahrten und Prozessionengehen sind die Gmünder grosse Freunde.

In der untern Kapelle ist das eigentliche Wallfahrtsbild auf dem Seitenaltar in Stein gehauen, Christus am Kreuz mit Maria und Johannes. Die Kapelle wird durch die in den Felsen gebrochene Fenster erleuchtet. Gegenüber ist ein bedekter Ort für die Zuhörer der Predigt, und rückwärts ist eine Eremitage in Felsen gehauen, welche ehemals ein Einsiedler

bewohnte. Denn bis auf das Jahr 1616 war dieser Ort bloß eine Eremitenwohnung, bis in diesem Jahr ein gewisser Pfarrer, Pfenningmann, 200 fl. zur Verbesserung dieses Felsen stiftete. Der Magistrat zu Gmünd nahm sich auch der Sache an, und durch fromme Gaben der Wallfahrtenden kam endlich dieser Wallfahrtsort in seinen gegenwärtigen Stand. Vorne an der Kirche stehen das Meßnerhaus und die Wohnung des Benefiziaten, welcher den Gottesdienst dieser Kirche versieht. Der Hügel ist zugleich ein Kalvarienberg, an welchem die Stationen den Hügel hinauf, mit verschiedenen Statuen, in zierlichen Häuschen angebracht sind.

Der Salvator wurde als einzigartig empfunden. Beispielsweise formulierte Bernhard Kaißer 1907⁴⁷:

Englische Altertumsforscher, die dem Salvator nebst anderen hiesigen Sehenswürdigkeiten einen Besuch machten, haben behauptet, daß sie auf ihren Reisen durch ganz Europa nichts Aehnliches gefunden hätten. Es betrifft dieses Urteil weniger die Anlage des Kreuzwegs, so eigentümlich und poesievoll sie auch ist, auch nicht die Kapellen am Wege, sondern die St. Salvatorkirche, bestehend aus zwei übereinanderliegenden in den hier sehr mächtig anstehenden weißen Keupersandsteinfelsen eingehauenen Kapellen und dem in viel späterer Zeit in schlichter Renaissance erbauten achteckigen Glockenturm. Kein Besucher Gmünds sollte versäumen dem St. Salvator einen Besuch abzustatten.

Nicht jeder Protestant dachte wie Ludwig Uhland, der in seinem Tagebuch am 6. September 1814 notierte: "Besteigung des mit der äußersten Geschmacklosigkeit geistlich aufgeputzten St. Salvatorbergs"⁴⁸. Viele Andersgläubige waren durchaus fasziniert von dem seltsamen Kultort. Die aus dem protestantischen Ludwigsburg gebürtige Kinderbuchautorin Tony Schumacher (1848-1931) schreibt in ihren Kindheitserinnerungen⁴⁹:

Die ganz klerikale, urkatholische Luft in Gmünd regte meine Kinderphantaste aufs lebhafteste an. Auf allen Spaziergängen standen am Weg alte Kreuze, und kleine Kapellen luden zum Eintritt und beschaulichen Ausruhen ein. Einen großen Reiz übte ein Kalvarienberg, der sogenannte Salvator, auf

⁴³Johann Gottfried Pahl: Denkwürdigkeiten aus meinem Leben und aus meiner Zeit (1840), S. 194

⁴⁴Siehe das Material in Wikisource (siehe Anm. #) und Google Books.

⁴⁵Vgl. etwa aus katholischer Sicht: Engelbert Hofele: Bilder aus Schwaben (1881), S. 469-479.

⁴⁶Philipp Ludwig Hermann Röder: Geographie und Statistik Wirtembergs 2 (1804), S. 97-99. In Wikisource erfasst.

⁴⁷Bernhard Kaißer: Schwäb. Gmünd und seine Umgebung. In: Blätter des Schwäbischen Albvereins 19 (1907), Sp. 265-276, hier Sp. 275. Erfasst in Wikisource. Die englischen Besucher hat Kaißer von Engelbert Hofele S. 479 abgeschrieben. Dort waren es englische Architekten.

⁴⁸Uhlands Tagbuch 1810-1820. 2. Aufl. (1898), S. 142.

⁴⁹Tony Schumacher: Was ich als Kind erlebt (1901), S. 296f.

mich aus. Stationenweise war hier das Leiden Christi dargestellt, und die lebensgroßen, grotesken Gestalten der bösen Kriegsknechte und des leidenden Heilands machten einen tiefen Eindruck auf mich. Noch mehr aber beschäftigten mich die wallfahrenden Menschen, die mit solch großer Inbrunst beteten und ihre wächsernen Gebilde dem Erlöser zu Füßen legten, und als ich einmal eine arme Frau sah, die auf den Knien, das spitze Pflaster nicht achtend, den Berg hinaufrutschte bis zu der in Stein gehauenen, oben befindlichen Grabkapelle, da hätte ich es sehr gerne nachgemacht, um zu wissen, wie „es thue“, was mir aber strengstens untersagt wurde. Doch hatte Mutter nichts dagegen, sondern freute sich, wenn wir Sträuße von Wiesenblumen dem „armen, lieben Heiland“ unter die Ketten der gefesselten Hände schoben.

Recht weltliche Gedanken kamen dem Oberst Carl von Decker. In seiner 1840 erschienenen Reisebeschreibung ist zum Salvator zu lesen⁵⁰:

Da es grade Sonntag war, so besuchten wir die Kirche Sankt Salvator auf einem nahegelegenen Berge in höchst romantischer Lage. Zwölf bis funfzehn sogenannte heilige Stationen führen vom Fuß des Berges bis zum Gipfel, wo die Kirche steht, welche wahrscheinlich die Stufenleiter zum Himmel vorstellen, aber weit bequemer sind, als das Schicksal sie dem Erdenpilger zu bereiten pflegt. Der Weg war mit frommen Kirchengängern beiderlei Geschlechts bedeckt, und an den großen Wallfahrtstagen soll der Zudrang unermesslich seyn. Bei dem Reichthum des Städtchens und ganz Schwabens an hübschen Mädchen konnte es nicht fehlen, daß fast vor jeder Station ein solches knieend um Erlassung der begangenen Sünden bat, und Mancher konnte man es deutlich ansehen, wie erleichtert sie auf dem Rückwege sich fühlte. So mumienhaft und vertrocknet die Schwäbinnen als Matronen aussehen, so blühend und kernig sind sie als Jungfrauen. – Auch von St. Salvator hat man reizende Aussichten in die romantischen Nebenthäler der Rems, aber im engeren Sinne, und in einem andern Genre wie vom Rechberge; jeder Blick, in welcher Richtung es auch sey, nimmt eine andre Landschaft in sich auf und gäbe Stoff zu einem Kabinetsstück.

Noch intensiver dürften die Katholiken empfunden haben. Starken Eindruck machte der Salvator auf

⁵⁰Carl von Decker: Mittheilungen einer Reise durch die südlichen Staaten des deutschen Bundes [...] (1840), S. 165f.

den Konvertiten Heinrich Eisenbach, der ihn Gründonnerstag 1832 besuchte⁵¹. Der aus Rechberg gebürtige katholische Literat Johannes Scherr (1817-1886) nahm selbstverständlich eine Erinnerung an den St. Salvator in seine Jugenderinnerung „Das Passionsspiel von Gmünd“ (1883) auf⁵². Er erwähnt dort, dass Friedrich Schillers ältere Schwester Christophine erzählt habe, sie habe in ihrer Kindheit mit ihrem Bruder den Kalvarienberg in Gmünd besucht. In Johannes Scherrs großangelegter Schiller-Novelle darf daher eine ausführliche und poetisch schwungvolle Salvator-Beschreibung nicht fehlen⁵³.

Die Rolle des Salvators in der katholischen Volksfrömmigkeit des 19. Jahrhunderts nutzten gerissene Betrüger aus, die 1858 in Schwäbisch Hall vor Gericht standen. Es ging um Schatzhebungen und Geisterbeschwörungen, mit denen man Leichtgläubige um ihr Geld bringen wollte⁵⁴.

Eine besondere Rolle spielt dabei der Salvator in Gmünd, wo nach den Vorspiegelungen der Betrüger öfters geopfert, gebetet, selbst das heilige Abendmahl genossen werden sollte, um die bösen Geister desto sicherer beschwören, die unterirdischen Schätze, deren einer über zwei Millionen betrug, um so gewisser heben zu können.

Damit lässt sich der Bogen schlagen zu den nicht allzu zahlreichen Salvator-Sagen. Unter den wenigen Gmünder Geschichten, die der katholische Volkskundler Anton Birlinger in seiner 1861 erschienenen Sagensammlung „Volkstümliches aus Schwaben“ wiedergibt, erscheint auch eine ihm mündlich zugetragene Salvator-Erzählung. Sie trägt die Überschrift „Der Näberle auf St. Salvator“ und lautet⁵⁵:

Auf dem Salvator bei Gmünd ist der Kreuzweg. Bei der Station: »die Kreuzigung Christi« ist eine Figur unten am Kreuze mit Bohren beschäftigt. Die Figur heißt unter dem Volke nur der „Näberle“. Wenn Kinder hinaufgehen, so muß ihn jedes anspeien, und es würde sich's zur Sünde rechnen, wenn es dasselbige nicht gethan hätte. Man erzählt [161]

⁵¹David August Rosenthal: Konvertitenbilder [...] 3. Aufl. 1/2 (1892), S. 88. Vgl. auch Friedrich Nippold: Welche Wege führen nach Rom? (1869), S. 280.

⁵²Johannes Scherr: Haidekraut [1883], S. 7-10. In Wikisource erfasst.

⁵³Johannes Scherr: Schiller. Kulturgeschichtliche Novelle in sechs Büchern 1 (1873), S. 274f.

⁵⁴Schwäbische Kronik vom 13. Oktober 1858 (Beilage des Schwäbischen Merkur).

⁵⁵Anton Birlinger/Michael Buck: Sagen, Märchen und Aberglauben (1861), S. 160f. In Wikisource erfasst.

auch folgenden Spaß: Der Näberle wurde einmal gestohlen und mit seinem Bohrer unter einen Baum gesetzt in der Nähe von Gmünd. Von einem Jäger für gefährlich gehalten, wiederholt angerufen, bekam der Näberle, als er keine Antwort gab, einen Schuß in den Nacken. Bald wurde er wieder auf den Salvator hinaufgeschafft und seine Wunde vernagelt, was man jetzt noch sieht.

Georg Stütz belegt in seinem Heimatbuch von 1924 eine sprichwörtliche Anspielung auf diese Figur: "Hat jemand Ueberfluß an Schönheitsmängeln, so wird er von den Gmündern gern mit dem Salvatornäberle in Beziehung gebracht". Eine gängige Redensart bezog sich auch auf die „Salvatorbrille“, wie man scherzhaft ovale Höhlungen im Felsen unterhalb der drei Kreuze bezeichnete. Wer etwas nicht sehen will, hieß es, "dem muß man die Salvatorbrille aufsetzen"⁵⁶.

Nur außerhalb Gmünds ist eine weitere Salvator-„Sage“ erhalten geblieben und zwar im Nachlass des Stuttgarter Gymnasialprofessors Albert Schott des Jüngeren (1809-1847). Ein Schüler Übelen der IX. Klasse schrieb 1847 für ihn die Erzählung "Das Salvatorbrunnlein bei Gmünd" auf⁵⁷:

Auf dem Salvatorberge, einem sehr besuchten Wallfahrtsorte bei Gmünd, bricht aus einem Felsen hervor eine klare Quelle mit sehr frischem Wasser, welches noch jetzt von allen Leuten aus der Umgegend, die darhin wallfahrten, viel getrunken wird. Doch soll der Brunnen früher weit gesünder gewesen sein, ja wunderthätig auf die Trinkenden gewirkt haben. Die Ursache, warum es jetzt nicht mehr so ist, erzählt die Sage wie folgt: Ein reicher Kaufmann hatte einst von der Quelle, die, wie so viele andere, von einer Nixe bewohnt ist, gehört, u. da er selbst sehr an den Füßen litt, beschloß er, sein Heil mit dem Brunnen zu versuchen. Er kam zu dem Zwecke weither, trank das Wasser und badete darin, aber lange ohne Erfolg. Endlich kam der Kaufmann auf den Gedanken, sich mit Geld bei der Nixe die Gesundheit zu erkaufen. Er bot ihr also durch einen Brief, den er in eine Kapsel verschlossen in

den Brunnen warf, eine bedeutende Summe an. Wie er nun wieder an den Brunnen kam übergab ihm ein Bettler einen Brief, den ihm, wie er sagte, eine vornehme Dame gegeben hatte. Die Nixe erbot sich darin, das Übel sogleich zu heben, sobald der Kranke das versprochene Geld dem nahen Kloster Lorch übermachen wolle. Der Kaufmann ließ das Versprechen der Nixe auf demselben Weg zukommen, wie seinen ersten Brief, und siehe da, sogleich war er heil. Aber der Herr war ebenso geitzig, als reich; er dachte also nicht mehr an die Erfüllung seines Versprechens; öfters wurde er noch von der Nixe gewarnt, er achtete nicht darauf. Da, ehe er die Gegend verließ, badete er nocheinmal in der Quelle u. sogleich hatte er sein Übel wieder an sich. Er fieng jetzt zwar die Kur noch einmal an, machte der Nixe noch einmal seine früheren Anerbietungen; aber da sie ihn jetzt hatte kennen lernen, erhielt er keine Antwort und sein Übel blieb ihm. Seither hat das Wasser vom Salvatorbrunnlein überhaupt seine Wunderkraft verloren.

Ob die ganze "Sage" Übelens Werk ist oder nur einzelne Züge auf sein Konto gehen, lässt sich heute nicht mehr feststellen. Im 19. Jahrhundert sind die Grenzen zwischen "echten" und "unechten" Sagen, "volkstümlichen" und "literarischen" Gestaltungen ohnehin fließend. Wenn Sagensammler bei ihrer Auswahl dem Leitbild vermeintlich echter Volkspoesie verpflichtet waren, so bedeutet dies, daß vergleichsweise unpoetische Versionen wie die Geschichte vom Salvatorbrunnlein kaum eine Chance hatten, aufgezeichnet und gedruckt zu werden. Es ist nicht auszuschließen, daß Übelen eine mündliche Überlieferung aufgezeichnet oder ausgestaltet hat - selbst wenn die Geschichte am Gmünder Honoratioren-Stammtisch entstanden sein sollte, um dem wissbegierigen Knaben einen Bären aufzubinden.

5 Schlussbemerkung

Die wissenschaftliche Erforschung des St. Salvator wird weitergehen; es gibt aus meiner Sicht noch genug zu tun, denn das Quellenmaterial ist bislang keineswegs erschöpfend bearbeitet worden. Beispielsweise würde es sich lohnen, sich gründlicher mit der - schon wiederholt besprochenen - Salvator-Schrift des Dr. Friz zu befassen.

Nicht auszurotten sind falsche oder schiefe Darstellungen der heimatgeschichtlichen Literatur und künftig zunehmend im Internet: dubiose Geschichten statt verlässlicher Geschichte. Ein Beispiel gefäl-

⁵⁶Georg Stütz: Heimatbuch für Gmünd und weitere Umgebung. 2. Aufl. 2 (1924), S. 34.

⁵⁷Württembergische Landesbibliothek Stuttgart Cod. poet. et phil. qt. 134 Bd. I, Bl. 209-210v. Digitalisat: <http://digital.wlb-stuttgart.de/purl/bsz383599229/page/425>. Mehr zu Schotts Sagensammlung in meiner Publikation von 1995. Zu Sagen-Erfindungen von Schülern und Seminaristen vgl. auch Klaus Graf: Sagen der Schwäbischen Alb (2008), S. 14f. Zu Gmünder Sagen vgl. zuletzt mein Nachwort zu Georg Stütz: Sagen der Heimat (2011), S. 87-94.

lig? Unter dem Titel "Uralter Ort der Mystik und des christlichen Glaubens — St. Salvator" findet sich ein Artikel der Rems-Zeitung vom 20. Februar 2010⁵⁸. Es heißt dort:

Magisch zog der St. Salvator mit seinen Felsenkapellen und Höhlen schon immer Forscher und viele Deuter an. Doch bis heute ist es nicht gelungen, die Ursprünge dieser weit und breit einmaligen christlichen Stätte genau zu datieren und zu ergründen. Doch es gibt hochinteressante Hinweise, dass es sich um eine der ältesten Christenstätten im Land handelt, vielleicht sogar hervorgegangen aus der Römerzeit.

Aus der Versenkung gezogen wird eine nie von der seriösen Forschung ernstgenommene abwegige Theorie:

Archäologie- Professor und Dichter Ernst Edler v. d. Planitz hielt sich zu Beginn des vorigen Jahrhunderts längere Zeit am Salvator in Schwäbisch Gmünd auf und vermutete sogar, dass an diesem Wallfahrtsort möglicherweise sogar die älteste christliche Kultstätte auf deutschem Boden zu erblicken sei. Schon er bezog sich auf eine Vermutung, die Archäologen bis heute umtreibt und im Forscherdrang anspornt: Die künstlich angelegten Höhlensysteme am Salvator erinnern an typische Kultstätten, an denen schon vor fast 2000 Jahren die römischen Soldaten und später auch viele Siedler den Sonnengott Mithras verehrt haben. Gleich in der Nähe verlief ja auch der Limes. Und nur einen Spaziergang vom vermuteten Mithras- Stollen entfernt befanden sich die drei Kastelle und zwei große Siedlungen von „Römisch Gmünd“.

Planitz war übrigens kein Archäologie-Professor, sondern Schriftsteller und Journalist. Er ist insbesondere durch eine Leben-Jesu-Fälschung, den Benan-Brief, hervorgetreten.

Auch wenn die klassische "Volkssage" als ausgestorben gilt⁵⁹ - der Salvator wird auch weiter ein Erzähl-Mal bleiben, im Stadtgespräch präsent, von Geschichten umgeben wie eh und je⁶⁰. Der Historiker kann diesen Diskurs nicht steuern, nur beobachten.

Autor

- Graf, Klaus
Deutsche Str. 8
41464 Neuss
klausgraf@googlemail.com

Historiker, geboren 1958 in Schwäbisch Gmünd. Promotion in Tübingen 1987, derzeit Geschäftsführer des Hochschularchivs der RWTH Aachen.

⁵⁸<http://remszeitung.de/2010/2/20/Uralter-Ort-der-Mystik-und-des-christlichen-Glaubens--St-Salvator/>.

⁵⁹Zu traditionellen Sagen im Internet vgl. aber Klaus Graf: Urschel, Nachtfraulein und andere Gespenster. Überlieferungen und Sagen in Reutlingen und Pfullingen. In: Reutlinger Geschichtsblätter NF 50 (2011), S. 209-250, hier S. 243-250. Online: <http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/8758/>.

⁶⁰Daher ist es auch kein Wunder, dass der Salvator ("Eberstein") in Timo Baders historischem Gmünd-Roman "Im Bann der Staufer" (2012), S. 367 vorkommt.

Hydrogeologische Situation der Felsenkapellen

Bohrungen, geologische Einordnung und Pegelmessungen

Dieter Frey, Jürgen Frick

Abstract: Durch zwei Bohrungen im Hang oberhalb der Felsenkirche wird die geologische Situation der beiden Kapellen erschlossen. Die Schichten lassen sich dem Unteren Stubensandstein km4 zuordnen. Eine Bohrung wird zu einem Pegel ausgebaut, der die Sickerströme über die Projektlaufzeit erfasst. Maxima des Pegels korrelieren mit feuchten Flecken in der Unteren Kapelle und mit hohen Materialfeuchten in der oberen Kapelle im Jahr 2013. Messungen der Impedanz in der Beichtstuhlnische der Oberen Kapelle zeigen allerdings keine signifikante Korrelation.

Keywords: Geologie Kapellen, Hydrogeologische Situation, Pegelmessungen, Impedanzmessungen

1 Einleitung

Im weiteren Umfeld von St. Salvator befinden sich mehrere historische Brunnenfassungen. D.h. es bestand die Möglichkeit, dass mehrere Wasser führende Schichten vorhanden sind. Zur Klärung der geologischen und hydrogeologischen Situation wurden deshalb zwei Bohrungen oberhalb der Felsenkapellen im April 2011 niedergebracht. Ziel war die Erkundung des geologischen Aufbaus im Bereich der beiden Kapellen und die Erfassung von Grundwasserleitern im anstehenden Fels.

2 Bohrprofile

Bild 1 zeigt das Bohrgerät bei der Vorbereitung an Bohrstelle 2 und Bild 2 die Lage der beiden Bohrungen im Vergleich zur Kirche mit den beiden Kapellen.

Bei Bohrung B 1 (Ansatzhöhe: 369,45 mNN, Bohrdurchmesser 146 mm) wurde bis 10,60 m unter Ansatz eine Wechselfolge von Ton, Sand, Feinsandsteinen und Tonmergeln angetroffen. Die Bohrendtiefe war bei 18 m unter Ansatz. Hinweise auf eine permanente beziehungsweise periodische Grundwasserführung wurden nicht festgestellt. Darüber

hinaus war das Bohrloch nach Ausbau des Bohrgestänges und Abpumpen des Spülwassers trocken. Die Bohrung wurde nach Erreichen der Bohrendtiefe von 18 m unter Ansatz (= 351,45 mNN) wieder mit Zement-Bentonit verschlossen, da kein stauender Horizont erkennbar war.



Bild 1: Bohrgerät bei der Vorbereitung von Bohrung 2.

Die Bohrung B 2 (Ansatzhöhe: 368,00 mNN, Bohrdurchmesser 146 mm) durchteufte bis 8,35 m unter Ansatz eine Wechselfolge von Fein- und Grobsanden mit eingelagerten Tonen- und Schluffen. Die Bohrendtiefe war bei 18 m unter Ansatz, wobei eine Tonschicht bei 17,90 m den Abschluss bildete. Auch in Bohrung B 2 waren keine Hinweise auf eine per-

manente beziehungsweise periodische Grundwasserführung zu erkennen. Bild 3 zeigt Ausschnitte der entnommenen Bohrkern in der für die Kapellen relevanten Tiefenlage.

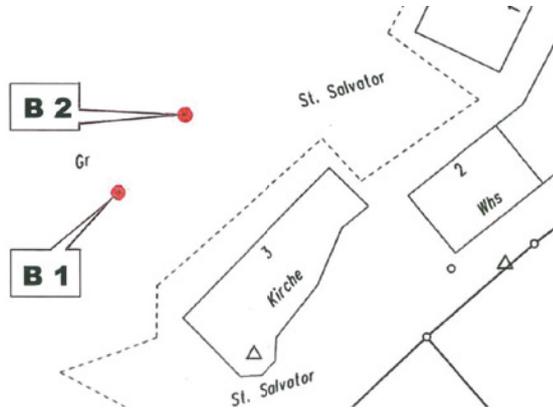


Bild 2: Lage der zwei Bohrungen im Vergleich zur Kirche mit den beiden Kapellen.



Bild 3: Ausschnitte der entnommenen Bohrkern im Tiefenbereich 12 m bis 18 m. Links: Bohrung 1. Rechts Bohrung 2.

Um trotzdem über einen längeren Zeitraum mögliche Grundwasserzutritte erfassen zu können, wurde die Bohrung B 2 zur Grundwassermessstelle GWM B 2 ausgebaut. Hierzu wurde die Bohrung von 146 mm auf 220 mm aufgebohrt. Von 18,00 m unter Ansatz bis 11,00 m unter Ansatz wurden 5“-Filterrohre eingebaut. Die Hinterfüllung der Filterrohre besteht aus 2/5 mm Filterkies.

In der Grundwassermessstelle vorhandenes Spülwasser wurde am 26.04.2011 und nochmals am 11.05.2011 abgepumpt und die Messstelle entleert. Erneute signifikante Grundwasserzutritte wurden dabei nicht festgestellt. Die Messstelle ist damit trocken. Zur Erfassung möglicher Grundwasserzutritte über dem stauenden Tonhorizont wurde im September 2011 ein Datenlogger eingebaut, der

seitdem permanent die Druckhöhe des Grundwassers aufzeichnet.

3 Geologische Einordnung

Die beiden oberhalb der Felsenkapelle niedergebrachten Bohrungen erschließen die Schichtenfolge des Unteren Stubensandsteins km4. Signifikant sind die erschlossenen Grobsandsteinlagen in den basalen Abschnitten der Bohrungen. Eine Übersicht über die Stratigraphie des Mittleren Keupers zeigt Bild 4.

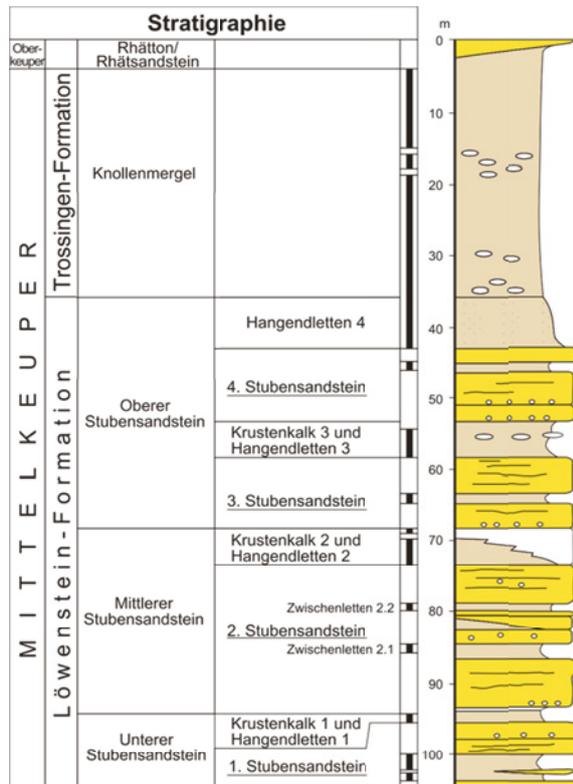


Bild 4: Übersicht über die Stratigraphie des Mittleren Keupers [Quelle: Werner 2014, S. 550]. Der Untere Stubensandstein umfasst die unterste Schicht.

In den Bohrprofilen sind die Bereiche, in denen die beiden Kapellen heraus gearbeitet wurden, deutlich zu erkennen (Bild 3). In Bild 5 ist die Lage der Bohrungen in Bezug zur Kirche mit den beiden Kapellen im Querschnitt dargestellt. Die beiden Bohrprofile und der Aufbau der Grundwassermessstelle sind in Bild 6 und 7 detailliert aufgetragen.

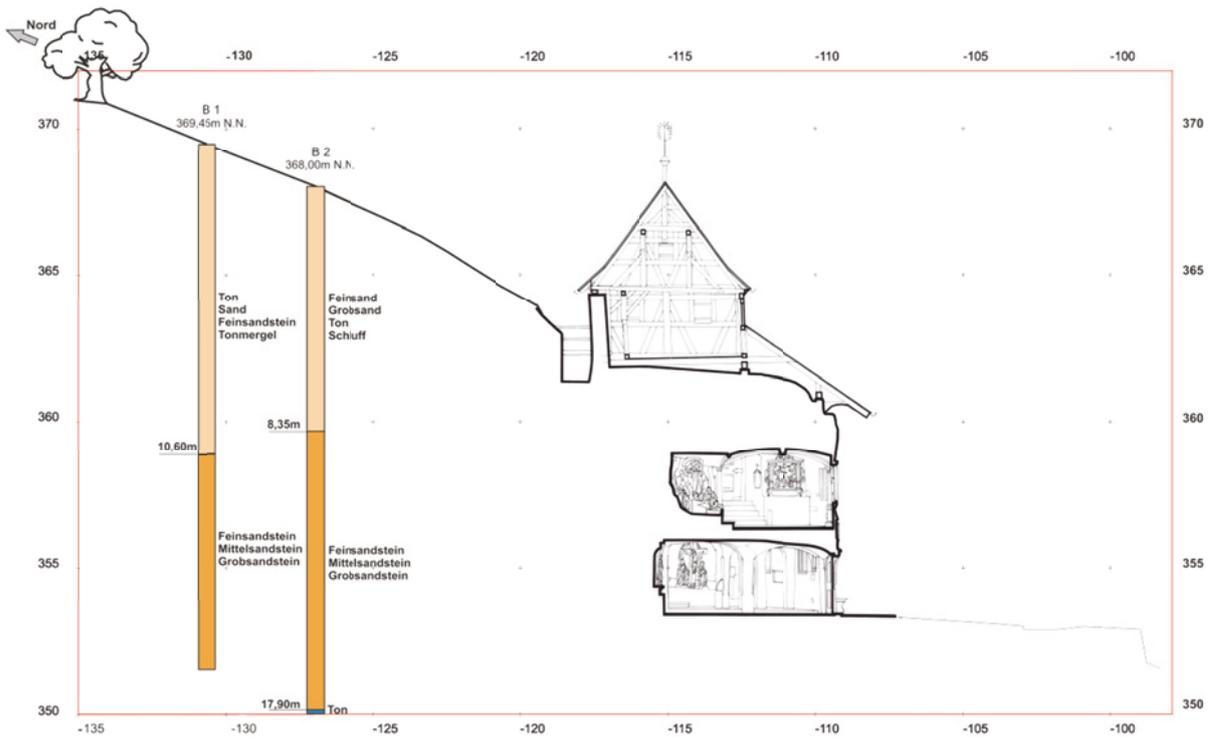


Bild 5: Lage der Bohrungen B1 und B2 in Bezug auf die Kirche mit den Kapellen im Querschnitt [Quelle Schnitt Kapellen: Landesamt für Denkmalpflege im RP Stuttgart, 2009].

Ein Teil der Bohrkernproben aus der Bohrung B 2 wurde für die weiteren Untersuchungen aufgeteilt. Zusätzlich wurden vom Regierungspräsidium Stuttgart Bohrkernproben aus den gleichen Höhenlagen von Erkundungsbohrungen für den Umfahrungstunnel Schwäbisch Gmünd zur Verfügung gestellt. Mit diesem Material konnten die Versuche zur Entwicklung des Festigungsmittels, sowie die mikrobiellen und materialtechnischen Untersuchungen durchgeführt werden.

4 Grundwasserpegel

Nach jetzigem Kenntnissstand existiert auf der Hangseite der Felsenkapelle kein zusammenhängender Grundwasserleiter. Es findet somit kein Grundwasser Abstrom vom Hang in Richtung der beiden Kapellen statt. Trotzdem verändert sich der Pegel in der ausgebauten Messstelle im Verlauf der Jahreszeiten.

Bild 6 zeigt die Veränderung der Druckhöhe des Pegels im Zeitraum 16.11.2011 bis 25.03.2015. Zum Vergleich sind Regen- (24 h Mittel) und Schneefälle von zwei benachbarten Stationen mit eingezeichnet. Die jahreszeitlichen Schwankungen sind gut zu erkennen. Anstiege korrelieren mit Regenfällen auf

einer Schneeunterlage im Winter oder mit langen Perioden von Regenfällen (siehe Maximum des Pegelstands im Mai 2013). Generell sinkt der Pegel mit zunehmender Vegetation im Frühjahr und Sommer. Die Minima liegen jeweils im Herbst am Ende der Vegetationsperiode. Eine Ausnahme war das Frühjahr 2013. Bewuchs und Boden konnten durch das kühle Klima die Regenmenge Ende Mai 2013 nicht mehr aufnehmen, so dass am 2. Juni um 13:04 Uhr der Höchststand mit 352,57 cm erreicht wurde. Dies liegt etwa 80 cm unter dem Bodenniveau der unteren Kapelle (Bild 5 und [Strobel, 2003, S. 119].

Die Porengrößenverteilung des Stubensandsteins der Kapellen hat ihr Maximum im Bereich 20 bis 40 μm [Zöldföldi 2015]. Hinzu kommt noch der Feinporenanteil. Mit dem einfachen Modell für eine offene Glaskapillare ergibt sich eine Steighöhe von 35 bis 70 cm für diesen Porenradienbereich [Wikipedia 2015], mit dem Maximum bei feinen Poren. D.h. kapillar aufsteigendes Wasser kann die Kapellen durchaus erreichen.

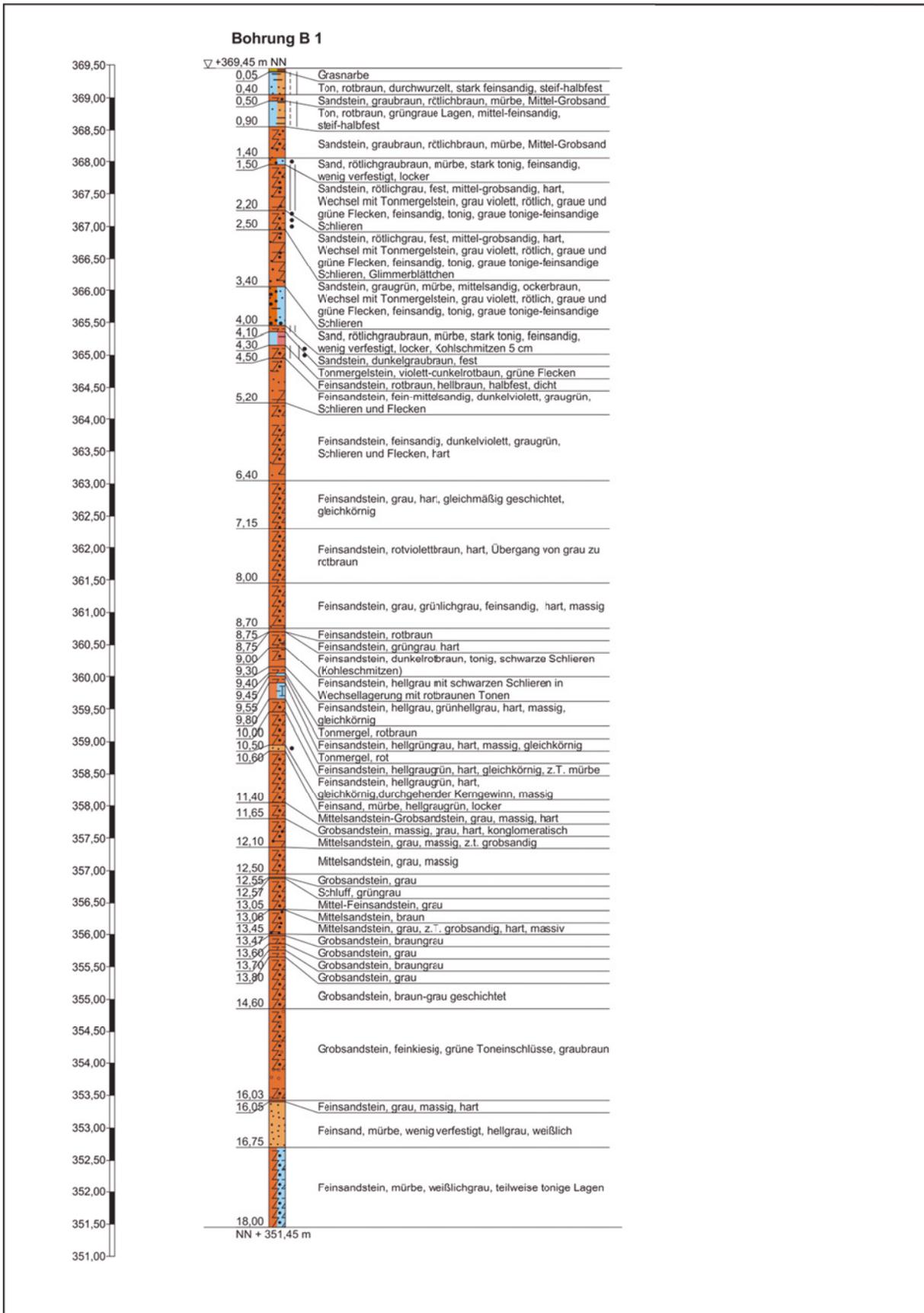


Bild 6: Detaillierte Beschreibung der Bohrung B 1.

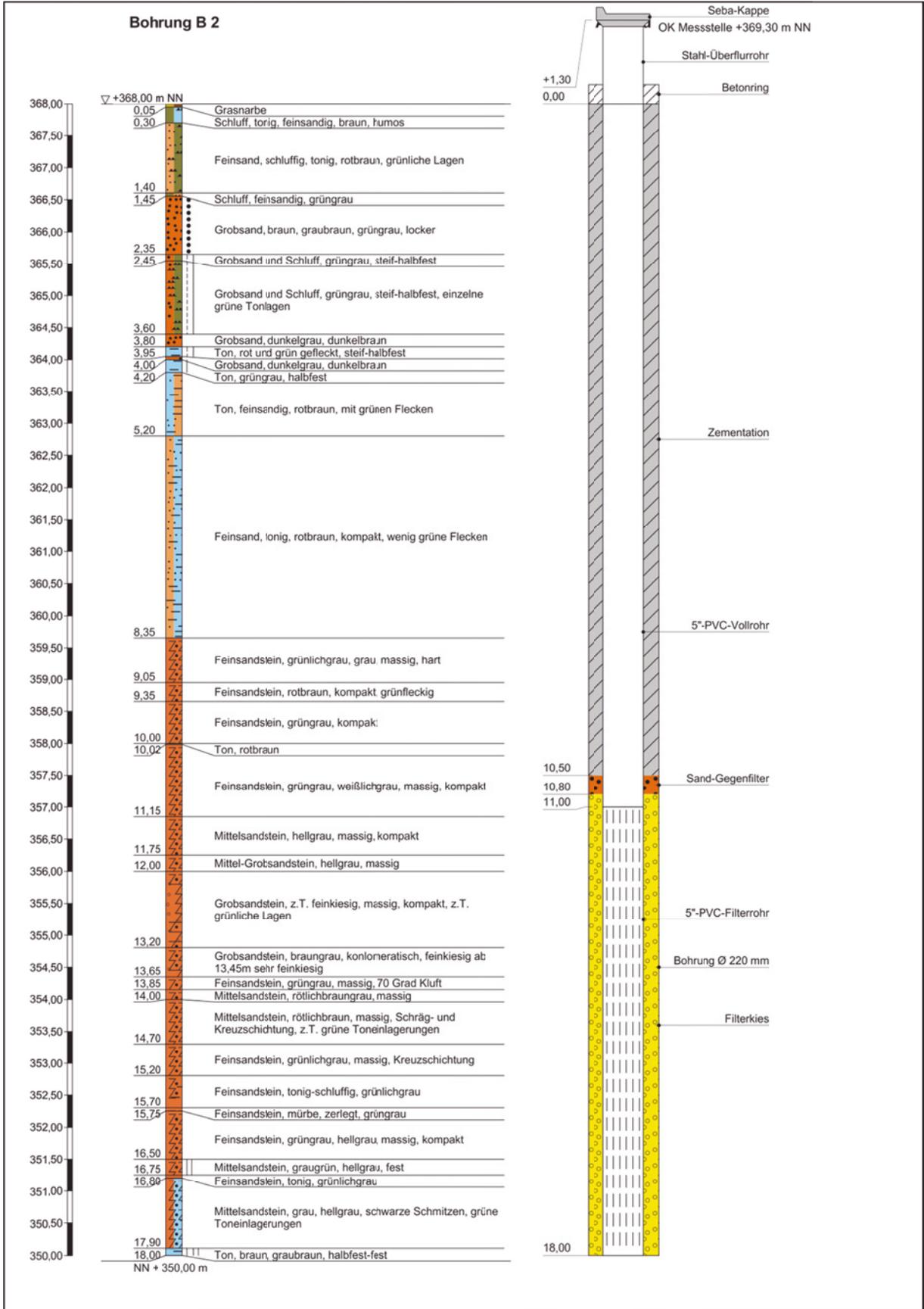


Bild 7: Detaillierte Beschreibung der Bohrung B 2 und der ausgebauten Pegelmessstelle.

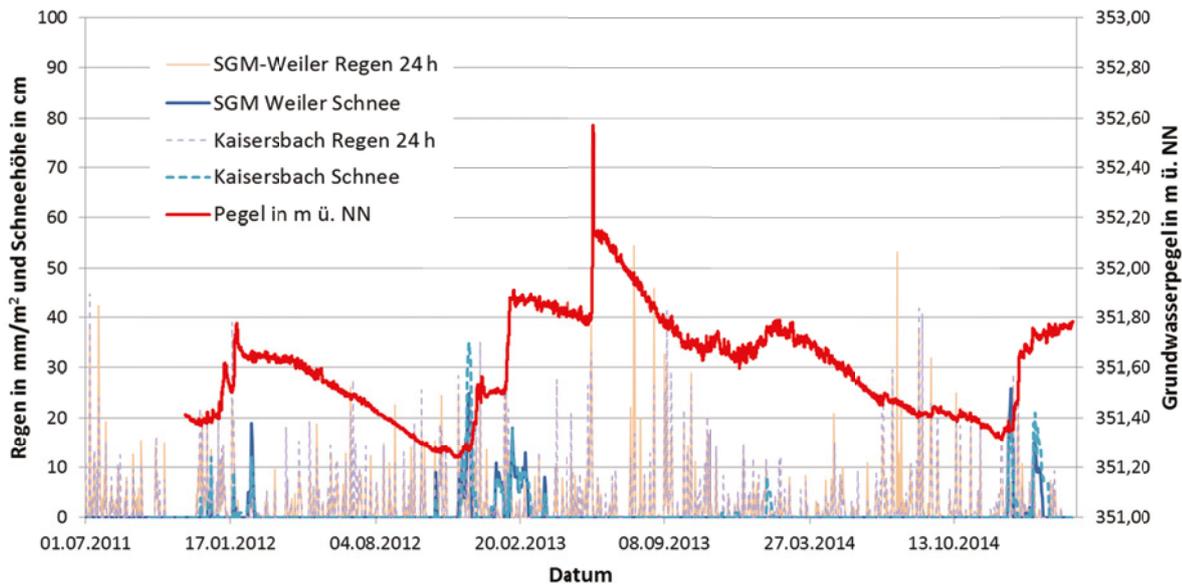


Bild 8: Druckhöhe des Pegels im Vergleich mit Regen- (24 h Mittel) und Schneefällen von zwei benachbarten Klimamessstationen (Schwäbisch Gmünd-Weiler und Kaisersbach-Cronhütte [DWD: WebWerdis, 2015]).

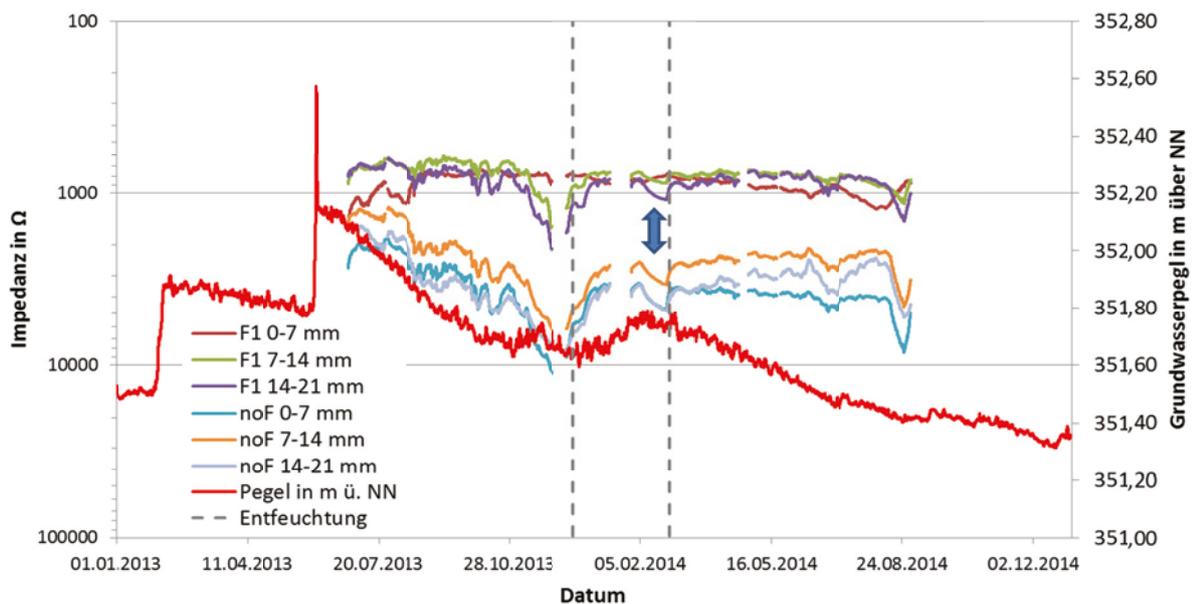


Bild 9: Druckhöhe des Pegels für 2013 und 2014 im Vergleich mit Impedanzmessungen in den Musterflächen (F1 - gefestigt, noF - nicht gefestigt). Die Impedanzmessungen (1 kHz) sind temperaturkompensiert und umgekehrt aufgetragen, so dass höhere Feuchten nach oben ansteigen (geringere Impedanz). Die senkrechten Linien zeigen den Zeitraum des Entfeuchtungsversuchs Ende 2013/ Anfang 2014. Der blaue Pfeil bezeichnet die erfolgreichste Phase dieses Versuchs.

Hinzu kommt der Eintrag durch Sickerströme bei Regenereignissen, die die Aufnahmefähigkeit von Bewuchs und Boden übersteigen. Im Juni 2013 stand einige Zeit Wasser an einzelnen Stellen der unteren Kapelle. Bei Untersuchungen am 26. Juni 2013 wurden immer noch Wasserpfützen in der unteren Kapelle vorgefunden, bzw. Wassertropfen

auf der Felsenoberfläche wahrgenommen. Dies korreliert mit den sehr hohen Materialfeuchten von bis zu 80% im Juni 2013 in den Musterflächen, die bis September 2013 hoch blieben (60 bis 70%), während sie davor im Mai 2012 kaum höher als 50% lagen [Zöldföldi 2015].

5 Vergleich mit Feuchtemessungen

In zwei Musterflächen der Beichtstuhlnische wurden in drei verschiedenen Tiefen (0 bis 7 mm, 7 bis 14 mm, 14 bis 21 mm) Impedanzsensoren eingebaut. Diese messen frequenzabhängig die Impedanz zwischen zwei Elektroden im Abstand von etwa 2 cm. Die Messwerte sind temperaturabhängig. Dies kann über eine Kompensation entkoppelt werden [Lehmann 2013].

Interessant ist die Periode des Entfeuchtungsversuchs Ende 2013/ Anfang 2014 (Bild 9). Die erfolgreichste Phase mit einer erkennbaren Trocknung zeichnet sich in den Impedanzmessungen ab (blauer Pfeil in Bild 9). Da dieser Versuch auf die Beichtstuhlnische beschränkt war, ist der Pegel davon nicht beeinflusst.

Bild 9 zeigt die Druckhöhe des Pegels für 2013 und 2014 im Vergleich mit den kompensierten Impedanzmessungen in den Musterflächen. Während die Impedanz Messwerte in der nicht gefestigten Musterfläche (noF) im Frühsommer und Herbst 2013 sich analog zum Pegel verhalten, bleiben die Werte für die gefestigte Fläche (F1), bis auf begrenzte Ereignisse, eher konstant. Im weiteren Verlauf des Jahres 2013 und auch 2014 ist keine Parallelität zum Pegel erkennbar.

Die Impedanzmessungen erfolgten in der Oberen Kapelle etwa 15 m vom Pegel entfernt. Hinzu kommt der unbekannte Schichtverlauf bis zur Kapelle. Deshalb ist es nicht verwunderlich, wenn keine Korrelation mit den Pegelmessungen vorhanden ist. Trotzdem ist der Einfluss des Pegelstands über die feuchten Stellen in der Unteren Kapelle erkennbar. Die Druckhöhe des Pegels insofern ein indirektes Maß, da er zwar die Menge der Sickerströme über die Jahreszeiten anzeigt, aber die Materialfeuchte in den Kapellen, die auch von der Klimasituation abhängen, nur bedingt widerspiegelt.

Danksagung

Wir danken Herrn Frank Lehmann für die Temperaturkompensation der Impedanz Daten.

6 Literaturreferenzen

- [Lehmann 2013] Lehmann, Frank; Martínez Garrido, Maria I.; Krüger, Markus.: On the advance of impedance measurements for monitoring moisture in sandstone, in: A. Troi, E. Lucchi (ed.), Cultural Heritage Preservation, 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation 2013, Bozen. Felix Verlag editrice, pp. 259-264.
- [Strobel, 2003] Strobel, Richard: Die Kunstdenkmäler der Stadt Schwäbisch Gmünd IV, Deutscher Kunstverlag 2003
- [Werner 2014] Werner, Wolfgang; Kimmig, Birgit; Wittenbrink, Jens; Bock, Helmut: Naturwerksteine aus Baden-Württemberg, Regierungspräsidium Freiburg - Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, 2014, ISBN 978-3-00-041100-7
- [Zöldföldi 2015] Zöldföldi, Judit et al.: St. Salvator - Materialtechnische Analysen am Stubbensandstein der Ölberggruppe, in: J. Frick, J. Zöldföldi (Hrsg.) „Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd. Fraunhofer IRB Verlag, 2015, S. 93-103

Autoren

Frey, Dieter
Geotechnik Südwest
Im Weilerlen 10, 74321 Bietigheim
www.geo-sw.de
Tel: 07142.9023-13
Email: d.frey@geo-sw.de

Frick, Jürgen
Materialprüfungsanstalt
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart
www.mpa.uni-stuttgart.de
Tel.: +49-711-685-63381, Email:
Juergen.Frick@mpa.uni-stuttgart.de

Erdgeschichtliche Betrachtungen bei einem Gang über die Wallfahrtsstätte Salvator in Schwäbisch Gmünd

Ein Exkurs über die verwendeten Gesteinsarten

Werner K. Mayer

Abstract: Die Wallfahrtsstätte Salvator in Schwäbisch Gmünd liegt am Nepperberg, einem nördlichen Talhang der Rems. Nur wenige Gehminuten vom Zentrum entfernt ist sie ein beliebtes Pilger- und Ausflugsziel. Seine ursprüngliche Entstehung ist nicht datierbar. Ab dem Jahre 1617 erfolgte durch den Steinmetzmeister Caspar Vogt eine „Reparation“. Bedingt durch Erweiterungen, Veränderungen und Erneuerungen im Verlauf von nahezu vier Jahrhunderten wurden insgesamt 25 Gesteinsorten verwendet. Im nachfolgenden Aufsatz werden sie bei einem Gang über den Wallfahrtsberg nach Herkunft und Eigenschaften gegliedert und beschrieben.

Keywords: Keuper, Stubensandstein, Höhlensandstein, Löwenstein-Formation, Unterjura

1 Einleitung

Der Salvator rückte während der Landesgartenschau 2014 für viele Besucher aus dem ganzen Land und auch weit darüber hinaus in besonderem Maße in den Blickpunkt der Öffentlichkeit. Eingebettet in eine zauberhafte Landschaft, die sich zu allen Jahreszeiten eindrücklich erschließt, findet der Besucher oder Spaziergänger meist Ruhe vor dem Lärm der nahen Stadt vor. (Bild 1) Für Katholiken aus Schwäbisch Gmünd und der Umgebung war es von jeher obligatorisch, während der Passionszeit im zeitigen Frühjahr den Kreuzweg im Gebet oder meditativer Haltung hoch zu gehen, um bei den vierzehn Leidensstationen zu verharren. Gmünder Bürger jeglicher Glaubensrichtung fanden über den Stationenweg ihren Spaziergang ins nahe Taubental. Viele Besucher erfreuten sich an der Landschaft, hielten am Plateau der Felsenkapelle inne und hatten einen schönen Blick auf die erneuerte Stadt und die nahen Berge der östlichen Schwäbischen Alb. Die alte Wallfahrtsstätte St. Salvator wird aus den verschiedensten Motiven heraus besucht. Primär ist das Interesse der Gläubigen, sich über den Kreuzweg in die Passion Christi einzufühlen. Doch findet

man „in der Unteren Felsenkapelle in dichter Nachbarschaft eine spannungsvolle Gegenüberstellung von zwei Ansichten des Salvators: Auf der einen Seite die Gestalt des leidenden und gekreuzigten Salvators und auf der anderen Seite die Gestalt des erhöhten und verherrlichten Christus: Der Salvator crucifixus steht dem Salvator Mundi und dem Pantokrator gegenüber.“¹ (Bild 2)

Mit der Aushöhlung eines Felsens begann es. Was sich dort oben im Verlauf von Jahrhunderten ereignete, wissen wir nicht.



Bild 1: Salvator mit Felsenkapelle u. Klausur

¹ Kasper, Hildegard (2010): S. 108

Ob die Höhlungen schon frühgeschichtlich genutzt wurden, oder ob die Römer unmittelbar an der Grenze zu Obergermanien dort bereits ihren Göttern huldigten, ist nicht bekannt. (Bild 3)

Erstmals hören wir von dem Ulmer Dominikanermönch Felix Fabri 1483 eine diesbezügliche Äußerung. Beim Anblick von Kapellennischen eines doppelgeschossigen Felsengrabes in Jerusalem erinnerte er sich an ein ganz ähnliches, nur kleineres, den Eberstein bei Gmünd in Schwaben. 1585 erwähnt der Chronist David Wolleber aus Schorndorf, dass es in Gmünd einen alten Burgstall gibt, „darinnen zwen schöne altar uffgericht.“²

Historisch nachprüfbar ist, dass durch ein Testament aus dem Jahre 1617 200 Gulden für die „Reparation“ am Salvator gestiftet wurden. Daraufhin konnte der Steinmetzmeister Caspar Vogt die vorhandenen Höhlungen eines Felskomplexes zu einer zweigeschossigen Felskapelle ausbauen. (Bild 4). Bereits 1618 wurde die untere Kapelle geweiht. Die Obere Kapelle folgte im Jahr 1623. Im Verlauf der nächsten Jahrzehnte bzw. Jahrhunderte entstand dieses einzigartige Kleinod, welches zahlreiche Gläubige anzog und im vergangenen Jahr im Blickpunkt der Landesgartenschau von Zehntausenden von Besuchern besucht wurde.

2 Eine Betrachtung nach erdgeschichtlichen Gesichtspunkten

Es lohnt sich, die alte Wallfahrtsstätte, so wie sie sich in den vergangenen nahezu 400 Jahren entwickelt hat, nach dem Boden, auf dem sie steht und damit auch einmal nach erdgeschichtlichen Gesichtspunkten zu betrachten. Ich lade sie daher zu einem Spaziergang mit einem Blick auf die erdgeschichtliche Vergangenheit und die an der Wallfahrtsstätte verwendeten Gesteine ein. Dabei sollen auch deren Herkunft und die Gesteins-Lagerstätten beschrieben werden. Wir lassen uns davon einstimmen, dass der nördliche Talhang der Rems von den Schichten des Mittleren Keupers gebildet ist. Genau gesagt ist es der anstehende Stubensandstein und der Knollenmergel, der dem steilen Hang sein prominentes Gepräge gibt.



Bild 2: Die beiden Altäre in der Unteren Felskapelle



Bild 3: Der Limes im nahen Rotenbachtal



Bild 4: Bildertafel von Christoph Friedel aus dem Jahr 1622

² Spranger, Peter (2006), S. 2

2.1 Die geologische Situation

Die Landschaft auf der Talsohle der Rems, den Talhängen und ihren Seitentälern um Schwäbisch Gmünd wird von den Gesteinen des Mittleren Keupers geprägt. Hier sind die verschiedenen Schichten des Mittleren und Oberen Stubensandsteins aufgeschlossen. Der Auszug aus der Geologischen Karte 7124 Schwäbisch Gmünd im Maßstab 1:25000 grenzt das untersuchte Gebiet ein. Der Salvator befindet sich darin im unteren linken Bereich. Der Stubensandstein ist in der Karte gelb markiert, das Knollenmergelband des Keupers ist rot eingezeichnet. Im oberen Teil der Karte erkennt man den Übergang zu den unteren Unterjuraschichten. (Bild 5)



Bild 5: Auszug aus der Geologischen Karte 7124 Schwäbisch Gmünd-Nord [Quelle: LGRB]

2.2 Der Keuper – vorwiegend Süßwasserablagerungen

Der Keuper stellt im Bereich des Südwestdeutschen Schichtstufenlandes eine besonders abwechslungsreiche, bunte Folge von Sedimentgesteinen dar. Sie besteht vor allem aus Sandsteinen, Mergel- und Tonsteinen. Sie wurden im Zeitraum zwischen 230 und 200 Millionen Jahren vor heute durch Wind und Wasser in einer riesigen Beckenlandschaft abgelagert. Süddeutschland war damals ein Teil dieses „Germanischen Beckens“, das jedoch größtenteils nicht mehr vom Meer überdeckt war. Zur Keuperzeit gehörte Europa zum alten Pangäa-Kontinent und befand sich auf ca. 15 Grad nördlicher Breite. Es herrschte ein tropisches bis subtropisches Klima vor. Die abgelagerten Gesteine stellen festländische Abtragungsprodukte der Böhmisches Masse im Nordosten dieses Beckens sowie des Vindelizischen Landes im Osten dar. Letzteres war ein während der Triaszeit existierendes Hochland, welches das in

unserer Gegend gelegene Germanische Becken vom südlich gelegenen Tethysmeer trennte. Hebungen im Südosten und Osten verstärkten die Lieferungen weiterer Sedimente. Nach Bloos (1998) wurden die Böhmisches-Vindelizischen Sande „in gut unterscheidbaren Sedimentfächern nach Westen und Nordwesten geschüttet.“ Das seinerzeitige Klima darf man sich vorstellen, wie wir es von heutigen Wüsten und Halbwüsten kennen. Es war gekennzeichnet durch extreme Trockenperioden und unregelmäßig wiederkehrende Regenfälle. Bei schweren Regenfällen wurden große Gesteinsmengen aus den gehobenen Gebieten des Festlandes in oft breiten Schlammfluten in das Becken eingetragen. Flutrinne und Schwemmfächer wechselten sich ab. Bei stark erhöhter Wasser- und Sedimentführung breiteten sich Sandmassen, auch größere Tonbrocken enthaltend, durch das Übertreten der Flüsse über ihr Bett flächenhaft auf die Schwemmfächer aus. Nachfolgende Fluten lagerten die Sedimente oft um. Dadurch entstanden Schrägschichtungen und bei veränderten Lieferrichtungen auch Kreuzschichtungen.

2.3 Die Gliederung des Keupers

Da die Wallfahrtsstätte ausschließlich im Keuperbereich liegt, soll der Keuper-Gliederung die Auswertung einer Bohrung zugrunde gelegt werden. Anlässlich der Vorarbeiten zum Gmünder Einhorn-Tunnel wurde am nur 500 m östlich gelegenen Lindenfirst eine 130 m- Bohrung niedergeteuft. Deren Ergebnisse sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst. (Bild 6). Uns interessieren vor allem die daraus nutzbaren Gesteine, der Schilfsandstein und der Stubensandstein.

Der Schilfsandstein (km2) entstand in einer über ganz Deutschland breit ausgedehnten Überflutungsebene. Er bildete ein Schwemmland, das von flachen Flussrinnen mit sehr geringem Gefälle und entsprechend geringen Strömungsgeschwindigkeiten durchzogen war. Auf Grund der Küstennähe wurden die Rinnensysteme von Meereszeiten beeinflusst. Die Ablagerung fand also in einem flachen, ausgedehnten Delta statt, wodurch sich die große Einheitlichkeit der Feinsandsteine des Schilfsandsteins erklärt³.

³ Werner, Wolfgang (2013): Werksteinführende geologische Einheiten, S. 100

Während der Ablagerungszeit im Stubensandstein (km4) herrschten keine marinen, sondern fluviatile Bedingungen. Die Sandkörper wurden von Flüssen transportiert und in einem verflochtenen Flusssystem mit breiten, flachen Sandbänken abgelagert. Die Strömungsgeschwindigkeiten waren – nach den gleichen subtropischen Bedingungen stattfindenden – heftigen Regenfällen kurzzeitig sehr hoch. Das begründet, weshalb die Sortierungen der Sande wenig gut waren. Die Folge war ein oft rascher lateraler wie auch vertikaler Wechsel in Korngröße und Zusammensetzung.⁴

Keuper-Gliederung	Formation	Geologische Einheit und Bemerkungen	DV-Kürzel	Mächtigkeit im Raum Schw. Gmünd
Oberkeuper	Exter-Formation	Rhät, bei uns nicht vorhanden, tritt erst im Raum Nürtingen auf	ko	–
Mittelkeuper	Trossingen-Form.	Knochenmergel	km5	15 – 20 m
	Löwenstein-Form.	Stubensandstein 90 – 115 m	km4	
		Oberer Stubensandstein 40 – 50 m	km4o	
		4. Hangendletten	km4ot4	5 m
		Stubensandstein 4. Schüttung [Pyritsandstein]	km4os4	12 – 20 m
		3. Hangendletten [Mittelletten, Untere oder Falsche Knochenmergel]	km4ot3	2 – 8 m
		3. Stubensandstein [3. Schüttung] [Höhlsandstein]	km4os3	20 – 35 m
		Mittlerer Stubensandstein 25 – 40 m	km4m	
		2. Hangendletten	km4mt2	5 m
		2. Stubensandstein [2. Schüttung]	km4ms2	20 – 35 m
		Unterer Stubensandstein 20 – 35 m	km4u	
		1. Hangendletten	km4ut1	4 m
		1. Stubensandstein [1. Schüttung] [Hauptfleins]	km4us1	15 – 25 m
		Mainhardt-Form.	Obere Bunte Mergel	km3o

Bild 6: Die Schichtfolge im Keuper von Schwäbisch Gmünd

2.4 Das am Salvator anstehende Gestein – der Stubensandstein (die Löwenstein-Formation)

Mit ihr setzt am Salvator die als „Stubensandstein“ bezeichnete Schichtfolge ein. Sie entspricht in Franken dem „Burgsandstein“. Sie hat um Schwäbisch Gmünd eine Gesamtmächtigkeit von 90-115 m. Der Stubensandstein, der heute in der Germanischen Trias lithostratigraphisch als Löwenstein-Formation bezeichnet wird, gliedert sich wie folgt:

Der Untere Stubensandstein (km4u)

Über den Oberen Bunten Mergeln liegen Sandsteine: mittel- bis grobkörnig, teilweise karbonatisch gebunden. Sie sind bergfrisch hellgrau-weißlich. Sie werden als 1. Stubensandstein bezeichnet und weisen eine Mächtigkeit von 20-30 m auf. Darüber folgend die 1. Hangendletten: Tonsteine, teilweise feinsandig, rot-violett, mit grauen, oft knolligen Steinmergelbänkchen, weiß bis hellgraugrün. Sie werden im Untersuchungsgebiet mit 4 m Mächtigkeit angegeben. Unter dem Begriff Hangendletten versteht man Steinmergelbänke, oft im Wechsel mit sandigen Tonmergel- und Tonsteinhorizonten. Als Steinmergel werden sehr harte, meist schichtungslose, dichte, dolomitisch-kieselige Gesteine mit erhöhtem Tonanteil bezeichnet. Letten bedeuten ursprünglich Tone mit Beimengungen. Das können mergelige Bestandteile, aber auch fein- bis mittelkörnige Sande sein. Vielleicht drücken die Hangendletten bzw. Steinmergel den ursprünglich festen Materialzustand aus. Bei Wasserzutritt werden sie weich und neigen an Hängen und vor allem an Bacrissen zu Rutschungen. Darüber liegende feste Gesteinspartien gleiten ins Tal.

Der Mittlere Stubensandstein (km4m)

Die 2. Sandsteinschüttung wird dem Mittleren Stubensandstein zugerechnet. Er wird mit einer durchschnittlichen Mächtigkeit von 20-35 m gemessen und als mittel- bis grobkörnig bezeichnet. Das Bindemittel wird als kalkig angegeben. Darüber liegen die 2. Hangendletten. Es sind rot-violette Tonsteine mit einer Mächtigkeit von ca. 5 m. Neben der Bildung in Flutrinnen kommt bei den Hangendletten auch ein äolischer Transport, also durch Wind, in Frage. Man darf annehmen, dass es durch das damals herrschende ziemlich trockene Klima zu Windverlagerungen von Feinstmaterial und dessen Ablagerungen an den Luvseiten des Vindelizischen Gebirges kam. Am Gebirgsfuß abgelagert, könnte es bei stärkeren Regengüssen in Flüssen und Flutrinnen zusammen mit der jeweiligen Verwitterungsfracht durchmischte weiter transportiert worden sein. Als Schwebefracht könnte es sich bei nachlassender Transportenergie entmischen und sortiert in ruhigen Schwemmfächern abgelagert haben. So könnten die oft deutlichen Unterschiede in Körnung und Farbe übereinander und nebeneinander eine schlüssige Erklärung finden. Die weichen, sandigen Ton- und Tonmergellagen, Hangendletten genannt, sind meist nur in Bacrissen erkenntlich.

⁴ Werner, Wolfgang (2013): S. 100

Der Obere Stubensandstein (km4o)

Diese Schichtfolge besteht aus hellen fein- bis grobkörnigen Sandsteinen. Einzelne dünne Lagen sind als Konglomerat ausgebildet. Speziell diese beinhalten einen hohen Feldspat- und Tonanteil. Zwischen kompakten Sandsteinkörpern liegen immer wieder mehrere Zwischenlagen aus Schluffsteinen und sandigen Tonmergelsteinen (Hangendletten). Zu den verschiedenen Färbungen: rote bis violette Sedimente sind Hinweise für oxidierendes Milieu. Bei der Oxidation erfolgt eine chemische Reaktion einer Substanz, hier eisenhaltiges Gestein, mit Sauerstoff. Graue und grüngraue Sedimente hingegen weisen auf reduzierendes Milieu hin. Es tritt auf in Gewässersedimenten, in denen kein Sauerstoff für chemische oder biochemische Reaktionen zur Verfügung steht. Vor Ort lässt sich auf Grund der scheinbaren Homogenität oft nicht ermitteln, ob die Schichten horizontal oder schräg abgelagert wurden. Im Bohrprofil ist das anders. Hier ist am Bohrkern erkennbar, dass Schrägschichtung häufig vorkommt (Bild 7).

Bohrprofile stellen jeweils nur punktuelle Aufnahmen an einer bestimmten Lokalität dar. Sie sind nicht immer vergleichend übertragbar. Vor allem die Ablagerungen der Stubensandstein-Formation erfolgten in einem Nebeneinander von Flutrinnen und Schwemmfächern. Erschwerend kommen veränderte Strömungsbedingungen, Umlagerungen während der Sedimentation, mehrfach hintereinander stattfindende Aufschüttungsvorgänge und Veränderungen der Transportenergie hinzu. All dies führt zu erheblichen Fazieswechseln, bei denen die einzelnen Phasen durch mehr oder weniger horizontale Diskordanzen voneinander getrennt sind. Daher wird vielfach von Diagonalschichtungen gesprochen. Bei mehrfachem Wechsel der Schüttungsrichtung liegen die Sedimente oft „kreuz und quer“. Dies wird oft als Kreuzschichtung bezeichnet, auch wenn sie sich nicht wirklich „kreuzen“. Auch durch spätere Hebungsvorgänge bedingte Schichtneigungen spielen eine Rolle. Trotz dieser Einschränkungen werden Profile zum Vergleich herangezogen. Der Obere Stubensandstein, der im Blattgebiet Gmünd-Nord mit einer Mächtigkeit von ca. 40 bis 50 m angegeben wird, setzt sich aus zwei erkennbaren Sandsteinkomplexen und darüber liegenden Hangendletten zusammen. Letztere werden als feinsandige Tonsteine mit rot-violetter Farbe bezeichnet. Sie treten als 4. Hangendletten auf. Die vierte Schüttung im Stubensandstein wird auch

Pyritsandstein genannt. Er ist nicht immer in der Landschaft erkennbar, da er oft von den 4. Hangendletten überrutscht ist. Sie ist aber in den einschlägigen Bohrungen immer deutlich erkennbar. Nahe des Taubentalbaches wurden sie mit 388 m ü. NN gemessen. Oft ist der Übergang aus dem Waldgebiet zu Obstwiesen mit welligem Gelände und kleinen Kuppen, also die Nutzungsgrenze, ein geeignetes Indiz für den Übergang vom Stubensandstein zum darüber liegenden Knollenmergel.

Durch den Auflastdruck der darüber liegenden jüngeren Ablagerungen kam es im Laufe von Jahrtausenden zur Verfestigung des Sandes zu Sandsteinen. Durch Bindemittel erfolgte eine Verkittung, die man auch Zementation nennt.



Bild 7: Bohrkern - Schrägschichtung aus Lindenfirstbohrung [Quelle: RP Stuttgart, Bung]

3 Treffpunkt am Salvatorfuß

Nun wollen wir, indem wir am Salvatorfuß auf 320 m über NN beginnen, den Berg hochgehen. Anstelle eines bisherigen Asphaltbelages wurde im Rahmen der Landesgartenschau der Weg verbreitert und mit mittelgrauem Granitpflaster aus dem bayerischen Wald angelegt (Bild 8).



Bild 8: Savatorfuß, Eingang zum Kreuzweg

3.1 Der Weg verläuft im Stubensandstein

Der etwas holprige Weg ist mit historischen Pflastersteinen belegt. Sie stammen aus dem Unteren Stubensandstein und zwar aus der so genannten „Fleinschicht“. Sie stehen nicht unmittelbar in Schwäbisch Gmünd an. Unter dem Begriff „Fleins“ wird eine harte, kalkgebundene Gesteinsschicht verstanden. Das Pflastermaterial ist ein karbonatisch gebundener Sandstein. Da er erst ab der Gemarkungsgrenze auf ca. 300 m ü. NN im Bachbett der Rems vorkommt, muss er im Remstal westlich von Schwäbisch Gmünd vom Sachsenhof an abwärts gebrochen worden sein. Die Brüche, z.B. am Klotzenhof bei Lorch, sind längst aufgelassen (Bild 9). Allerdings ist die Schichtfolge des Unteren Stubensandsteins beim Bau des „Einhorn-Tunnels“ angeschnitten worden (Bild 10). Etwa auf Höhe zwischen der ersten und zweiten Wegkapelle wurde der Kreuzweg mit pflastersteinartigen Vorlagesteinen aus dem Arietenkalk repariert (Bild 11). Das grau-blaue Gestein ist durch die darin enthaltenen Muschellagen erkennbar.

Es ist die *Gryphaea arcuata*, die „gekrümmte Greifenauster“. Daher wird der Arietenkalk auch als Gryphaenkalk bezeichnet (Bild 12) Der Arietenkalk zählt zum Unteren Sinemurium (si1) des Unterjura.

Die um Schwäbisch Gmünd ca. 3–4 m starke Schichtfolge tritt als schmales Band überall auf, wo im Albvorland die steile Hangkante an der Keuper-Unterjura-Grenze sichtbar ist, so auch in den nahen Stadtteilen Wetzgau, Wustenriet, Rehnenhof.

3.2 Oktogonale Stationenhäuschen

An sechs Wandteilen der achteckigen Stationenhäuschen sind schöne Quader aus dem Oberen Stubensandstein (km4o) vermauert. Der Stubensandstein ist ein Werkstein, der die historische Innenstadt von Schwäbisch Gmünd prägt. Er wurde im Umfeld gebrochen. Die ersten vier Häuschen sind damit ausgestattet. An dem zwischen mittel- und grobkörnig zu bezeichnenden Sandstein sind die Schrägschichtungen erkennbar, die für die Sedimentation der aus Ost eingetragenen Sandstränge typisch sind (Bild 13)



Bild 9: Kalkgebundene Pflastersteine Unt. Stubensandstein



Bild 10: Fleins aus dem Unteren Stubensandstein im Tunnel



Bild 11: Pflastersteine aus dem Arietenkalk



Bild 12: Gryphaeen in Arietenkalk-Pflasterstein

Der Stubensandstein wird heute nach seiner Typuslokalität um Löwenstein als „Löwenstein-Formation“ bezeichnet. Während er dort eine Mächtigkeit von 140 m besitzt, kann sie um Schwäbisch Gmünd mit 90 bis 115 m angenommen werden. Die Steinbrüche in und um Schwäbisch Gmünd sind längst aufgelassen. Ersatzmaterial könnte noch aus dem Neckartal bei Pliezhausen oder aus fränkischen Steinbrüchen beschafft werden.

Wir sind bereits beim zweiten Stationenhäuschen. Der Ölberg, an dessen Fuß Christus knieend betet, besteht aus Kalktuff (Kalksinter), wie er gerne in Mariengrotten verwendet wurde. Er wurde hell überstrichen und ähnelt jetzt mehr einem Lochfels aus dem Oberjura (Bild 14). Kalktuff wurde vorwiegend südlich im Bereich der Unteren Oberjuraschichten (Weißjura) aus dem kalkhaltigen Wasser durch chemische Vorgänge gelöst.

3.3 Sechs Bildstöcke und ein Bildstockrelief

Zwischen Häuschen 1 und 2 sind wir auch am ersten Bildstock von Caspar Vogt vorbeigekommen. Er wurde 1985 neu nachgebildet. Ursprünglich aus gelbbraunem Eisensandstein bestehend, wurde Obernkirchener Sandstein verwendet. (Bild 16) Der aus Obernkirchen bei Hannover stammende Sandstein gehört innerhalb der Kreideformation zum Wealden. Das Material wird schon seit vielen Jahrhunderten genutzt. Dort steht eine 8-10 m hohe abbaubare Bank an. Er besitzt ein außergewöhnlich feines Korn (0,05-0,2 mm) und kann daher nahezu als Siltstein bezeichnet werden.⁵ Er wird in zwei Varietäten angeboten – als Obernkirchen weiß und Obernkirchen gelb. Die letztere Varietät wäre in der Farbe dem Ursprungsmaterial näher gekommen. Er ist sehr kostspielig – lässt sich aber gut skulpturieren.

Am dritten Bildstock ist das ursprüngliche Material, so wie es Caspar Vogt verwendete, erkennbar (Bild 17). Es ist der Eisensandstein aus dem Mitteljura der näheren Umgebung, mit dem Caspar Vogt gerne arbeitete. Da er nur südlich der Rems und hier vorwiegend südlich des Rechbergs im Rehgebirge und im Raum Donzdorf vorkommt, wird er auch als Donzdorfer Sandstein bezeichnet. Stratigraphisch gehört er in das Obere Aalenium (al2).



Bild 13: Die ersten vier Kapellenhäuschen aus Stubensandstein



Bild 14: 2. Kapellenhäuschen: Hier wurde der Kalktuff hell überstrichen.

Der sehr feinkörnige und feinporige Sandstein ist tonig-ferritisch gebunden. Seine gelblich-bräunliche Farbe wird durch Limonit, ein Eisenhydroxid hervorgerufen. Die Korngröße liegt im Mittel knapp unter einem Millimeter.

⁵ Internationale Steinkartei, INSK 95.2

Charakteristisch sind die auftretenden Liesegang'schen Ringe. Zum Teil treten feine Parallel- und Schrägschichten auf. Rippelmarken und Wühlgefüge sind auf Lager-Bruchflächen und bei Verwitterung erkennbar.

An den Bodenstufen des dritten Kapellenhäuschens ist ein rostbrauner Sandstein mit flammenden Strukturen erkennbar. Es ist der unverwechselbare Maulbronner Schilfsandstein (Bild 18) Stratigraphisch gehört er zum Schilfsandstein aus dem Mittleren Keuper (km²), der heute als Stuttgart-Formation bezeichnet wird. Er wird vor allem um Maulbronn, Pfaffenhofen und Sinsheim-Weiler im nordwestlichen Baden-Württemberg abgebaut.

Als prägnantes Beispiel gilt das romanische Kloster von Maulbronn aus dem 12. Jahrhundert. Der Maulbronner Sandstein ist ein rostbrauner, rötlicher Sandstein. Auch er zeigt Parallel- und Schrägschichtung. Als charakteristisch gelten dunkelrote, durch Hämatit bewirkte Ornamente. Sie bewirken ein blumiges oder auch streifiges Aussehen. Diese Strukturen führt man auf Rippelmarken zurück, die sich infolge der Grundströmung eines einstigen Flussdeltas bildeten. Der Feldspat führende Sandstein wirkt auf seinen Schichtflächen zum Teil wie geflammt. Er besitzt eine tonig-ferritische Bindung und ist wenig silikatisch. Seine Komponenten bestehen zu 49 % aus quarzistischen Gesteinsbruchstücken und 25 % Quarz. Der Anteil an Alkalifeldspat beträgt 23 %. Muskovit ist mit 2 % beteiligt. Die Farbe wird durch Eisenoxid (Hämatit) bestimmt. Seine Porosität ist mit 20 vol.-% sehr hoch. Das unterschiedliche Verwitterungsverhalten hängt wesentlich von den jeweiligen Bruchlagen ab. Gewonnen wird er seit Jahrhunderten vor allem in Maulbronn nahe Pforzheim (Baden-Württemberg). In der Flur Roßweiler östlich der Stadt steht er in einer Mächtigkeit von nahe 15 m an. Aufsteigend befinden wir uns in den tonig-mergeligen Zwischenschichten im Mittleren Stubensandstein (Bild 19).



Bild 16: 1. Bildstock, erneuert mit Obernkirchener Sandstein

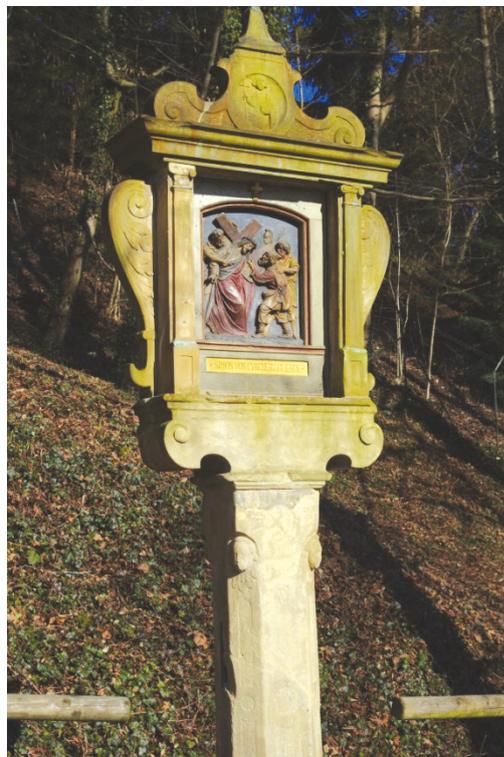


Bild 17: 3. Bildstock aus Eisensandstein



Bild 18: Maulbronner Sandstein am 3. Kapellenhäuschen



Bild 19: 2. Hangendletten im Taubentalbach



Bild 20: Mittl. Stubensandstein 2. Schüttung an Ecce-homo-Kapelle

3.4 Wasser aus der Felskluft

Wo der Kreuzweg an Steilheit zunimmt, ist die zweite Schüttung des Stubensandsteins am Hang erkennbar. Deutlich sichtbar ist er an der Ecce-homo-Kapelle (Bild 20). Die Wände der Kapelle sind aus Bruchmauerwerk des Stubensand- und Angulatensandsteins gemauert und wurden vergipst (Bild 21). Das Herz-Jesu-Brünnlein, das hier kräftig sprudelt, entspringt einer Kluftquelle des Mittleren Stubensandsteins (Bild 22). Brunnenfuß und Brunnenschale sind aus einem grobkörnigen Stubensandstein gehauen. Da er nahezu identisch mit dem Mosesbrunnen an der Fassade der Felsenkapelle ist und dort ein Datum erkennbar war (1769), kann angenommen werden, dass er zeitgleich eingebaut wurde (Bild 23). Der Boden des Brunnens wurde wieder tiefer gelegt, wo er sich historisch einst befand (Bild 24) Original ist die Antrittsstufe (Schilfsandstein). Die verwendeten, Stufen-, Boden- und Wandplatten wurden im Zuge der Tieferlegung durch Leistädter Sandstein ersetzt.

Der nach dem gleichnamigen Gebirgszug, dem die Lagerstätten angehören, auch als Haardt-Sandstein bezeichnete Sandstein ist im Gesamteindruck beige mit ganz schwacher hellbrauner Striemung. Er stammt aus dem Mittleren Buntsandstein der Unteren Trias. „Die Quarzpartikel von durchschnittlich 0,2 mm Größe sind nur geringfügig abgeschliffen. Ein Teil von ihnen ist transparent farblos, andere trüb weiß. Vereinzelt kommen weiße Feldspat-Körner und ganz selten auch gerundete Manganerz-Kügelchen vor. Der kieselige Zement ist mit hellbraunem Limonit durchsetzt. Dessen unterschiedliche Konzentration ist für die zarte Zeichnung des Gesteins verantwortlich.“⁶ Der Treppenweg vor dem Kapellenhäuschen wurde erneuert. Die senkrechten Stufen wurden 2014 von der Gartenschau aus Angulatensandstein (Abbruchmaterial), die Fläche aus Quarzit-, Granit- u. wenig Basaltpflaster eingebaut (Bild 25).

Nach der Kapelle rechts den steilen Weg gehend, kommen wir am ältesten Bildstock mit Rundfuß, am Sockel mit Jahreszahl von 1621, vorbei. Er ist ebenfalls aus Eisensandstein gefertigt. Caspar Vogt schuf die Bildstöcke zwischen 1621 und 1625 (Bild 26).

⁶ Internationale Steinkartei, INSK 93.7



Bild 21: Die Ecce-homo-Kapelle wurde erneuert



Bild 24: Stufen erneuert durch Leistädter Sandstein



Bild 22: Herz-Jesu-Brünnlein in der Ecce-homo-Kapelle



Bild 25: Treppenweg an der Ecce-homo-Kapelle



Bild 23: Brunnenschale aus grobem Stubensandstein



Bild 26: Bildstock von 1621 mit Blickkontakt zur Salvatorbrille

An mehreren Setzstufen fallen dem aufmerksamen Betrachter helle Ringe auf. Es sind Stielglieder, so genannte Trochiten aus dem Muschelkalk (Bild 27). Hier kann man sogar den Abbauort eingrenzen. Es ist der Obere Muschelkalk aus der Nähe von Crailsheim. Durch Bodenströmungen wurden die tonnenförmigen Stielglieder von Seelilien verrollt und in den nächstliegenden Senken des Meeresbodens eingelagert (Bild 28: 28). Als Trochitenkalk bezeichnet man die Anhäufungen dieser Seelilien mit dem Namen *Encrinus liliiformis*. Diese Seelilien lebten in großen Mengen festgeheftet am Boden des Muschelkalkmeeres. Sie waren mit einer sich verbreiternden Wurzel am harten Meeresgrund oder auf Organismenresten des Grundes angeheftet. Nach ihrem Absterben zerfielen die kalkigen Hartteile in unzählige Fragmente. Vor allem deren Stielglieder, die Trochiten, wurden wegen ihrer zylindrischen Form von Meeresströmungen weggetragen, auf Grund ihres Rundungsgrades sortiert und in Senken gehäuft zusammengeschwemmt. Dort wurden sie in das Sediment eingebettet und in Kalzit umgewandelt. Die Farbe des Gesteins ist im Allgemeinen blaugrau, innerhalb der Trochitenlagen grau gelb. Trochiten werden im Volksmund auch Bonifatiuspfennige genannt. Die Stufenauftritte sind mit mittelgroßem Granitpflaster ausgefüllt. Hangseitig finden wir als Begrenzung einige vertikal gestellte Travertinplatten (Bild 29). Der Cannstatter Travertin ist ein Süßwasserkalk. Es ist ein mehr oder weniger poröser Kalkstein von heller, meist gelblicher bis gelbbrauner Farbe. Es handelt sich um chemisch ausgefällte Ablagerungen von Kalkspat im Bereich heißer oder kalter Quellen. Bereits bei der Ablagerung wurden sie zu festem Gestein, das ausschließlich aus Kalziumkarbonat besteht. Limonit gab ihm die Farbe.⁷

Wir kommen zum sechsten Stationenhäuschen in sechseckiger Form. Die Balustrade, gelb übermalt, besteht aus Schilfsandstein. Der Boden ist mit Pflastersteinen des Unteren Stubensandsteins belegt. (Bild 30) Die Kerkerkapelle aus Bruchsteinen des Angulatensandsteins und aus Kalktuff ist im Stil einer Grotte ausgestaltet. Die Rötung der Bruchsteine links oben lässt erkennen, dass sie wohl zum Teil im Feuer lagen und dadurch das darin enthaltene Eisenoxid zum Vorschein kam. Hangseitig begleitet eine Mauer aus Angulatensandstein den weiteren Aufgang (Bild 31). Der unterjurassische Angulatensandstein (he2) bildet vornehmlich die Hangkan-

ten im Übergang vom Keuper zum Unterjura. Er steht örtlich ab ca. 400 m ü. NN an. Auch das achte Kapellenhäuschen, in dem Christus ans Kreuz geholt und genagelt wird, ist in sechseckiger Form mit Balustraden ausgebildet.



Bild 27: Stufe aus Trochitenkalk sowie Granitpflaster



Bild 28: Trochiten-Stielglieder von *Encrinus liliiformis* aus dem Oberen Muschelkalk



Bild 29: Hochgestellte Travertinplatten als Seitenbegrenzung

⁷ Internationale Steinkartei, INSK 75.2



Bild 30: 6. Kapelle, 3. Fall - Pflastersteine aus dem Unt. Stubensandstein



Bild 31: Kerkerkapelle mit Bruchsteinmauerwerk

3.5 Die Salvatorbrille – ein Musterbeispiel für Höhlenbildung

Über einen Bachriss und weitere Treppen gelangt man zur so genannten Salvatorbrille. Es handelt sich um einen prominent hervortretenden Felsblock aus dem hier anstehenden Oberen Stubensandstein. Er dokumentiert die dritte kompakte Sandschüttung (km4o) und wird auch als Höhlensandstein bezeichnet (Bild 32) Die Höhlenbildung ist an diesem Felsblock gut nachvollziehbar. Die Erosion zeigt sich beispielhaft im Fels oberhalb des Bildreliefs am Kreuzweg. Da innerhalb der härteren Sandstein-Komponenten die etwas weichen Einlagerungen auf Grund ihres höheren Anteils an Tonschmitzen leichter erodieren, entstanden Vertiefungen. Sie führten im Volksmund zur Assoziation mit einem brillenähnlichen Aussehen (Bild 33) Das eingesetzte Originalrelief, das von einem Bildstock stammt, der ehemals an der Oberen Remsbrücke bei St. Leonhard stand, ist aus einem feinkörnigen Eisensandstein gemeißelt.

Der geologisch interessierte Betrachter sollte beim Weitergehen wieder die Wegstufen betrachten. Hier wird er erneut an die runden Stielglieder des Trochitenkalks erinnert, wie sie zuvor beschrieben wurden (Bild 34). Nach einer Drehung hat man nun die Höhe der letzten Stationenhäuschen, die Muschel- und die Grabkapelle erreicht. Rechts davon befinden sich die Kreuzigungsgruppe (Bild 35) Auch hier sind die Balustraden und der Quadersockel aus Schilfsandstein ausgeführt (Bild 36) Markant ist auch der letzte Bildstock mit einer Kreuzigungsgruppe. Der Bildstock ist gänzlich original. Er stand einst bei der Josefskapelle in der Stadt. Da er im

Gebüsch etwas geschützt war, wurde seine Verwitterung verzögert. Deutlich sind die Jahreszahl 1625 und das Steinmetzzeichen CV erkennbar (Bild 37) Nur noch undeutlich sind die beiden Wappen sichtbar (Bild 38). Erkennbar ist aber, dass es sich um Eisensandstein handelt, wie er im Rehgebirge südlich des Rechbergs einst gebrochen wurde. Bei den undeutlich hervortretenden Verwitterungsspuren, welche die beiden Wappen verdecken, handelt es sich um ichnologische Spuren, die an Fugen im Eisensandstein häufig vorkommen. Es sind keine körperlichen Fossilien, sondern Spuren, wie sie Organismen auf oder im Meeresboden hinterlassen. Der Wegbelag beinhaltet verschiedene Pflastersteine. Vorherrschend sind zunächst gebietsfremde Porphyre und Quarzite. Sie gehen über in die kleinflächigen Pflastersteine, die mehrfach ausgebessert wurden (Bild 39) Die Kapellensockel der Muschelkapelle und der Grabkapelle bestehen, mit Farbe überstrichen, aus Eisensandstein. Ausbesserungen an den Ecken wurden mit Udelfanger Sandstein ausgeführt. Es ist ein vorwiegend tongebundener, feinkörniger Sandstein. Er wird bei Udelfangen, in der Nähe von Trier in Rheinland-Pfalz gebrochen. Der feinkörnige Quarzsandstein ist bis zu hellkhaki eingefärbt. Lagenweise sind eng angeordnete kleine, schwarze Punkte von 0,3-1 mm. Sie stammen aus der Imprägnation von Fe- und/oder Mn-Erzen und gelten als charakteristisch. Der Mineralbestand besteht ungefähr 60 % aus Quarz, 30 % Feldspat und andere Silikate sowie 5 % Kalzit als Bindemittel.⁸ Stratigraphisch zählt er zum Unteren Muschelkalk. In der Muschelkapelle wurden die Holzfiguren erhöht auf Kalktuffgesteine gestellt und später hell

⁸ Internationale Steinkartei, INSK 94.12

überstrichen. Im Aussehen erinnern sie damit an Lochfels, wie er im Oberjura-Massenkalk der Schwäbischen Alb vorkommt. (Bild 40) Bei der Abscheidung von Karbonaten aus dem fließenden Gewässer und der Bildung von lockeren oder

festeren Kalktuffen spielen pflanzliche Organismen wie Moose, Algen und Cyanobakterien eine große Rolle, vermutlich weil der CO₂-Verbrauch der Pflanzen zur Kalkfällung beiträgt.



Bild 32: Die Salvatorbrille - Musterbeispiel für Höhlenbildung



Bild 35: Kapellenhäuschen, Bildstock und Kreuzigungsgruppe



Bild 33: Höhlenbildungen an der Salvatorbrille



Bild 36: Kreuzigungsgruppe mit Balustraden aus Schilfsandstein



Bild 34: Weg mit Trochitenkalkstufen aus dem Oberen Muschelkalk



Bild 37: Der Bildstock von 1625



Bild 39: Diverses Pflaster auf Höhe der Muschelkapelle



Bild 40: Kalktuff in der Muschelkapelle



Bild 38: Verwitterter Eisensandstein mit Steinmetzzeichen



Bild 41: Benefiziatenhaus von 1770



Bild 42: Chronogramm am Benefiziatenhaus

3.6 Das Benefiziatenhaus – ein barockes Gebäude des ehemaligen Stadtbaumeisters

Markant ist das Benefiziatenhaus aus Eisensandstein. Stadtbaumeister Johann Michael Keller errichtete es für Georg und Theresia Debler 1770. Keller scheint sehr gerne mit dem Eisensandsteinmaterial gearbeitet zu haben, denn viele seiner schönen Barockgebäude in der Innenstadt sind damit ausgeführt (Bild 41). Der Eisensandstein lässt sich als Werkstein gut bearbeiten. Besonders eindrucksvoll ist das über dem Portal angebrachte Chronogramm (Bild 42).

Die den Weg hangseitig bis zur Brunnenschale nahe der Oberen Felsenkapelle begleitende Mauer war ursprünglich als Bruchsteinmauer aus Arietenkalk ausgeführt⁹ (Bild 43). Wo sie endet, stützt eine Wand aus Stubensandsteinquadern, wohl damals aus Abbruchbeständen, den steilen Hang ab. Da die Sandsteinmauer starke Verwitterung aufwies, wurde sie durch die Münsterbauhütte 2014 in großen Teilen erneuert. Zur Verwendung kam ein Sandstein aus Obersteinbach, der auch als Steigerwalder Quarzit bekannt ist (Bild 44). Der Gewinnungsort liegt im „Kammergrund“ von Obersteinbach in Bayern.

Der Obersteinbacher Sandstein wird im fränkischen Bereich Burgsandstein genannt. Er entspricht stratigraphisch dem Oberen Stubensandstein (km4) des Mittleren Keupers, also dem am Salvator anstehenden Ausgangsmaterial. Petrographisch ist es ein weißer bis blass gelblich/rötlicher Quarzsandstein mit kieseliger Bindung. Kennzeichnend sind starke Korngrößenunterschiede (0,05-1 mm). Mitunter wechseln gröbere mit feineren Partien. Er besitzt einen relativ hohen Gehalt an silbrig glitzerndem Muskovit. Der Stein ist frei von Einschlüssen irgendwelcher Art. Mit 3,8 Gew.-% besitzt er eine relativ geringe Wasseraufnahme.¹⁰



Bild 43: Arietenkalk-Bruchsteinmauer an der Oberen Felsenkapelle



Bild 44: Sandsteinmauer an der Oberen Felsenkapelle

⁹ Die Postkarte zeigt eine Ansicht aus dem Jahr 1912

¹⁰ Internationale Steinkartei, INSK 94.20

3.7 Die Obere Felsenkapelle mit dem Ölberg von Caspar Vogt

Über eine Granittreppe betreten wir die Vorhalle der Oberen Felsenkapelle (Bild 45). Die Bodenplatten bestehen aus Krenzheimer Muschelkalk, der hier als Bruchschill ausgeführt wurde. Das Herzstück der gänzlich aus einem ursprünglich stabilen Felsblock ausgehauenen beiden Kapellen ist der Ölberg, der im Rahmen des Modellprojektes jetzt seiner Festigung bedurfte (Bild 46). Er ist hangseitig nischenartig angeordnet. Das Ausgangsmaterial, das Caspar Vogt bearbeiten musste, besteht aus einer psephitischen, ziemlich grobkörnigen Schüttung¹¹. Der heute nach Westen gerichtete Zelebrationsaltar wurde erst 1902 eingebaut. Er wurde mit Stubensandsteinmaterial, wie er zu dieser Zeit von auswärts zur Verfügung stand, ausgeführt (Bild 48).

Der Bodenbelag der Unteren Felsenkapelle ist in Terrazzo ausgeführt. Es handelt sich um einen Kunststein, der brekziöses Material imitiert. Terrazzo hat eine zementgebundene Estrich-Unterlage, wird fugenlos vergossen und danach werden farbige Zuschlagstoffe aufgetragen. Nach seiner Trocknung erhält er durch Schleifen und Polieren sein dekoratives Aussehen.

Wir verlassen die Obere Muschelkapelle und gehen über eine Sandsteintreppe aus Schilfsandstein hinunter auf den Vorplatz und die Untere Felsenkapelle (Bild 47). Entlang der Treppe wurde an der Fassade der ursprüngliche Sandstein durch Muschelkalkplatten ersetzt. Lediglich die Darstellung des betenden Christus wurde ausgespart (Bild 50). An der Brunenschale des Mosesbrunnen aus grobkörnigem Stubensandstein ist die Jahreszahl 1769 eingemeißelt.



Bild 45: Granittreppe zur Oberen Felsenkapelle



Bild 46: Der Ölberg nach der Konservierung



Bild 47: Sandsteintreppe, Schilfsandstein und Muschelkalkfassade

¹¹ Korngröße mehr als 2 mm = psephitisch



Bild 48: Zelebrationsaltar in der Oberen Felsenkapelle



Bild 50: Außenfassade mit betendem Christus



Bild 49: Außenfassade der Felsenkapelle



Bild 51: Steinbank vor der Unteren Felsenkapelle

3.8 Die Außenfassade der Felsenkapelle – Bilder und Symbole

Der Betrachter der beeindruckenden Außenfassade erkennt die besondere fazielle Ausbildung des Felsens in seiner rötlichen, mit Kalifeldspäten angereicherten Form. Die Fassade lenkt den Blick vor allem auf ihre Symbol- und Bildersprache (Bild 49). Der Tragstein der Außenkanzel, ursprünglich aus Eisensandstein¹², wurde durch Udelfanger Sandstein ausgebessert (Bild 52). Die steinerne Sitzbank bestand ebenfalls aus Eisensandstein, wurde aber zum Teil mit farblich ähnlichem Material ausgebessert (Bild 51).



Bild 52: Außenkanzel der Felsenkapelle

3.9 Die Untere Felsenkapelle – Ziel der Gläubigen

Wir wenden uns der Unteren Kapelle zu. Das Gnadenbild, eine Kreuzigungsgruppe sowie der Verklärungsalter waren das ursprüngliche Ziel der zahlreichen Gläubigen während nahezu vier Jahrhunderten (Bild 53). Bemerkenswert ist auch der originale, nach Osten gerichtete Altar, eine Kreuzigungsgruppe (Bild 54). Es ist erstaunlich, was Caspar Vogt aus dem grobkörnigen Stubensandstein zu skulpturieren wusste. Nach Osten führt eine Tür in einen gruftartigen Raum. Caspar Vogt hatte hier ursprünglich ein Heiliges Grab geplant, das aber in den Wirren des Dreißigjährigen Krieges nie zur Ausführung kam (Bild 55). Ersatz fand deshalb das Heilige Grab durch den 1792 erfolgten Abbruch der Kapelle der Heiligen Familie. An ihrer Stelle steht die heutige Grabkapelle.

Aus dem Dunkel der Unteren Felsenkapelle kommen wir zurück ins Freie. Das Pflaster des Plateaus bestand ursprünglich aus den kleinflächigen, rechteckigen Pflastersteinen des Unteren Stubensandsteins. Es wurde durch mehrfache Ausbesserungen mit Porphyren, Graniten und Quarziten, auch wenigen Gneisen, meist in der Größenordnung 15x17 cm vermischt (Bild 56). Außerdem sind östlich am Wegabgang wenige Bordsteine aus Weißjura zu finden (Bild 57). Letztere waren bis in die 70-er Jahre des vergangenen Jahrhunderts in der Innenstadt von Schwäbisch Gmünd üblich, wurden aber längst durch beständigere Gesteinsarten ersetzt. Der gelblich-hellbraune Kalkstein stammte meist aus den Unteren Felsenkalken des Oberjura der nahen Alb. Bei den Pflastersteinen, welche das ursprünglich vorhandene Pflastermaterial aus dem Unteren Stubensandstein ersetzen, handelt es sich durchwegs um ortsfremdes Material. Bei den wohl im Zeitverlauf des Öfteren erfolgten Ausbesserungen dürfte es sich um die jeweils aus kommunalem Bestand vorhandenen Pflastersteine handeln. Sie wurden bei Veränderungen in der Innenstadt ausgebaut und damit übrig.

¹² Oberes Aalenium (al2)



Bild 53: Verklärungsalter in der Unteren Felsenkapelle



Bild 56: Die Pflastersteine auf dem Plateau



Bild 54: Gnadenalter in der Unteren Felsenkapelle



Bild 57: Weißjura-Bordsteine, eingebaut am Plateau



Bild 55: Gruftartiger Raum in der Unteren Felsenkapelle

3.10 Der Blick nach oben zum Glockenturm

Vom Plateau aus blicken wir noch nach oben. Das Dach des Glockenturms ist mit den geologisch betrachtet ältesten Gesteinen eingedeckt – mit devonischen¹³ Bundenbacher Schieferplatten aus dem Rheinischen Schiefergebirge. Ursprünglich mit Dachziegeln aus gebranntem Ton versehen, kamen durch den Bau der Eisenbahnstrecke von Stuttgart nach Wasseralfingen ab 1861 andere Gesteinsmaterialien in die Stadt. Bundenbacher Schiefer sind ein langlebiges sedimentäres Gestein, das als Dach- und Fassadenplatten in Schwäbisch Gmünd vielfach Verwendung fand. Sie haben eine sehr lange Lebensdauer (Bild 58).

Beim Abstieg nehmen wir den direkten Weg über die steile, nach unten führende Treppe. Unterhalb des Mesnerhauses wird der steile Hang von einer eindrucksvollen Natursteinmauer aus dem Arietenkalk gehalten. Es ist eine Gesteinsart, die bis in die 60-er Jahre des vergangenen Jahrhunderts aus klei-

¹³ Devon, von vor ca. 420–360 Mio. Jahren

nen Steinbrüchen der näheren Umgebung Verwendung fand. Auch sie wurde in Zuge der Erneuerung des gesamten Umfelds 2013 wieder ausgebessert



Bild 58: Die devonischen Schieferplatten auf dem Glockenturm

(Bild 59) Beiläufig erkennen wir unter den Stufen einige wenige Weißjura-Kantsteine, wie sie zuvor beschrieben wurden.



Bild 59: Natursteinmauer aus Arietenkalk unter dem Mesnerhaus

3.11 Schlusswort

Für den Laien vielleicht überraschend haben wir immerhin 25 verschiedene Gesteinsarten und – varietäten kennen gelernt. Für einen Hüttenbaumeister z.B. ist das nicht ungewöhnlich, denn an den meisten Domen weit und breit war es schon immer Aufgabe, verwittertes Material durch neue, bestimmten Anforderungen gerecht werdende und aktuell gerade vorhandene Gesteine zu ersetzen.

Der Salvator und sein Umfeld sind den einheimischen Menschen ans Herz gewachsen. Nicht umsonst konnte in einer beispiellosen Aktion durch die tatkräftige Mithilfe und Unterstützung der gesamten Bevölkerung das Ensemble erneuert werden. Der Blick zum und vom Wallfahrtsberg berührt Seele und Geist. Es schafft Identität. Die Gmünder sind stolz auf ihr Alleinstellungsmerkmal.

4 Literaturreferenzen

- Bloos, Gerd (1998): Süddeutschland im Wandel – 250 Millionen Jahre Erdgeschichte; In: Vom Schwarzwald zum Ries, Erdgeschichte mittel-europäischer Regionen (2) Heizmann, Elmar P. (Hrsg.): 9-36, 22 Abb., Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München.
- Havlik, Philipe, Aiglstorfer, Manuela, Haytham, El Atfy & Uhl, Dieter (2013): A peculiar bonebed from the Norian Stubensandstein (Löwenstein Formation, Late Triassic) of southern Germany and its palaeoenvironmental interpretation N. Jb. Geol. Paläont. Abh. 269/3
- Kasper, Hildegard (2010): Salvator Mundi – Erlöser der Welt; In: Gmünder Studien 8, Stadtarchiv Schwäbisch Gmünd (Hrsg.) : 105-119, 8 Abb.; Einhorn-Verlag+Druck GmbH Schwäbisch Gmünd.
- Mayer, Werner K. (2010): Der Unterjura in der Umgebung von Schwäbisch Gmünd; Pfeil-Verlag München.
- Mayer, Werner K (2012): Die Geologie am Nepperberg und St. Salvator, im Taubental und am Lindenfirst; In: Das Taubental mit Lindenfirst und der Nepperberg mit St. Salvator – eine schützenswerte Erholungslandschaft bei Schwäbisch Gmünd; Unicornis 13: 26–45, Einhorn Verlag+Druck Schwäbisch Gmünd.
- Müller, Friedrich (1997/15): Internationale Naturwerksteinkartei (INSK); 3. Aufl., 6 Ringordner, Ebner-Verlag Ulm.
- Spranger, Peter (1999): St. Salvator in Schwäbisch Gmünd; Münsterbauverein e.V. (Hrsg.): 17 S., zahlr. Abb., Schwäbisch Gmünd.
- Strobel, Richard (2003): Die Kunstdenkmäler der Stadt Schwäbisch Gmünd, Bd. IV;. Kirchen und Profanbauten außerhalb der Altstadt mit Beiträgen von Münzenmayer, Peter, Schneider, Alois & Seidel, Kurt; Landesdenkmalamt Baden-Württemberg: 537 S., 536 Abb., Deutscher Kunstverlag München – Berlin.
- Werner, Wolfgang, Kimmig, Birgit, Wittenbrink, Jens, Bode, Helmut (2013): Naturwerksteine aus Baden-Württemberg – Vorkommen, Beschaffenheit und Nutzung; Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Bergbau Rohstoffe und Bergbau, Freiburg i.Br.

Bildnachweis:

Bild 1: Gerhard Schiff

Bild 6: LGRB = Landesamt für Geologie, Bergbau u. Rohstoffe Freiburg

Bild 8: Bung (Beratende Ingenieure) – RP Stuttgart

Bild 49 Landesamt für Denkmalpflege im RP Stuttgart

Bild 51 Thomas Mayr

64 und 66 Bernd Maier

alle anderen Bilder: Autor, Werner K. Mayer

Autor

- Werner K. Mayer
(Vorsitzender Salvator-Freundeskreis)
Neckarstraße 2
73529 Schwäbisch Gmünd-Bettingen

Das Ölbergrelief am Salvator in Schwäbisch Gmünd

Bestand / Zustand / Konservierung

Karl Fiedler

Abstract: Höhlenartiger Raumcharakter sowie Anbindung der Reliefs und Skulpturen aus Sandstein an den gewachsenen Fels - neben der daraus resultierenden Einzigartigkeit des Objekts bringen genau diese außergewöhnlichen Objekteigenschaften auch eine Gefährdung durch die permanente Feuchte mit sich. Gängige Konservierungsmethoden wie die Tränkung mit handelsüblichen Kieselsäureester-Produkten sind am dauerfeuchten Stein nicht durchführbar. Nach ersten Versuchen im Jahre 2002, ein Forschungsprojekt für die spezifische Problematik zu installieren, konnte im Januar 2011 ein DBU-Projekt mit einer Auftaktveranstaltung begonnen werden. Zum Abschluss der intensiven Forschungs- und Entwicklungsarbeit konnte eine Konservierung der Ölberggruppe erfolgen. An der akut in ihrem Bestand gefährdeten Ölberggruppe konnte der Zerfall gestoppt und ein stabiler Zustand für den weiteren Erhalt erreicht werden. Es ist nun möglich, das zuvor fragile Objekt ohne Substanzgefährdung zu berühren und zum Beispiel eine Oberflächenreinigung durchzuführen. Durch die Kittungen und Schlämmungen entsteht eine geschlossene Oberfläche, die auch eine optische Kontrolle von Schäden erleichtert. Die nächsten Schritte zum Erhalt sind die Installation und Durchführung eines regelmäßigen Wartungs- und Kontrollprogramms wie sie auch bei anderen Konservierungsprojekten gefordert und zum Teil durchgeführt werden, sowie die Erstellung und Realisierung eines Klima-Konzepts für die obere Kapelle zur dauerhaften Erhaltung der Ölberggruppe unter unbedingter Berücksichtigung des weiteren Bestandes an Objekten, die aus unterschiedlichen Materialien gefertigt sind und ihren eigenen Gesetzmäßigkeiten unterliegen.

Keywords: Sandstein, Konservierung, Polychromiereste, Schmutzkruste, Auflockerung des Steingefüges, Laser-Reinigung, Festigung dauerfeuchter Sandstein, Kittung, Schlämmung, kieselol-gebundene Steinersatzmasse.

1 Bestand

Das Ölbergrelief am Salvator in Schwäbisch Gmünd ist Teil einer aus mehreren Kapellen bestehenden Kreuzweganlage. Entlang des Wegs am Nepperberg stehen offene Kapellenhäuschen mit polychrom gefassten lebensgroßen Holzskulpturen. Schlußpunkt der Anlage ist die aus dem Fels gehauene Salvatorkirche in deren oberer Kapelle sich die Ölberggruppe mit ihren annähernd lebensgroßen Skulpturen und Reliefs befindet. Die bei der Umgestaltung der Höhlenkapellen 1617 von Kaspar Vogt geschaffene Skulpturengruppe ist weitgehend aus dem anstehenden, hellen, grau-gelblichen bis rötlichen, körnigen Stubensandstein gearbeitet.



Bild 1: Ansicht der Salvatoranlage, Tempera 1880

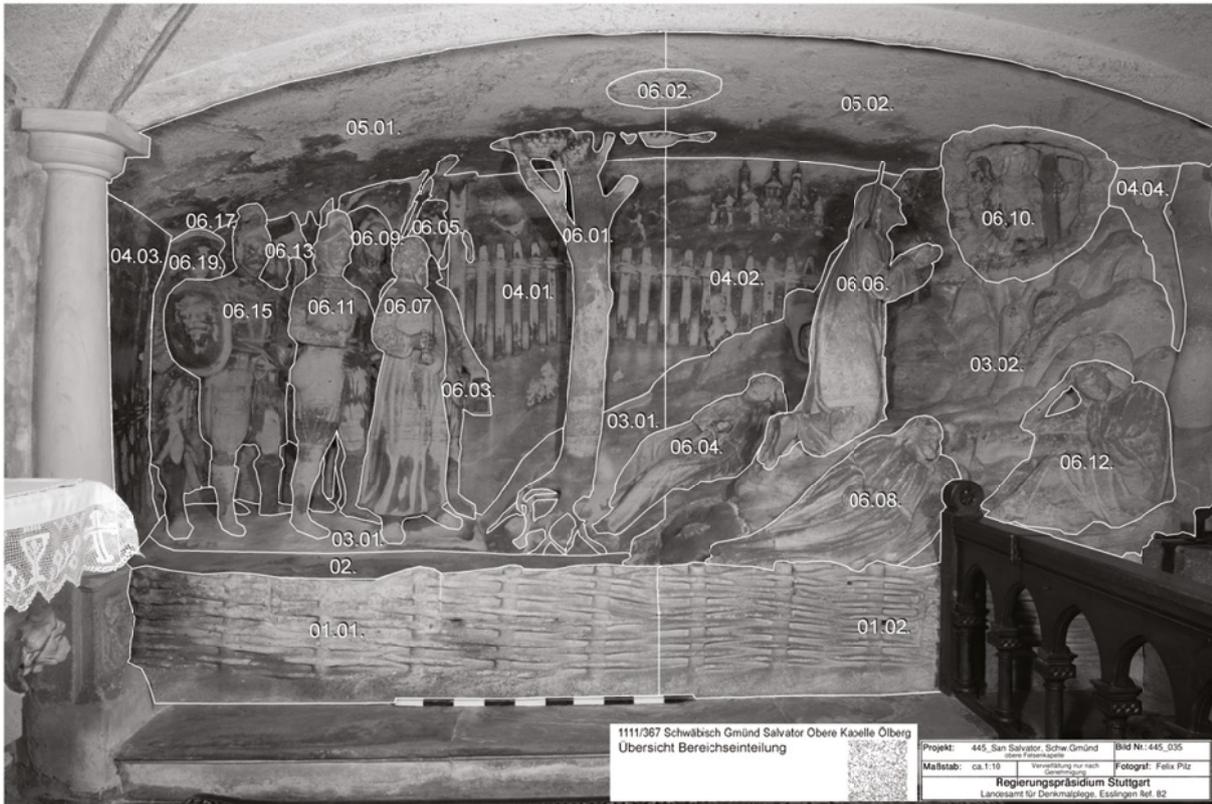


Bild 2: Übersicht Bereichseinteilung [Dokumentationsgrundlage: Landesamt für Denkmalpflege im RP Stuttgart, Felix Pilz]



Bild 3: Übersicht Bestand [Dokumentationsgrundlage: Landesamt für Denkmalpflege im RP Stuttgart, Felix Pilz]

1.1 Anfügungen

Vereinzelt sind aus vergleichbarem Steinmaterial gearbeitete Anfügungen zu erkennen. Die Anschlussfugen sind mit einem hellen Fugenmörtel geschlossen: Der untere Teil des schlafenden Jakobus (06.08., Bild 4) und das hinter ihm liegende Landschaftsteil mit dem Skorpion (03.02., Bild 5) sind durch den umlaufenden Fugenmörtel als Einfügungen erkennbar. Ebenso sind die westlichen Teile des Flechtzauns (01.01. / 01.02., Bild 4) im Vordergrund mit einem hellen Fugenmörtel eingesetzt, hinter dem zweiten Flechtzaunstück von West ist eine breitere Fuge zusätzlich mit Ziegelbruchstücken verfüllt (Bild 6). Vermutlich war vor der Entstehung des Ölbergreliefs bereits eine Kammer im westlichen Bereich der Ölbergnische ausgearbeitet. Im Grundriss ist die rechteckige Form dieser Kammer nachvollziehbar (Bild 8). Die Köpfe von Judas und des westlich hinter ihm stehenden Söldners (06.07, 06.11., Bild 7) sind mit einem gipshaltigen Mörtel angefügt¹. Das Steinmaterial dieser beiden Köpfe ist im Vergleich zur Umgebung etwas heller (trockener?) und zeigt eine geringere Gelbfärbung. Die Hand des Judas ist ebenfalls angefügt, der Geldbeutel lässt außerdem eine Klebefuge mit rötlich-gelber Klebemasse erkennen².

1.2 Weitere Materialien

Die Christus-Figur besitzt einen metallenen Reif mit goldfarbenem Überzug als Nimbus (06.06., Bild 9). Ansatzstellen seitlich und oben am Christuskopf mit Rostspuren lassen eine frühere Montage von Strahlenbündeln aus Metall vermuten (Bild 10). Ähnliche Montagestellen sind an den Hinterköpfen der Jünger zu erkennen. Vermutlich waren hier tellerförmige Strahlen-Nimben montiert (Bild 11).



Bild 4: Anfügung Jakobus 06.08 / Flechtzaun



Bild 5: Anfügung Landschaft 03.02 mit Skorpion

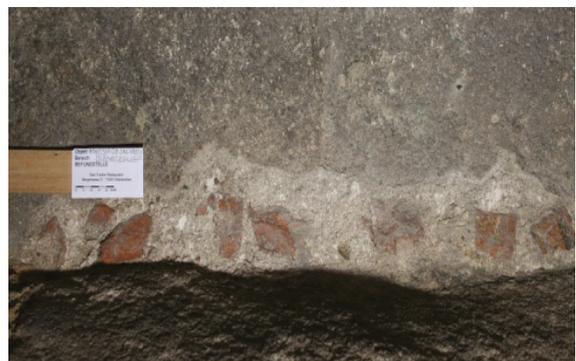


Bild 6: Anfügung 01.01 Flechtzaun Mörtelfuge mit Ziegelbruchstücken



Bild 7: Ansatzfugen und hellere Färbung der Köpfe von Söldner und Judas

¹ Analyse MPA: Der stark dekohäsionierte Ansatzmörtel vom Kopf der Judas-Figur (Probe 06.07.0010) weist außer den Bestandteilen des Sandsteines noch Kalzit, Gips, Na-Sulfate und Syngenit auf. Der hohe Anteil von Gips deutet auf einen gipshaltigen Mörtel hin. Auch der Ansatzmörtel von der Hand der Judas-Figur (Probe 06.07.0011) ist ein gipshaltiger Mörtel.

² Analyse MPA: Die aus den Fugen entnommenen Proben (01.01.0010 und 01.01.0011) zeigen neben den Bestandteilen des Sandsteines (Quarz, Muskovit, Mikroklin, Albit und Kaolinite) deutliche Anteile an Kalzit, (deutet auf eine Kalkmörtel hin) und Gips (als bauschädlicher Salz).

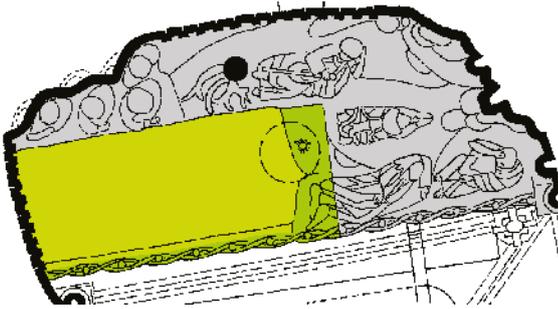
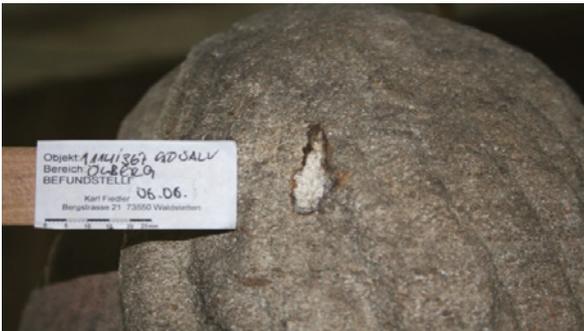
Bild 8: Grundriss³ Ölbergnische mit Anfügungen

Bild 9: Christus 06.06, Kopf mit Nimbus-Reif

Bild 10: Christus 06.06, Kopf mit verschlossener Montage-
stelle für StrahlenbündelBild 11: Johannes 06.12, Hinterkopf mit Metalldübel für
Strahlenkranz

1.3 Mörtelergänzungen

Es lassen sich Mörtelergänzungen unterschiedlicher Art erkennen. Vereinzelt finden sich Ergänzungen aus körnigem, vermutlich zementgebundenem Mörtel, sowie sehr feine, gips- und zementhaltige Ergänzungen im Bereich von Installationseinbauten (Bild 12)⁴. Zum Teil sind die Ergänzungen aus hellem, feinkörnigem Mörtel als modellierende Anfügungen ausgeführt. Hände, Gesicht und Brustbereich der Christus-Figur sind mit einer hellen Ersatzmasse ohne erkennbares Korn ergänzt bzw. überformt (Bild 13). Auf diesen Ergänzungen liegt zum Teil eine roséfarbene Fassung vor⁵. Auch an einigen Unterschenkeln der Söldner lassen sich vergleichbare Ergänzungen mit rosafarbener Fassung feststellen. An mehreren Stellen sind Kittungen und Ergänzungen aus einem dunkelgrauen, spröden, gipshaltigem Mörtel ausgeführt (Bild 14). An einer Abbruchstelle an einer Lanze sind dunkle Reste einer Klebmasse und der Rest des angeklebten Bruchstücks zu erkennen (Bild 16).

1.4 Malschicht

Während der Reduzierung des biogenen Bewuchses an der Ölberggruppe in der Oberen Kapelle sowie im Nischenbereich hinter der Kreuzigungsgruppe in der Unteren Kapelle wurden vereinzelt Fassungsreste in den Relieftiefen gefunden. Es handelt sich um Farbreste, welche zum Teil auf einer hellen Grundierung liegen (Bilder 17-19). Die Größe der Fassungsreste bewegt sich im Millimeter-Bereich. Erste Probenentnahmen sollten der Einschätzung der Fassung hinsichtlich des Befundes zur Polychromie dienen.

Nach der Auswertung der Analysen könnten weitere gezielte Probenentnahmen zur weiteren Klärung erforderlich werden. Die Fassungspartikel haben unterschiedliche Farbigkeiten auf heller Grundierung. Es lassen sich blaue (Hintergrund, Landschaft, „Himmel“) rosé-farbene (Inkarnate) und braune bis rotbraune (Haar) Malschichtreste erkennen. Auch dunkelgraue und orangerote sowie gelbe Reste sind vereinzelt vorhanden⁶.

⁴ Analyse MPA:hauptsächlich Gips, vereinzelt zementhaltige Mörtel

⁵ Analyse MPA: Mennige (Pb₃O₄), die vermutlich mit Zinkweiß (ZnO) gemischt wurde

⁶ Analyse MPA: bleihaltige rosafarbene (Mennige), eisenhaltige rote (Ocker) und kupferhaltige blaue Pigmente (Azurit) wurden identifiziert.

³ Grundriss unter Verwendung Bauaufnahme C. Homolka



Bild 12: Ergänzung aus körnigem, vermutlich hydraulisch gebundenem Mörtel im Wandbereich



Bild 15: Ergänzung aus dunkelgrauem Mörtel an der Stirn der Jakobus-Figur



Bild 13: Christus 06.06, Mörtelergänzung aus hellem glatten Mörtel mit roséfarbener Fassung an den Händen



Bild 16: Lanze mit gelb-braunem Klebemittelrest



Bild 14: Ergänzungen aus dunkelgrauem Mörtel an Engel (Kelch und rechte Hand)



Bild 17: Bereich 04.01 Wandfläche Nord Fassung, blau auf heller Grundierung.

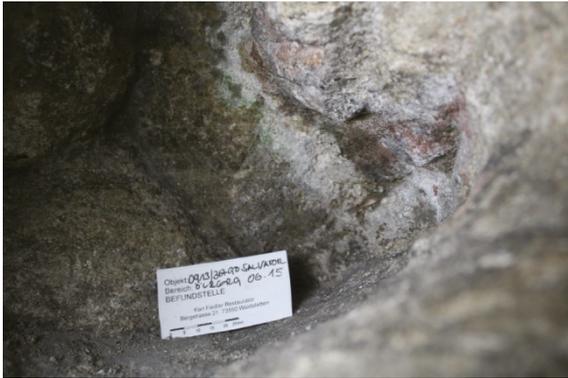


Bild 18: Bereich 06.15. Häscher, Kopf, Haar Fassung (?)
Rotbraun

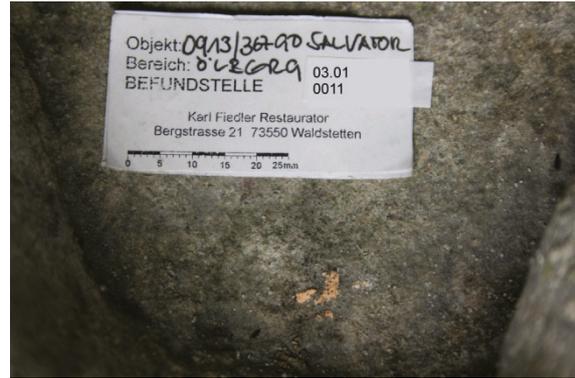


Bild 19: Bereich 03.01 Landschaft Fassung rotororange, hell,
Rest



Bild 20: Übersicht Zustand [Dokumentationsgrundlage: Landesamt für Denkmalpflege im RP Stuttgart, Felix Pilz]

2 Zustand

2.1 Schäden – Verluste

Vergleich historischer Aufnahmen

An einigen Skulpturen und Landschaftselementen sind Skulptur- und Relieftteile verloren gegangen. So fehlt an der Engelsdarstellung der Kopf, die rechte

Hand und der Kelch, am Baum in der Mitte fehlt ein Ast mit mehreren Zweigen (Bild 20).

Auf einer historischen Aufnahme sind diese Relieftteile noch vorhanden (Bild 23). Im Stadtarchiv Schwäbisch Gmünd ist ein Abzug dieser Aufnahme nicht auffindbar. In die Jahre 1954 und 1970 datierte Aufnahmen (Bild 22 und 24) zeigen bereits Schädigungen – unter anderem an den Ästen des Ölbaums. Die vorliegende Aufnahme muss also vor 1954 entstanden sein.

Eine Abbildung der Oberen Salvator-Kapelle in „Die Kunst- und Altertumsdenkmale im Königreich Württemberg“ von Eugen Gradmann 1907 (Bild 21), zeigt einen vergleichbaren Zustand des Ölberg-Reliefs und wie zum Beispiel an Chorschranke und Leuchten erkennbare identische Ausstattungsdetails. An der Decke lassen sich in der Fläche zum Teil bis über einen Zentimeter in die Tiefe reichende Verlustzonen erkennen. In geschlossenen unbeschädigten Bereichen ist die Oberfläche von einer dunklen Kruste bedeckt. Reliefhöhen wie Nasen und Faltenhöhen zeigen im Allgemeinen eine Reduzierung durch Absanden und Abbröckeln.



St. Salvator. Ölberg 1970

Bild 23: Foto – irrtümlich datiert auf 1970, vermutlich 1907⁹



Gmünd. St. Salvator. Obere Kapelle.

Bild 21: Foto –datiert 1907⁷



Bild 24: Foto –datiert 1970¹⁰ - Ast am Baum fehlt

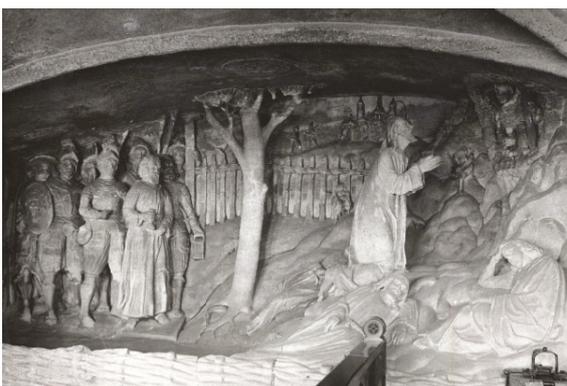


Bild 22: Foto –datiert 1954⁸ - Zweig an Baum fehlt



Bild 25: Vergleichsaufnahme 2009¹¹ zu Bild 21

⁷ Fotografie aus Eugen Gradmann, „Die Kunst- und Altertumsdenkmale im Königreich Württemberg“ von 1907
⁸ Fotografie Stadtarchiv Schwäbisch Gmünd

⁹ Fotografie aus Albert Deibele "Die Kapellen in Schwäbisch Gmünd von einst und jetzt", Gmünder Hefte - Heimatkundliche Schriftenreihe Bd. 10 Stadtarchiv Schwäbisch Gmünd. Das Foto ist wohl irrtümlich auf 1970 datiert.

¹⁰ Fotografie Stadtarchiv Schwäbisch Gmünd

¹¹ © Karl Fiedler – Aufnahmewinkel vergleichbar zu Aufnahme 1907 (Bild 20)

2.2 Schäden - Akute Schäden

In weiten Bereichen ist die Stabilität der oberflächennahe Steinzone durch Zermürbungsprozesse mit damit einhergehender Lockerung des Kornverbandes verringert. Die heller in Erscheinung tretenden Ausbruchstellen zeigen eine Lockerung des Kornverbandes mit Absanden. Vereinzelt sind an Rändern dieser Verlustzonen dünne, fragile Schalen der oberflächennahen Steinzone mit dunkler Kruste stehen geblieben. Am Boden hat sich besonders zu Füßen der westlichen Figurengruppe eine zum Teil mehrere Zentimeter dicke Sandschicht angesammelt (Bilder 26-29).

In einigen Bereichen löst sich die dunkle Oberflächenkruste mit der oberflächennahen Steinzone blasenartig vom Untergrund. Die Kruste besitzt vereinzelt eine glatte zum Teil „speckige“ Oberfläche – zum Beispiel besonders deutlich erkennbar an der westlichen Seitenwand. Eventuell könnte hier eine Oberflächenbehandlung in Form eines festigenden Überzugs vorliegen (Bild 30).

Im Randbereich von Mörtelergänzungen lassen sich helle Ausblühungen erkennen.

An einigen Stellen ist Grünfärbung durch biologischen Befall zu erkennen (Bild 31). In den Relieftiefen scheint der Befall besonders intensiv zu sein. Vereinzelt ist flechtenartiger Bewuchs (Gesicht des Söldners Bereich 06.03, Bild 32) zu erkennen. Staub und Spinnweben sind über die gesamte Oberfläche verteilt vorhanden.



Bild 26: Bereich 06.05/04.01 Ausbrüche mit feinen, fragilen Schalenrändern



Bild 27: Bereich 05.01 Decke mit Verlust der oberflächennahen Steinzone bis in über 1 cm Tiefe



Bild 28: Bereich 06.19 Verlust von Reliefhöhen

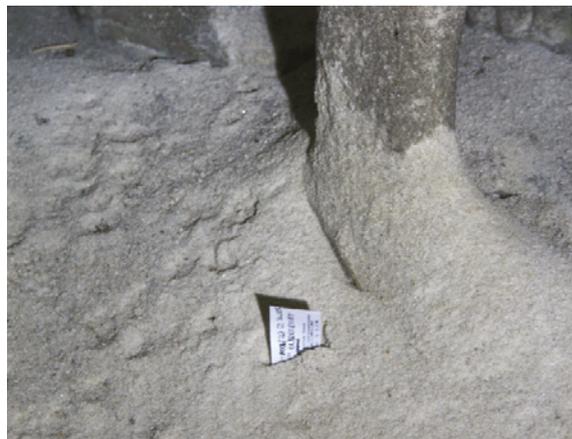


Bild 29: Bereich 03.01 Sand aus Oberflächenverlusten

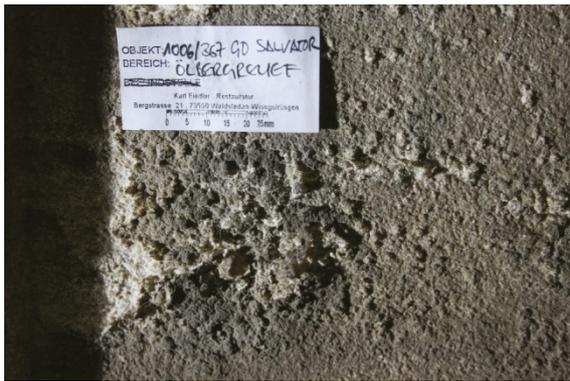


Bild 30: Bereich 04.03 feine blasenförmige Ablösungen mit teilweisen Aufbrüchen



Bild 31: Bereich 06.19 Biogener Bewuchs in Relieftiefen



Bild 32: Bereich 06.03 Biologischer Bewuchs in Relieftiefen

2.3 Schadensursachen / Schadensprozesse

Höhlenartiger Raumcharakter sowie Anbindung der Reliefs und -Skulpturen an den gewachsenen Fels, neben der daraus resultierenden Einzigartigkeit des

Objekts bringen diese außergewöhnlichen Objekteigenschaften auch eine Gefährdung durch die per

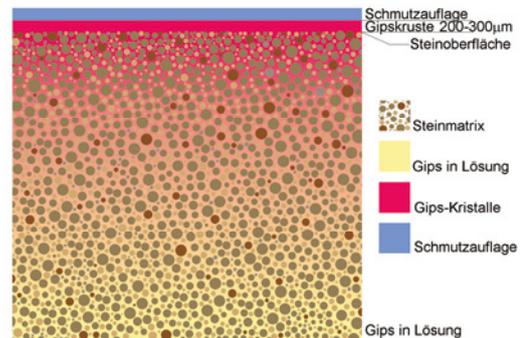


Bild 33: Schematischer Querschnitt durch den belasteten Stubensandstein mit Kristallisation an der Oberfläche bei entsprechender Trockenheit

manente Belastung durch Salze und Feuchte mit sich¹². Neben der denkmalpflegerisch konservatorischen Forderung, die einzigartigen Objekteigenschaften der aus dem Fels gehauenen Skulpturen und Reliefs zu bewahren und das Objekt an seinem originalen Standort unverändert zu belassen, würde eine Trennung der bearbeiteten Steinbereiche vom Fels und eine daraus resultierende Austrocknung zu nicht absehbaren Effekten führen. Ansatzweise konnten die Auswirkungen einer Trocknung des Reliefs mit den damit verbundenen massiven Auskristallisationen von Salzen an der Oberfläche während der Schlämmung verfolgt werden. Vergleichbar zu dieser für die Konservierung notwendigen Austrocknung sind Auswirkungen durch die natürlich ablaufenden klimatischen Veränderungen anzunehmen, die bei entsprechender Witterung zur Schädigung durch Kristallationen führen (Bild 33).

3 Vorbereitende Maßnahmen

3.1 Arbeitsproben zur Laserreinigung

Die aus konservatorischen Gründen notwendige Reduzierung von dunklen Krusten wurde durch die extrem geschädigte oberflächennahe Steinzone erschwert.

Eine Reinigung ohne vorherige Festigung dieser Zone war wünschenswert, da die Applikation eines

¹² Die Bestimmung der Feuchte- und Salzbelastung und den damit einher gehenden Auswirkungen auf den biologischen Bewuchs sind in den entsprechenden Beiträgen in diesem Band von Judit Zöldföldi und Stefanie Scheerer erörtert.

Festigungsmaterials nach Abnahme der Verschmutzung erleichtert wurde. Eine Möglichkeit der schonenden Reinigung ist die Reduzierung der Krusten mit dem Laser. Da – abgesehen von der Erwärmung und den entsprechenden Dehnungsprozessen – hierbei keine mechanische Belastung auf die Oberfläche einwirkt, bestand die Möglichkeit, auch hochsensible Ausbruchkanten zu erhalten. Eine Gefahr lag natürlich darin, dass die Kruste bei feinen Schalen zum Teil auch zum Zusammenhalt des Gefüges beiträgt. In einer ersten Versuchsreihe wurden Reinigungsproben an unterschiedlichen Stellen mit unterschiedlich gearteter Verschmutzung und unterschiedlichem Zustand erstellt (Bild 34). Für Reinigungsproben kam das Lasermodul CL 20 Backpack¹³, mit Bearbeitungskopf OSH20, Fokussiermodul $f=160\text{ mm}$ zur Anwendung (Bild 35). Nachdem eine Reduzierung der dunklen Krusten und Schmutzauflagen in den unterschiedlichen Schädigungszonen problemlos und ohne Verlust oder Schädigung von zermürbten Steinpartien durchgeführt werden konnte, wurde in einer zweiten Versuchsreihe die Reinigung einer größeren Musterfläche in Bereich 04.03. vorgenommen (Bild 37). Während der Reinigung wurden stichprobenartige Messung der Erwärmung mit dem Infrarot-Thermometer¹⁴ vorgenommen. Die Messungen erfolgten während der Laser-Bestrahlung, die Messwerte wurden parallel zur Reinigung abgelesen. In normal verschmutzten Bereichen wurden Erwärmungswerte von $4,3^\circ$ bis $7,2^\circ$ ermittelt. In Bereichen mit stärkerer Krustenbildung wie zum Beispiel an Aufsichten, ist eine längere Bestrahlung erforderlich, hier wurden Erwärmungswerte von $14,5^\circ$ ermittelt.

Um die gelbliche Färbung des Reinigungsergebnisses mit dem Laser einordnen zu können und eine Veränderung der Oberfläche durch die Laserbehandlung ausschließen zu können, wurde in einem Bereich mit stabiler Oberfläche eine Vergleichsprobe zur Reinigung mit Glasfaserstift und Akapad®-Schwamm vorgenommen. Die trocken-mechanische Reinigung mit dieser Methode führte zu einem in der Färbung vergleichbaren Ergebnis (Bild 36). Eine Farbveränderung durch die Laser-Reinigung fand demnach nicht statt. Die Reinigung war im Vergleich zur Laser-Reinigung aufwendiger und weniger gleichmäßig, sie stellte zudem eine erhebliche me-

chanische Belastung dar und wäre nur in wenigen Bereichen schadensfrei durchführbar gewesen.

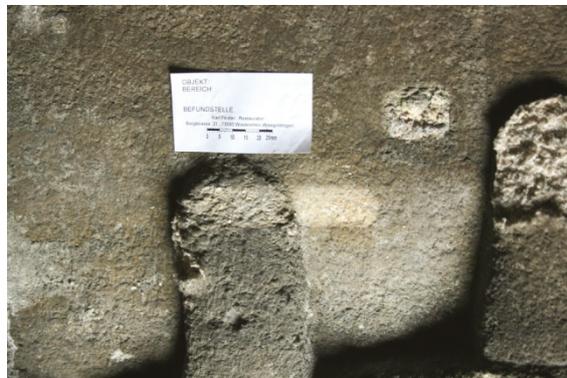


Bild 34: Probe 002 Bereich 04.03:Zone mit dichtem, zum Teil bräunlich glänzendem Belag im Anschluss an aufgebrochenes Relief



Bild 35: Lasermodul CL 20 Backpack



Bild 36: Bereich 04.03 Vergleichsprobe trocken-mechanische Reinigung

¹³ Luftgekühlter, diodengepumpter Festkörperlaser, Laser Klasse 4. Fa. Clean Laser D-52134 Herzogenrath

¹⁴ cason CA380 (-32 bis 380°C).



Bild 37: Laser-Reinigung Musterfläche in Bereich 04.03

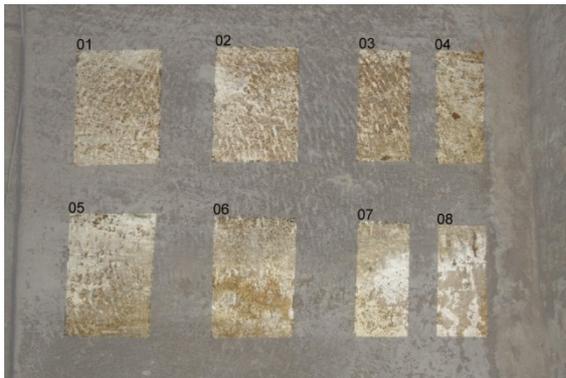


Bild 38: Probezonen zu ersten Festigungsversuchen am Objekt nach der Laser-Reinigung



Bild 39: Zementfußboden mit Kondenswassertropfen

3.2 Proben zur Steinfestigung

Zur Ermittlung von Material und Vorgehensweise zur Steinfestigung wurde eine erste Versuchsanordnung an einer originalen Oberflächenzone vorgenommen: Für diese Versuchsanordnung wurde von den Projektteilnehmern gemeinsam in Abstimmung mit dem LAD eine Probenzone an der Westlichen Wandfläche hinter dem Beichtstuhl festgelegt. Die nach einer Feuchte- und Salzmessung mit der TDR-Sonde definierten Probenflächen wurden als erste Maßnahme mit dem Laser gereinigt (Bild 38).

Vom Labor Dr. Wendler wurden für die erste Versuchsreihe vor Ort zwei Versuchsmaterialien mit den Bezeichnungen I-1 und II-L zur Verfügung gestellt. Zusätzlich zu diesen Mikroemulsionen wurde das Produkt Remmers KSE OH in den Tränkungsversuch einbezogen. Nach Messung von Feuchte- und Salzbelastung mit der TDR-Sonde erfolgte die Applikation mit Spritzen und Kanülen.

Das Aufnahmeverhalten war relativ gut, es konnten jeweils etwas über der vorgegebenen Mindestaufnahme von 1l/m^2 liegende Festigermengen vereinzelt fast bis zur doppelten Menge in die Probenflächen eingebracht werden. Der Feuchtefilm war nach ca. 15 Minuten von der Oberfläche verschwunden und die dunkle Festigerzone reichte ca. 0,5 bis maximal 1 cm über die Probenflächengrenze hinaus.

Die klimatischen Bedingungen während der Festigungsversuche lassen sich anhand der Messdaten der Klimamessung und der TDR-Sondenmessung nachvollziehen. Einen Hinweis auf die hohe Raumfeuchte geben die Kondenswassertropfen auf dem Zementboden (Bild 39).

Nach Auswertung dieser ersten Versuche und vielversprechenden Ergebnissen wurden weitere Festigungsproben vorgenommen. Zur Beurteilung der gegenseitigen Beeinflussung von Festigung und biologischem Befall wurden in Zusammenarbeit mit Frau Dr. S. Scheerer und Frau Dr. J. Zöldföldi in der unteren und oberen Kapelle Probenflächen erstellt bzw. Probekörper bearbeitet (Bild 40, 41).

Weitere Untersuchungen und Versuche zielten auf die Behandlung der gefestigten Bereiche über den Aushärtungszeitraum ab. Nach der Auswertung der Festigungsproben an Probekörpern und in den Probenbereichen konnte eine Festiger-Variante ausgewählt und in einer Probezone an der Ölberggruppe appliziert werden (Bild 42).

Die Auswahl der Probezzone erfolgte nach folgenden Kriterien:

- Repräsentative Schädigung des Bereichs
- Möglichkeit einer Kontrolle der Festigungswirkung mittels Ultraschall-Laufzeitmessung

Es wurde eine Zone im Bereich 06.11, Söldner, rechter Unterschenkel ab Knie ausgewählt. Nach abgeschlossener Ultraschall-Laufzeitmessung des Vorzustands wurde der Festiger mit Spritze und Kanüle appliziert. Es konnten 200 ml in die ca. 9 dm² große Fläche eingebracht werden, dies entspricht einer Menge von ca. 2,2 l/m². Der Oberflächenfilm war nach ca. 35 Minuten verschwunden. Der Festiger reichte oben ca. 0,5 bis maximal 1 cm über die Probeflächengrenze hinaus. Nach unten hatte er sich auch im darunter liegenden Fußbereich verteilt.

Die Kontrolle durch Ultraschall-Laufzeitmessungen zeigte eine geringe Erhöhung der Festigkeit um 0,2-0,3 km/s¹⁵.



Bild 40: Probefläche Untere Kapelle zur Beurteilung der Festigung im Zusammenhang mit biogenem Bewuchs



Bild 41: Probenbereich (links) nach 2 Wochen mit Schimmelbildung an rechtem Rand

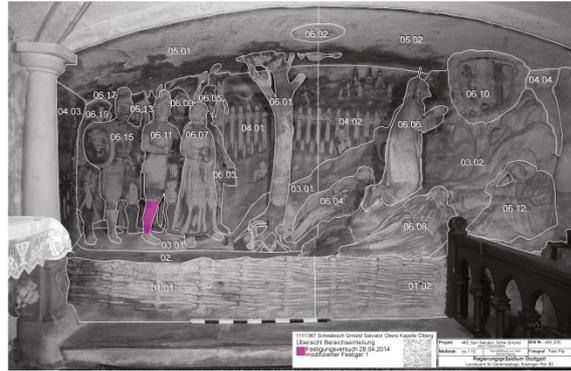


Bild 42: Ölberggruppe Probezzone Bereich 06.11. Dokumentationsvorlage: Landesamt für Denkmalpflege im RP Stuttgart, Felix Pilz.

3.3 Probekörperherstellung zur Entwicklung einer Schlämm- und Kittmasse

Als Basisrezeptur für die ersten Proben wurde eine bereits an anderen Sandsteinobjekten bewährte Kittmasse verwendet. Es handelt sich um eine Mischung von Steinsanden und -Mehlen und dem Bindemittel Syton X30. Als Probekörper wurde mit Festiger 1 behandelte und auf eine auf ca. 50 % Steinfuchte konditionierte Scheiben von Bohrkernen des Stubensandsteins verwendet. Die Probekörper wurden zur Aushärtung über mehrere Tage in der Ölbergnische ausgelegt und anschließend zur Untersuchung in der MPA wieder entnommen (Bild 43)¹⁶.



Bild 43: Zur Härtung am Objekt ausgelegte Probekörper mit Kittmasse

¹⁵ Bericht MPA

¹⁶ Analyse MPA: Die Untersuchungen zeigten eine geringfügige Änderung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes. Siehe auch Zöldöldi 2015

4 Maßnahmen

4.1 Laser-Reinigung

Die Reduzierung dunkler Krusten und Schmutzauf-lagen mittels Laser-Reinigung wurde im März/April 2012 an der gesamten Ölberggruppe durchgeführt. Es konnte eine Reduzierung der dunklen Krusten und Auflagen entsprechend der Arbeitsproben erzielt werden (Bilder 44-48).



Bild 45: Laser-Reinigung, Detail Zwischenzustand Bereich 06.08



Bild 44: Laser-Reinigung Zwischenzustand Bereich 06



Bild 46: Laser-Reinigung, Detail Zwischenzustand Bereich 03.02



Bild 47: Laser-Reinigung, Detail Zwischenzustand Bereich 05.01 (Decke)



Bild 48: Gesamtansicht nach Laser-Reinigung

4.2 Weitere konservierende Bearbeitung Ölberg-Relief

Nachdem hohe Materialfeuchte des Stubensandsteines auf Grund der lang anhaltenden Regenperiode im Frühjahr 2013 eine Festigung im Jahre 2013 nicht zuließen und eine für eine Bearbeitung notwendige Schließung der Kapelle während der Landesgartenschau (Mai bis Oktober 2014) nicht möglich war, konnten im Oktober 2014 die Konservierungsarbeiten am Ölbergrelief mit der Festigung durch Tränkung mit dem modifiziertem KSE-Produkt fortgesetzt werden. Eine mechanische Abnahme von biogenem Befall war vorab durch Frau Dr. Scheerer im Herbst 2014 durchgeführt worden

4.3 Festigung

Vorbedingungen

Es verstand sich von selbst, dass eine Festigung in diesem sensiblen Fall nicht bedingungslos durchgeführt werden konnte. Die Entscheidung der Durchführung einer Festigung - in diesem Fall die Applikation einer neu entwickelten Modifikation - musste

von allen Projektbeteiligten gemeinsam beschlossen und getragen werden.

Durch den Festiger vorgegebene Kriterien wie zum Beispiel Steinfouchte, Temperatur usw. mussten erfüllt sein. Ebenso musste den aus dem Festigungs- und Hydrolyseprozess resultierenden Produkten Rechnung getragen werden. Besonderes Augenmerk lag auf den großen Mengen an frei werdendem Ethanol. Zum Einen betraf dies die Eigenschaft als Gefahrstoff mit gesundheitsschädlichen oder gefährdenden Auswirkungen (Brand- und Explosionsgefahr), zum Anderen die Eigenschaft in geringeren Konzentrationen als Nährstoff für eine Schimmelbildung zu dienen.

Auf den Festiger bezogene Vorbedingungen

- Die Auswirkungen auf das Steinmaterial, wie zum Beispiel Veränderungen des Porenraums sind durch entsprechende Untersuchungen überprüft und belegt und entsprechen den Vorgaben für einen schadungsfreien Fortbestand des Objekts in der Zukunft (siehe auch Zöldföldi 2015).
- Im Sinne eines erweiterten Reversibilitätsbegriffs ist die Möglichkeit einer weiteren Tränkung mit Festiger in der Zukunft gegeben.

- Der Festigungserfolg an der ersten Probefestigung im Originalbereich (Ölberg, Häscher, Bereich 06.11. Wade) war durch Ultraschall-Laufzeitmessungen nachgewiesen¹⁷.

Wegen des hohen Ethanol-Gehaltes im Festiger und der bei der Hydrolyse zu erwartenden zusätzlichen Ethanol-Entwicklung waren entsprechende Schutzmaßnahmen notwendig. Um das Luftvolumen zu reduzieren und eine Verteilung von Ethanol-Dämpfen im gesamten Kapellenraum zu vermeiden, wurde die westliche Zone der Kapelle durch eine temporäre Trennwand aus Holzfaserverplatten abgetrennt (Bild 49). Eine Reduzierung des während der Festigung und während des Hydrolyseprozesses frei werdenden Ethanols wurde durch Installation und Betrieb einer Absauganlage gewährleistet (Bild 50). Während der Applikation wurde die Alkoholkonzentration im Arbeitsraum kontinuierlich gemessen. Bei Überschreiten eines festgelegten Wertes wurde die Applikation unterbrochen. Innerhalb des Arbeitsraumes waren Schutzkleidung und Atemschutzmaske obligatorisch.

Die klimatischen Bedingungen für Festigung waren definiert und zum Zeitpunkt der Applikation gegeben. Sie wurden im Verlauf der Arbeiten im Rahmen des Klima-Monitorings kontrolliert.

Aus Sicherheitsgründen war die Kapelle während der Festigung und der Hydrolyse-Phase während der anschließenden Wochen für den Publikumsverkehr geschlossen und nur für Personen zugänglich, die eine mit der Konservierung in Zusammenhang stehende Tätigkeit ausführen.

Da eine werkstückgerechte Tränkung in diesem Fall nicht möglich war, wurde die Ölbergnische für die Festigung vorab in fünf Tagwerkbereiche unterteilt (Bild 51). Der erste Bereich hatte eine variable Größe mit ausreichend Möglichkeiten, die Tränkungszone des ersten Tages zu verkleinern. Die Tränkung konnte jedoch entsprechend der Planung durchgeführt werden. Die Applikation des Festigers erfolgte durch Fluten mit der Gartenspritze (Bild 52). In Zone 1 konnten durch mehrmaliges Fluten insgesamt ca. 18 Liter eingebracht werden.



Bild 49: Trennwand für Bearbeitung Ölberg, rechts unten permanente Messung der Ethanol-Konzentration im Ölbergbereich



Bild 50: Absauganlage für permanenten Luftaustausch

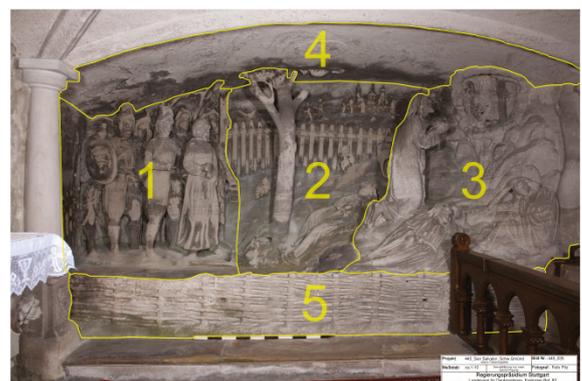


Bild 51: Übersicht Festigungszonen

¹⁷ Ultraschall-Laufzeitmessungen MPA



Bild 52: Flutung mit Gartensprüh-Flasche



Bild 53: Gezielte Applikation mit Spritze und Kanüle

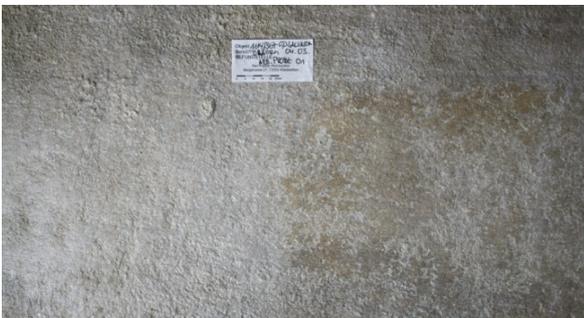


Bild 54: Arbeitsprobe zur Abnahme des überschüssigen Festigers



Bild 55: Schimmelbildung in Relieftiefen

Bereits nach wenigen Stunden musste festgestellt werden, dass die Gelbildung an der Oberfläche eingesetzt hatte. Ein wie sonst übliches Abnehmen des überschüssigen Materials zum Abschluss der Tränkung war nicht mehr möglich. Dadurch entstand zuerst eine glänzende Schicht an der Oberfläche. Nach einer ersten Aushärtung und Bildung eines Kraquelées veränderte sich die Schicht zu einem grauen Belag. Dieses Phänomen war während der Probe-Applikationen nicht aufgetreten. Versuche zeigten, dass eine Reduzierung und Abnahme des Belags von der Oberfläche möglich war.

Als Reaktion auf diese Gegebenheit musste die Art der Applikation modifiziert werden. In den folgenden Tränkungszone wurde nach einer durch Fluten mit der Gartenspritze erreichten ersten Sättigung nur noch gezielt kleinere Menge Festiger mit Spritze und Kanüle an besonders stark saugenden Bereichen appliziert (Bild 53). Mit dieser differenzierteren Vorgehensweise konnte die Aushärtung einer Schicht aus überschüssigem Festiger an der Oberfläche vermieden werden. Um im Verlauf der Hydrolyse frei werdende Lösemittel abzutransportieren, wurde die Absauganlage noch mehrere Wochen nach der Festigung weiter betrieben. Parallel hierzu wurde ein Absorber zur Reduzierung von eventuell sich bildenden Schimmelsporen eingesetzt.

In der Festigungszone 1 waren Teile der Oberfläche mit überschüssigem Festiger bedeckt (Bild 54). Durch Abbürsten mit Kunststoffborsten und Nachreinigen mit Akapad-Schwämmen ließ sich der Festiger mechanisch reduzieren.

Nachsorge

Während der Abnahme des überschüssigen Festigers wurde Schimmelbildung in den Relieftiefen festgestellt (Bild 55). Die Schimmelentwicklung wurde während der nach Festigung und Kittung / Schlammung regelmäßig stattfindenden Kontrollen überprüft und abgesaugt¹⁸.

Im Verlauf des Hydrolyse-Prozesses wurden an einigen Stellen, besonders im unteren Bereich der Häscher-Gruppe Salzkristallationen¹⁹ festgestellt, die während der regelmäßigen Nachkontrollen mit dem Staubsauger abgenommen wurden (Bild 57).

¹⁸ IQ Air GC series mit Partikel- und VOC-Filter

¹⁹ MPA Analyse: Mg-Sulfate



Bild 56: Nach der Festigung Absaugung von Schimmelsporen in den Tiefen / Kontrolle der Festigung durch Ultraschall-Laufzeitmessung

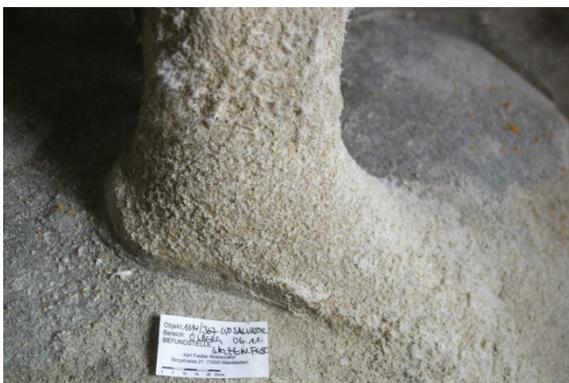


Bild 57: Salzkrystallisationen nach der Festigung

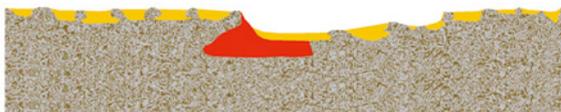


Bild 58: Schematische Darstellung der erodierten Stein-
oberfläche mit konservierender Kittung von Aus-
bruchrändern (rot) und Schlämme im Sinne ei-
ner Mikro-Kittung (gelb)

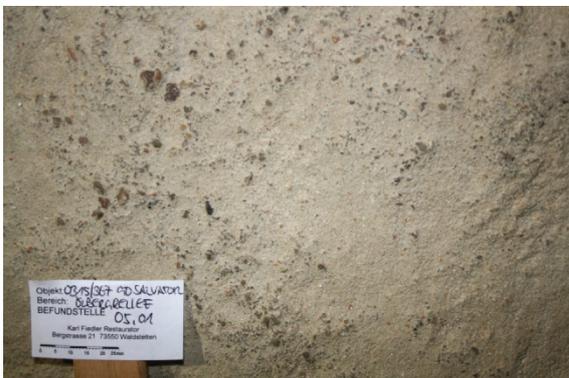


Bild 59: Beispiel - flächige Schlämme im Deckenbereich

4.4 Kittung / Schlämme

Durch die Festigung konnte eine Grundstabilisierung der geschädigten Steinzone erzielt werden. Gefährdete Ausbruchränder konnten durch eine konservierende Kittung mit kieselsol-gebundener Steinersatzmasse stabilisiert werden. Bestimmte Schädigungen der Steinoberfläche konnten durch die Maßnahme der konservierenden Kittung nicht ausreichend erfasst werden. Flächig auftretende kleinteiligere Schadensbilder wie Schuppenbildung und Auflockerung des Gefüges im oberflächennahen Bereich erforderten eine differenziertere Bearbeitungsmethode. In diesen Bereichen war trotz erfolgreicher Stabilisierung durch die Festigung ein Verlust absehbar, da die einzelnen Steinpartikel und Schuppen keinen ausreichenden Kontakt untereinander und zum Untergrund aufwiesen und eine Verklebung durch den Festiger somit ausgeschlossen war. Mit Hilfe einer Schlämme konnten diese feinteiligen Schadensbilder gezielt bearbeitet werden.

Zur Stabilisierung dieser Schadensbereiche wurden die zahlreichen kleinen Ausbrüche und Vertiefungen im Sinne von Mikro-Kittungen mit einer Kieselsol-gebundenen Schlämme aufgefüllt und Schuppen und Sandkörner sichernd eingebettet (Bild 58). Durch die Verfüllung von Auswitterungen konnte die Angriffsfläche für weitere Erosion vermindert und die noch erhaltenen Oberflächenbereiche stabilisiert werden (Bild 59).

Applikation

Die kieselsol-gebundene Schlämme wurde mit Pinseln aufgetragen, wobei durch stufendes Auftragen ein möglichst tiefes Eindringen in Hohlräume und Risse erzielt werden sollte. Um die erhaltenen Oberflächenzonen mit den originalen Bearbeitungsspuren nicht zu überdecken, wurde überschüssige Schlämme abschließend mit feuchten Mikroporenschwämmen abgenommen. Im Laufe der Schlämmung wurde festgestellt, dass die Schlämme in der großflächigen Applikation in der feuchten Ölbergnische nur sehr langsam trocknet. Da ein Trocknen für das Abbinden der Schlämme unerlässlich war, wurde eine Unterstützung des Trockenprozesses durch Feuchtereduzierung vorgenommen. Parallel erfolgte eine Verbesserung der Luftzirkulation durch Ventilatoren und die Reduzierung von Lösemitteldämpfen und eventuell sich bildenden Schimmelsporen mit Hilfe des Absorbers (Bilder 60-65).

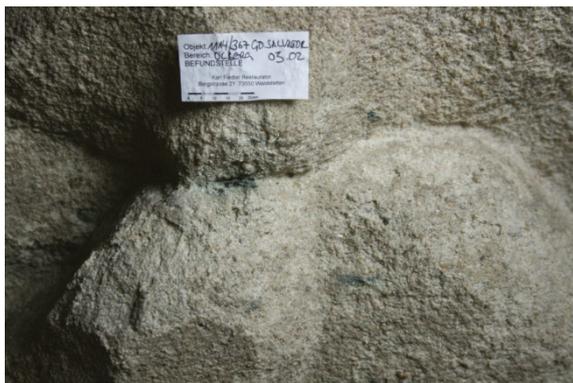


Bild 60: Aufbruchstelle in Landschaft nach der Festigung vor der Kittung / Schlämmung

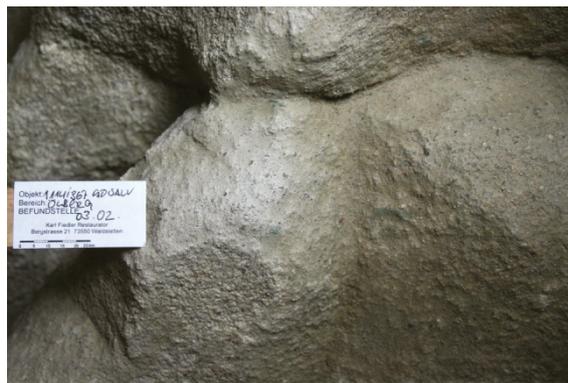


Bild 63: Aufbruchstelle in Landschaft nach der Kittung / Schlämmung



Bild 61: Vergleichsaufnahme Westliche obere Zone vor der Konservierung



Bild 64: Westliche obere Zone nach Kittung und Schlämmung während der Trocknung

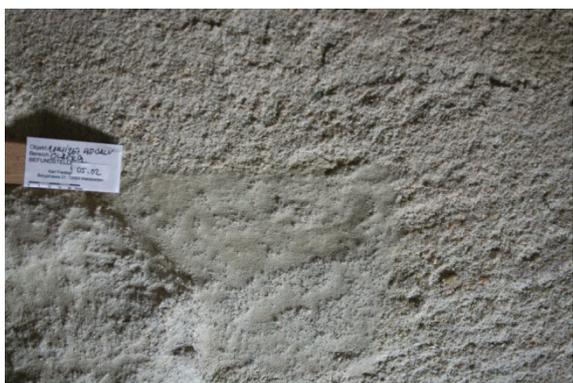


Bild 62: Schlammprobe zur Einbettung von Schuppen und Auflockerungen



Bild 65: Trocknung von Kittungen / Schlämmen durch Entfeuchtung, Absorbition, und Ventilation in der Ölbergnische

Tabelle 1: Rezeptur Schlämm- und Kittmasse

	Füllstoff / BM		Anteile
1	Dorsilit 9H	Baufachhandel	100 g
2	Dorsilit 2500	Baufachhandel	93,9 g
3	Marmormehl Prugna, braunrot, 0-0,6 mm	59201 *	4 g **
4	Schiefermehl, grau-grün	40920 *	2 g **
5	Ocker JTCLES	40010 *	0,125 g **
6	Syton X 30		zur Verarbeitbarkeit

* Fa. Kremer Aichstetten - Best.Nr.

**färbende Bestandteile in veränderlichen Anteilen

Während dieser Trockenphase konnte ein Abbinden der Schlämmungen erzielt werden. Allerdings kristallisierten erste Salze (Magnesiumsulfat²⁰, Bilder 66 und 68) an der Oberfläche aus. Während der nach Festigung und Kittung bzw. Schlämmung regelmäßig über mehrere Wochen stattfindenden Kontrollen wurden die Salzrasen mit dem Pinsel entfernt und abgesaugt. Eine regelmäßige Kontrolle und mechanische Abnahme von biogenem Befall (unterschiedliche Arten von Schimmelpilzen) wurde durchgeführt.

4.5 Klebung von Bruchstücken

An der Hand der Petrus-Skulptur war vermutlich durch Quellung während der Festigung ein Stück abgefallen. Das Bruchstück wurde separat gefestigt und nach der Aushärtung an der Bruchstelle angeklebt und angekittet (Bilder 69-71).

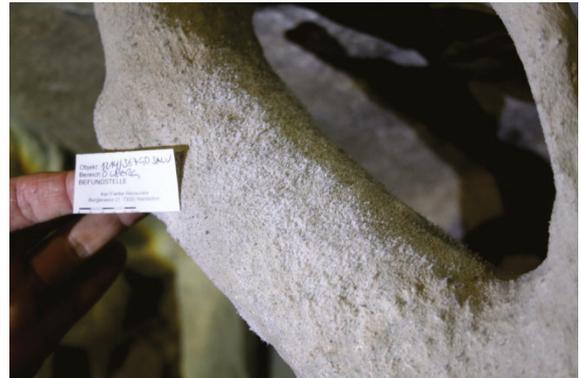


Bild 66: Salzkristallisation während der Entfeuchtung nach Kittung und Schlämmung



Bild 67: Salzkristallisation während der Entfeuchtung nach Kittung und Schlämmung



Bild 68: Salzkristallisation während der Entfeuchtung nach Kittung und Schlämmung

²⁰ Analyse MPA

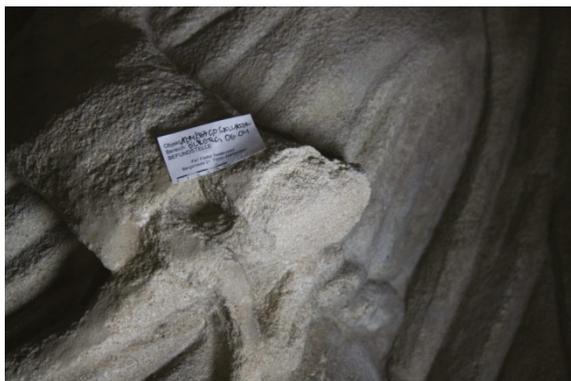


Bild 69: Bereich 06.04. Klebung, Vorzustand



Bild 72: Bereich 06.19 Vergleich zu Bild 27

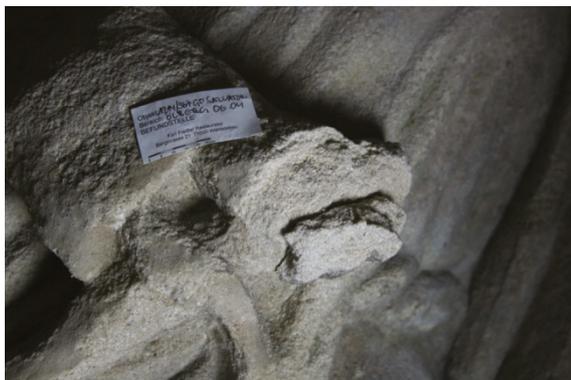


Bild 70: Bereich 06.04. Klebung, Zwischenzustand



Bild 73: Bereich 06.05 Vergleich zu Bild 31

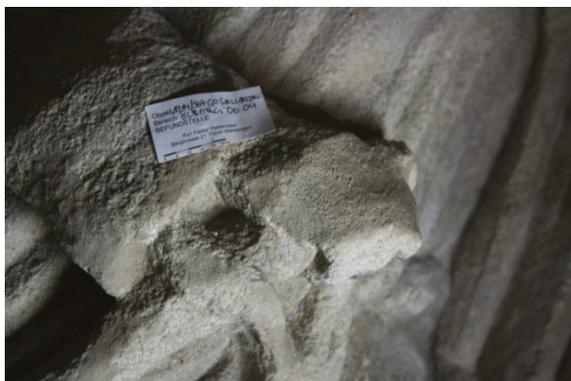


Bild 71: Bereich 06.04. Klebung, Schlusszustand



Bild 74: Gesamtansicht nach der Konservierung

4.6 Ausblick

An der akut in ihrem Bestand gefährdeten Ölberggruppe konnte mit den durchgeführten Maßnahmen, insbesondere Festigung und Schlämmung, der akute Zerfall gestoppt und ein stabiler Zustand für den weiteren Erhalt erreicht werden. Es ist nun möglich, das Objekt ohne Substanzgefährdung zu berühren und zum Beispiel eine vorsichtige Oberflächenreinigung durchzuführen. Die Salzausblühungen im Verlauf der Trocknung zur Aushärtung der Kittmasse zeigen, dass durch die bisherigen Maßnahmen keine Abdichtung der Oberfläche stattgefunden hat. Gleichzeitig weisen sie darauf hin, dass mit den erfolgten Maßnahmen nur der erste, wenn auch nicht unbedeutende Schritt eines dauerhaften Erhalts erfolgt ist.

Die nächsten Schritte zum Erhalt sind die Etablierung und Durchführung eines regelmäßigen Wartungs- und Kontrollprogramms wie sie bei vergleichbaren Konservierungsprojekten gefordert und (leider nur) zum Teil durchgeführt werden, sowie die Erstellung und Realisierung eines Klimakonzepts für die obere Kapelle zur dauerhaften Erhaltung der Ölberggruppe unter unbedingter Berücksichtigung des weiteren Bestandes an Objekten, die aus unterschiedlichen Materialien gefertigt sind und ihren eigenen Gesetzmäßigkeiten unterliegen.

Die im Verlauf des DBU-Projektes und vor allem während der Bearbeitung des Ölberg-Reliefs erfolgten Klimamessungen und Beobachtungen führten zu ersten Kriterien für ein Klima-Konzept in der Oberen Salvator-Kapelle:

Zur besseren Aushärtung der Kittmassen wurde die Luftfeuchte im Bereich der Ölberggruppe nach der Kittung und Schlämmung in begrenztem Rahmen reduziert. Bei den während des Trockenprozesses ausgetretenen Salzen handelt es sich in erster Linie um Magnesiumsulfat, ein Salz, welches bei ca. 80 % Feuchte kristallisiert. In konträrer Position hierzu stehen die nach der Bearbeitung auftretenden Schimmelbildungen in den Relieftiefen, die eine möglichst niedrige relative Feuchte nahe legen.

Im Vorraum mit mehreren polychrom gefassten Ausstattungsstücken wurde in der Zeit des jahreszeitlich bedingten Wechsels eine sehr hohe Luftfeuchte mit starker Kondensation besonders an den einfach verglasten Fenstern und der Türe festgestellt. Einher ging dieses Phänomen mit der Bildung

von Schimmelpilzen, besonders gut erkennbar als helle, dichte Auflage auf Gestühl und Türe, vereinzelt auch auf den Skulpturen. Ein Lösungsansatz ist die Aufteilung in unterschiedliche Klimazonen, die den besonderen Anforderungen der Ausstattung gerecht werden können.

Die Ölbergzone (grün) würde eine ausreichend hohe Luftfeuchte bieten, die eine Kristallisation von Salzen (unter ca. 80%) verhindert und den Feuchte-Transport vom Fels her unterbindet.

Der Durchgang zum Vorraum würde als Übergangszone zum Vorraum (rotorange) dienen. Dieser könnte in bestimmten Grenzen nach den Bedürfnissen der dort vorhandenen, zum Teil polychrom gefassten Holzobjekte klimatisiert werden.



Bild 75: Kondenswasserbildung an den Fenstern



Bild 76: Vereinfachte Darstellung der Klima-Zonen

Die Festlegung der Eckwerte ergibt sich aus den zum Teil entgegengesetzten Anforderungen der Ausstattung. Die obere Felskapelle im direkten Anschluss an die Ölbergzone kann ohne Abtrennung sicher nicht entsprechend der Anforderungen für die Ausstattungsstücke aus Holz klimatisiert werden. Hier werden die Anforderungen der Ölbergnisse die anzustrebenden Klimawerte auch für den restlichen Raum bestimmen.

Problematik Vorraum

Durch die großen Fensterflächen und deren geringen Isolierwirkung ist eine starke Beeinflussung des Raumklimas durch das Aussenklima gegeben. Besonders stark tritt dies an sonnigen Wintertagen in Erscheinung. An zwei sonnigen Tagen im Januar wurde am Messknoten in Raummitte (auf Kirchenbank) innerhalb einer Stunde eine Erwärmung von ca. 4°C auf 11°C und entsprechender Absenkung der Feuchte von ca. 92% auf 70 % gemessen.

Hier stellt sich die Frage, ob eine Reduzierung der Sonneneinstrahlung über die Winterzeit z.B. mit Hilfe eines textilen Sonnenschutzes sinnvoll wäre.

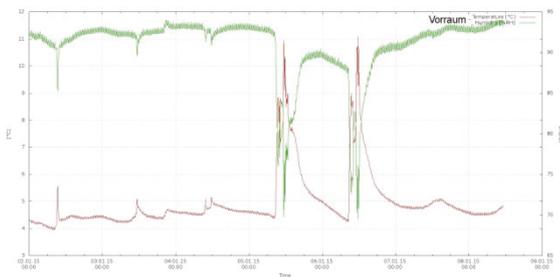


Bild 77: Messknoten Vorraum 05./06.01.2015



Bild 78: Salvator, Obere Kapelle, Vorraum, Besonnung der Holzobjekte am 19.01.2015 ca. 9:00 Uhr

4.7 Dank

Mein Dank gilt allen Projektbeteiligten, besonders aber Stefanie Scheerer und Judit Zöldfödi für die intensiven Diskussionen und die kollegiale Zusammenarbeit, die die Umsetzung am Objekt erst ermöglichten und zu einer Freude machten.

Den Vertretern von Eigner und Auftraggeber in Person von Herrn Kirchenpfleger Klaus Knödler und Herrn Münsterarchitekt Paul Waldenmaier sei gedankt für die wohlwollende Geduld und das Verständnis, dass der Zeitplan in erster Linie durch die Bedürfnisse und Eigenheiten des Objekts bestimmt wird.

Den Vertretern der Denkmalpflege, Frau Ulrike Schubart und Herrn Otto Wölbart für die kritisch wohlwollende Begleitung und fachliche Unterstützung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Münsterarchitekt A.D. Hermann Hänle, der den Salvator über viele Jahre mit der ihm eigenen behutsamen Hingabe begleitet und sich über Jahrzehnte für ein Forschungsprojekt zum Erhalt von Ölberggruppe und Felsenkapellen eingesetzt hat.

Autor

- Karl Fiedler
Restaurator
Bergstrasse 21
73550 Waldstetten
karl.fiedler.rest@online.de
<http://fiedler-restaurierung.de>

Monitoring des St. Salvators mit drahtlosen Sensornetzen

Erkenntnisse aus dem Einsatz drahtloser Sensornetze für die Dauerüberwachung historischer Bauwerke

Markus Krüger, Eric Price

Abstract: Im Rahmen des DBU-Projekts "Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator (Schwäbisch Gmünd)" in Verbindung mit der Ermittlung eines neuen Steinkonservierungsmittels zur Anwendung in nassem Umfeld wurden am St. Salvator umfangreiche Dauerüberwachungsmaßnahmen vorgenommen. Unter anderem wurden mittels eines drahtlosen Monitoringsystems während der Projektlaufzeit umfangreiche Messungen insbesondere zu den klimatischen Verhältnissen in den Kapellen des St. Salvators durchgeführt. Im vorliegenden Artikel werden die Grundlagen zur instrumentierten Dauerüberwachung mittels drahtloser Sensornetze am St. Salvator vorgestellt und die Besonderheiten diskutiert, die auch bei der Weiterentwicklung des Monitoringsystems berücksichtigt wurden. Zudem werden einige der Ergebnisse der instrumentierten Dauerüberwachung vorgestellt und diskutiert.

Keywords: Klimamonitoring, instrumentierte Dauerüberwachung, drahtlose Sensoren

1 Einleitung

Die rasant fortschreitende Entwicklung von kostengünstigen Sensortechnologien ermöglicht zunehmend eine instrumentierte Dauerüberwachung einer Vielzahl von Bauwerken. Ziel ist es hierbei, sowohl Einwirkungen aus der Umwelt, als auch direkt deren Auswirkung auf die Materialien oder die Bauwerksstrukturen zu erfassen. Ein Bauwerksmonitoring ist für verschiedene Fragestellungen interessant. Beispielsweise kann eine Beobachtung fortlaufender Bauwerksschädigungen vorgenommen werden. Es lassen sich aber auch das Tragwerkverhalten oder aber die Energieeffizienz im Hinblick auf raumklimaregulierende Maßnahmen und die Komfortbedingungen für den Nutzer bewerten. Für solche Fragestellungen ist es in der Regel erforderlich, an mehreren Messorten diverse Messparameter nicht nur zu erfassen, sondern auch zu überwachen und weiter zu analysieren. Ziel der instrumentierten Dauerüberwachung sollte es schließlich sein, eine möglichst objektive Bewertung

anhand von konkreten Messergebnissen vorzunehmen und nicht nur Messdaten in ihrer Rohform zu liefern. Im vorliegenden Beitrag wird ein Überblick über den Einsatz von Sensorsystemen und geeigneten Sensortechnologien insbesondere für den Bereich historischer Bauwerke gegeben, wobei explizit die Anwendung eines solchen Systems am Beispiel des St. Salvators diskutiert wird. Zudem wird in Grundzügen erläutert, welche Analysemöglichkeiten für die Datenauswertung im Rahmen eines Bauwerksmonitorings bestehen.

2 Instrumentierte, drahtlose Dauerüberwachung

Im Rahmen des DBU-Projekts "Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator" und den Ende des Jahres 2014 durchgeführten konservatorischen Maßnahmen war der Frage nachzugehen, wie man die vorliegende Feuchteproblematik bewerten und mit dieser zukünftig im Rahmen der präventiven Konservierung weiter umgehen soll.

Daher wurde in den Kapellenräumen ein drahtloses Monitoringsystem zur kontinuierlichen Erfassung der innen- und außenklimatischen Verhältnisse und weiterer für die Bewertung notwendigen Kenndaten installiert. Dazu gehören ein Sensor zur Erfassung der Türöffnung am Eingang der oberen Kapelle sowie weitere Sensoren zur Erfassung der Materialfeuchte im Bereich der Nische des Beichtstuhls. Zu Letzteren gehören sowohl Messungen zur relativen Luftfeuchte im Bohrloch als auch direkt in den Sandstein eingebrachte Sensoren zur Bewertung der Feuchtesituation mittels der elektrischen Impedanzspektroskopie [Lehmann 2011; Lehmann 2013].



Bild 1 Drahtloser Sensorknoten zur Materialfeuchtebestimmung mittels elektr. Impedanzspektroskopie

Für Luftausgleichsfeuchtemessungen wurden die gleichen Sensoren eingesetzt wie für die beschriebenen Luftfeuchtemessungen. Zur Ermittlung der Materialfeuchte wurden diese jedoch in bereits vorhandene Bohrlöcher eingebettet und die Bohrlöcher versiegelt, so dass keine Außenluft direkt an die Sensoren gelangen kann. Innerhalb des vorhandenen Hohlraumes stellt sich nun in Abhängigkeit von der vorliegenden Bauteilfeuchte eine Ausgleichsfeuchte im Hohlraum ein, die in der Theorie mit der tatsächlichen Materialfeuchte korreliert. In der vorliegenden Anwendung im St. Salvator wird eine konkrete Bestimmung der Materialfeuchte über Ausgleichfeuchtemessungen aufgrund der vielfältigen Störeinflüsse allerdings nicht vorgenommen. Dennoch können einige Hinweise aus der Bestimmung der Ausgleichsfeuchte gezogen werden. So kann über die gemessene relative Feuchte

in Verbindung mit der Temperaturmessung in den Bohrlöchern eine Aussage bezüglich möglicher Feuchtetransportprozesse getroffen werden. Zudem können auch anhand der Kinetik der Feuchteänderungen Hinweise auf das Vorhandensein von Salzen gefunden werden, da diese den zeitlichen Verlauf der Sorption maßgeblich beeinflussen können. Die Bestimmung absoluter Materialfeuchten ist vor diesem Hintergrund also nicht unbedingt erforderlich.

Leitfähigkeitsmessungen sind hingegen auch im überhygroskopischen Bereich der Materialfeuchte anwendbar. Bei Leitfähigkeitsmessungen wird bei einfachen Verfahren zwischen zwei eingebrachten Elektroden der elektrische Widerstand gemessen. Mit zunehmender Materialfeuchte sinkt in der Regel der Widerstand, wobei allerdings auch hier Temperatur, Salzgehalt und Salzart einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss haben können [Terheijden 2007]. Während Leitfähigkeitsmessungen mit Gleichstrom zur Bestimmung des Feuchtegehalts bei vernachlässigbar geringem Salzgehalt brauchbare Ergebnisse liefern können, besteht bei Elektrolyten wie Salzlösungen die Problematik der Polarisierbarkeit und der Ionenwanderung bei Anlegen eines elektrischen Stroms. Eine Messung mit Gleichstrom ist bei salzbelasteten Materialien daher in der Regel nicht zielführend, vielmehr bietet sich hier die Messung mit Wechselstrom an. Den frequenzabhängigen Wechselstromwiderstand eines Materials bezeichnet man dabei als elektrische Impedanz. Die Leitfähigkeit des Elektrolyten selbst wird von der Menge der darin vorhandenen Ionen, deren Wertigkeit und Beweglichkeit bestimmt [Hamann 1998].

Die Impedanz eines Natursteins ist damit im Wesentlichen abhängig von der Materialfeuchte, dem Salzgehalt, der Salzart, der Temperatur, der Porengeometrie und der Porengrößenverteilung. Obwohl die genannten Parameter jeder für sich gesehen die Impedanz in hohem Maße beeinflussen können, können über eine Betrachtung der Impedanzänderung bei gleichzeitiger Überwachung der Umgebungsbedingungen Rückschlüsse auf die Einflussfaktoren und mögliche Veränderungen gezogen werden. Es ist allerdings auch hier anzumerken, dass eine direkte Korrelation von Impedanzmessungen mit absoluten Materialfeuchten und Salzgehalten nicht zu empfehlen ist, da eine klare Trennung der sich fortlaufend ändernden Einflüsse auf die gemessenen Impedanzen – zumindest nach dem jetzigen Stand der Forschung – nicht eindeutig vorgenommen werden kann.

In der Regel wurden im 5-Minutentakt Messwerte zu den Klimadatenpaaren aus Temperatur und relativer Feuchte der Luft erfasst und über eine sternförmige Netzwerktechnologie von den batteriebetriebenen Sensoren an eine im Bereich des Altars installierte Basisstation drahtlos übertragen. Von hier aus wurden über eine GSM-Verbindung die Daten auf einen Server übermittelt und in einer Datenbank gespeichert.

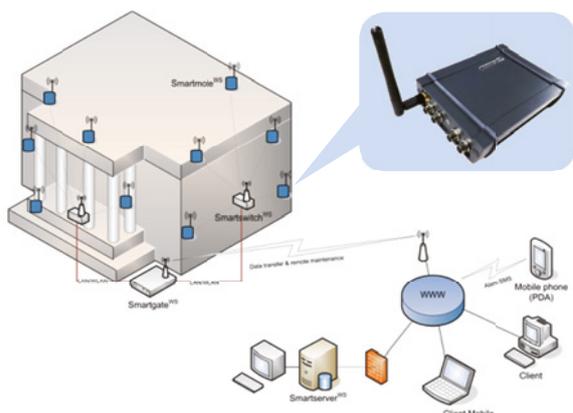


Bild 2 Prinzipielle Funktionsweise eines drahtlosen Sensornetzes (hier ein einfaches, sternförmiges Netz) für die Bauwerksüberwachung und drahtloser Sensorknoten.

Im Laufe der Untersuchungen wurden fortlaufend weitere Veränderungen am Messsystem vorgenommen, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird. Erwähnenswert ist jedoch der Umstand, dass die drahtlose Datenübertragung innerhalb der Kapelle nicht unproblematisch ist. Dies liegt an den hohen Feuchtezuständen des Sandsteins wie auch der generell hohen Luftfeuchte innerhalb der Kapelle, was eine drahtlose Datenübertragung massiv negativ beeinflusst und die Grenzen der drahtlosen Datenübertragung im Frequenzbereich von 2,4GHz aufzeigt. Zudem ist bei der Analyse insbesondere der Feuchtemessdaten über 90% RF der erzielbaren Messgenauigkeit besondere Aufmerksamkeit zu schenken, da mit messprinzipbedingten Fehlern der verwendeten Sensorik von bis zu 5% RF gerechnet werden muss. Hier zeigt sich, dass in der Messpraxis immer auch ein Kompromiss zwischen Kosten und Nutzen gefunden werden muss. Dies betrifft insbesondere die eingesetzte Sensorik, die Kriterien wie Langzeitstabilität aufweisen muss.

Mit den installierten Temperatur- und Feuchte-sensoren wird mittlerweile kontinuierlich und ohne

Batteriewechsel über einen Zeitraum von mehr als drei Jahren gemessen. Aufgrund des geringen Stromverbrauchs konnte zudem eine Restlebensdauer der Batterien eines jeden Sensorknotens von mindestens 3 weiteren Jahren prognostiziert werden. Ausnahme hiervon bilden die Sensorknoten zur Impedanzspektroskopie, bei denen die Batterielebensdauer aufgrund des erhöhten Strombedarfs für die Messdatenerfassung und Datenübertragung bei etwa einem Jahr liegt.

3 Datenvisualisierung und -analyse

Der Datenvisualisierung und der -analyse kommt im Hinblick auf den Nutzen der kontinuierlichen instrumentieren Überwachung eine besondere Bedeutung zu. Die zwei folgenden Anwendungsszenarien sind dabei zu unterscheiden:

- Echtzeitanalyse aktueller Messdaten (gegebenenfalls mit direkter Reaktion, z.B. aktive Klimaregulierung)
 - Postprocessing aufgezeichneter Messdaten über längere Beobachtungszeiträume und Bewertung
- Beide Szenarien stellen besondere Anforderungen an die einzusetzende Soft- und Hardware, da bei Langzeitüberwachungen erfahrungsgemäß immer auch fehlerhafte Messungen auftreten als auch Messdaten komplett fehlen können. Eine weitere Komplexität ergibt sich aus den in der Regel nicht zeitsynchron erfassten Datensätzen, der zeitlich unterschiedlichen Diskreditierung und der hohen Anzahl der Messdaten selbst. So ergibt beispielsweise eine Erfassung der relativen Feuchte und der Temperatur alle 5 Minuten einschließlich der notwendigen Metainformationen in einer SQL-Datenbank einen Datensatz von etwa 23 Mbyte pro Jahr und Sensor, wobei allein für die Temperatur über 100.000 Messwerte pro Jahr vorliegen. Es ist offensichtlich, dass eine rein manuelle Datenauswertung hier nicht mehr möglich ist und auch die verwendeten Softwaretools in der Lage sein müssen, mit entsprechend großen Datensätzen umzugehen.

Neben der Darstellung von Istzuständen und deren Bewertung ist ein wichtiger Aspekt des kontinuierlichen Monitorings die Identifikation und Quantifizierung von Zusammenhängen bzw. Abhängigkeiten, z.B. hinsichtlich eines Schädigungsrisikos o.ä. (siehe auch Bild 4 bzw. [Krüger 2015]).

Im Rahmen der fortlaufenden Weiterentwicklung des Monitoringsystems wurden dementsprechend Fähigkeiten zur Analyse und Datenauswertung in die Serverbasierte Applikation integriert. War es bereits vorher möglich, die abgespeicherten Rohdaten für beliebig gewählte Zeiträume abzufragen und zu visualisieren, so erlauben es die Weiterentwicklungen, diese Daten nach Bedarf und in Echtzeit zu filtern oder abgeleitete Werte zu berechnen und darzustellen.

Ein einfaches Beispiel für diese Filterung wäre etwa ein Tiefpass, um stark verrauschte Sensordaten in der Darstellung nach Bedarf zu glätten.

Die Fähigkeiten dieser Erweiterungen gehen aber weit über das Anwenden einzelner einfacher Filter hinaus. Verschiedene Algorithmen lassen sich kombinieren etwa um Fehler der Sensoren in den Rohdaten zu korrigieren, Mittelwerte aus verschiedenen Sensorquellen zu bilden und diese dann mit gesetzten Grenzwerten zu vergleichen um Sollwertüberschreitungen automatisch festzustellen.

Das Ergebnis einer solchen vollautomatischen Analyse kann sowohl dargestellt oder zur weiteren Verarbeitung heruntergeladen werden, als auch automatisiert in Intervallen auf die jeweils aktuellsten Messwerte angewandt werden, um etwa automatische Alarmmeldungen zu generieren und bei Bedarf per Email zu versenden.

Auch abgeleitete Werte sind so darstellbar. Mit den Erweiterungen ist es zum Beispiel möglich, die Messwerte für Temperatur und relative Feuchte naheliegender Sensoren zu kombinieren und daraus den absoluten Feuchtegehalt zu berechnen und darzustellen.

Eine andere Anwendung dieser Erweiterungen erlaubt eine Visualisierungsdarstellung verschiedener Sensoren gegeneinander um eventuelle Korrelationen sichtbar zu machen. Dabei werden die Daten automatisch und für den Nutzer unsichtbar abgeglichen und bei Bedarf interpoliert, so das dies selbst dann funktioniert, wenn die Sensoren zu unterschiedlichen Zeitpunkten und mit unterschiedlichen Messintervallen aufgezeichnet haben.

Die genannten Beispiele stellen nur einen kleinen Auszug der möglichen Analysen und Darstellungsformen dar. Weitere Analysen der aufgezeichneten Daten können jederzeit über einen Webbrowser vorgenommen werden. Der Zugriff erfolgt passwortgeschützt unter folgendem Link (Zugangsdaten für Projektbeteiligte können in Absprache mit dem Eigentümer unter *info@smartmote.de* angefragt werden):

- <http://www.smartmote.net/neptun>



Bild 3 Darstellung der Sensorpositionen zur Messung der Klimadaten im Bereich der oberen Kapelle (Auszug der webbasierten Online-Visualisierung mit Sensorpositionen und aktuellen Messwerten am Objekt).

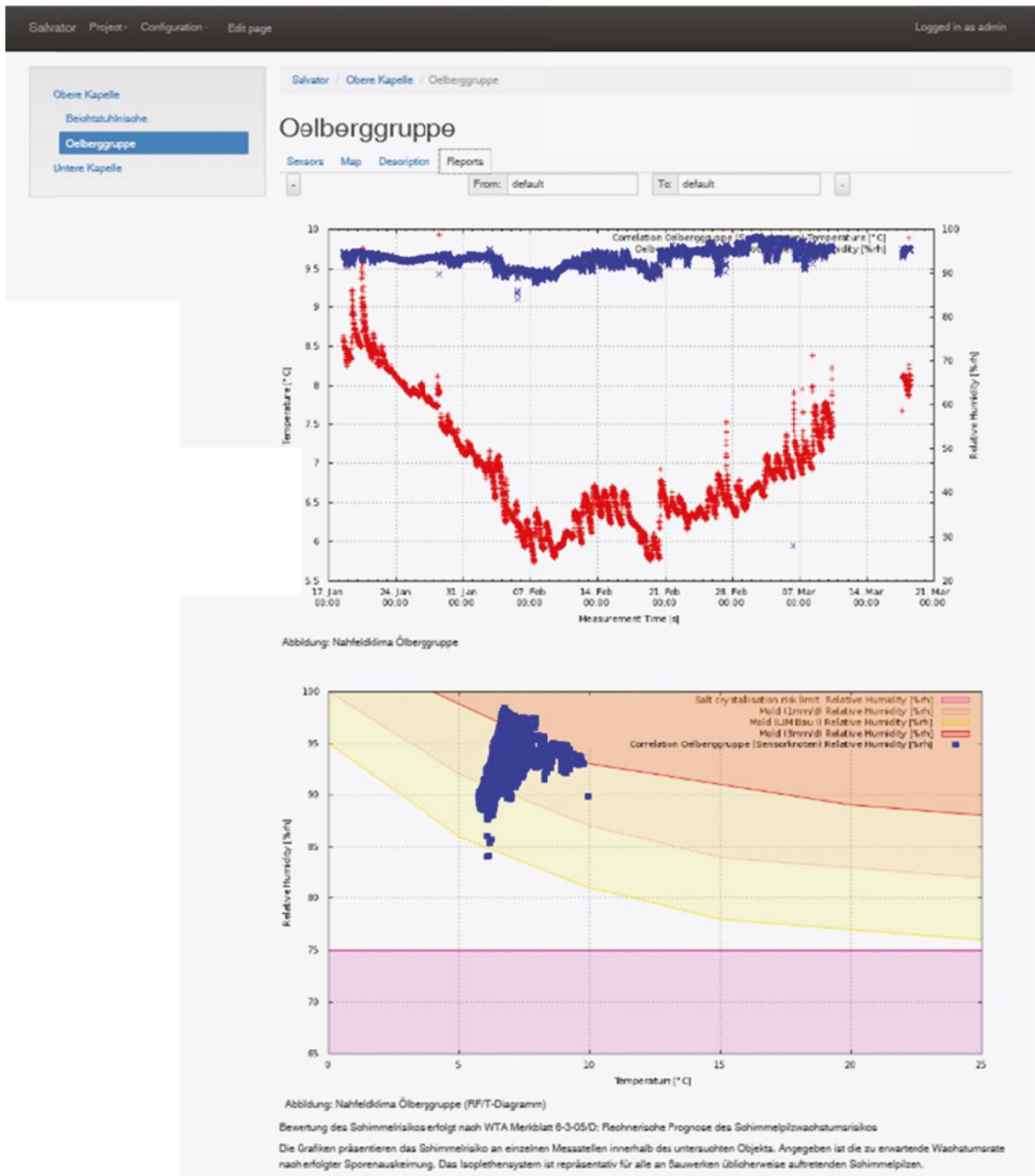


Bild 4 Screenshot einer Online-Visualisierung (Automatisiert generierter Report mit Risikobewertung hinsichtlich der innenraumklimatischen Verhältnisse im Bereich der Öberggruppe)

4 Klimasituation am St. Salvator von 2012 bis 2014

Bild 5 zeigt die Temperaturverläufe im Außenbereich (Fensterbrüstung Kanzel, vgl. Bild 3) als 30-Tage-Mittelwert wie auch die Temperaturen im

Nahfeldbereich an Kanzeltürwand innen sowie direkt an der Öberggruppe für den Zeitraum 2012 bis 2014. Tageszeitbedingt ergeben sich im Außenbereich erwartungsgemäß höhere Temperaturschwankungen, die durch die Mittelung über 30 Tage nicht mehr im Diagramm erkennbar sind. Gut zu erkennen ist jedoch, dass sich die Temperaturen im Innenraum stark an der mittleren Außentemperatur orientieren.

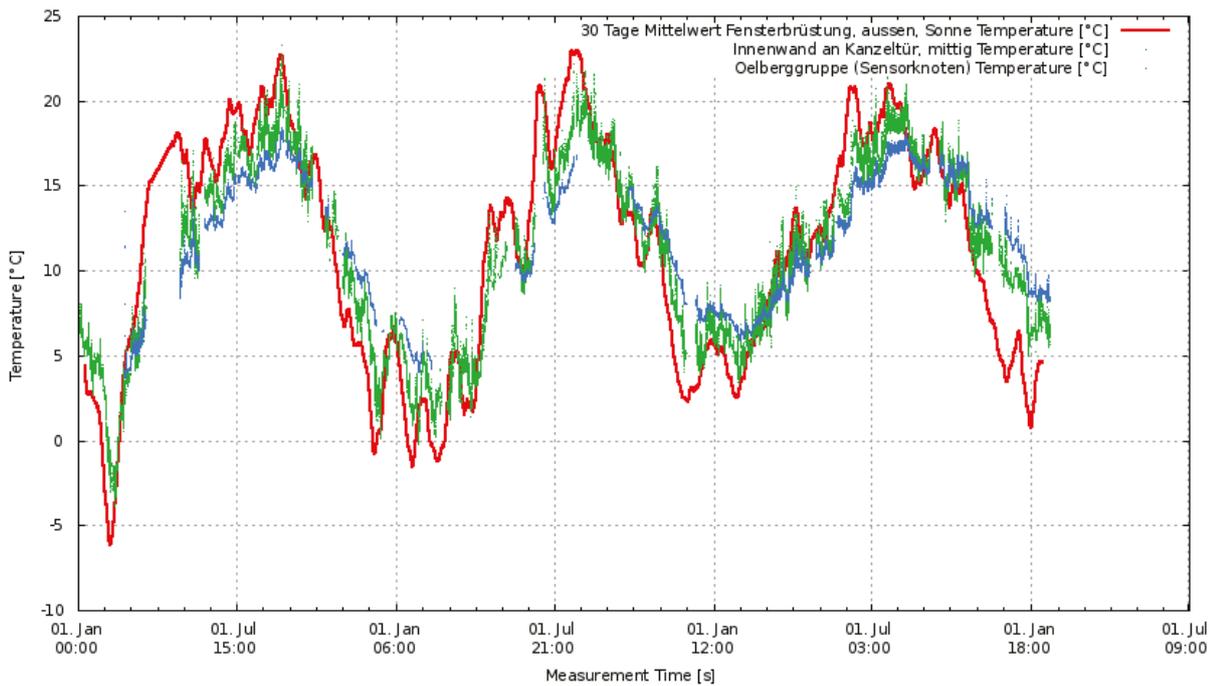


Bild 5 Temperaturverlauf innen im Bereich der Kanzeltür und an der Ölberggruppe sowie das 30-Tage-Mittel im Außenbereich zwischen Januar 2012 und Dezember 2014.

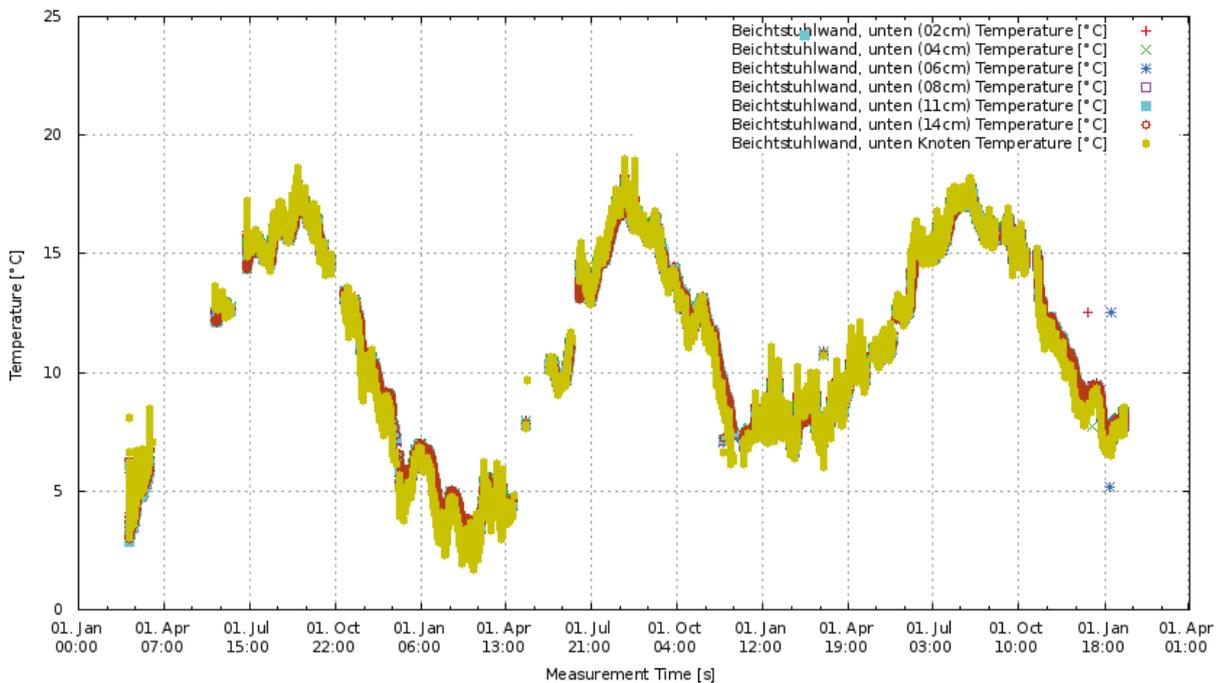


Bild 6 Tiefengestaffelte Temperaturmessungen im unteren Bohrloch in der Beichtstuhlwand (Zeitraum 2012 bis 2014)

Betrachtet man im Detail die Temperaturen innen im Bereich der Kanzeltürwand und an der Ölberggruppe, so fällt auf, dass aufgrund der Orientierung der Ölberggruppe zum Fels hin die Temperaturschwankungen dort gegenüber dem Bereich der Außenfassade erwartungsgemäß geringer sind.

Die in den Bohrlöchern im Bereich der Beichtstuhlnische durchgeführten Temperaturmessungen zeigen, dass über die Tiefe eine relativ homogene Temperaturverteilung vorliegt (vgl. Bild 6). Dabei unterliegen die Temperaturen der Wand wiederum vorwiegend jahreszeitlichen Schwankungen und

werden nur wenig vom Tagesgang beeinflusst. Sowohl im Bereich der Beichtstuhlnische als auch im Bereich der Ölberggruppe sind die Temperaturen relativ gleich.

Auffällig sind die erhöhten Tiefsttemperaturen in dem milden Winter 2013/2014. Dabei sind die leicht höheren Temperaturen in der oberen Kapelle offensichtlich nicht auf die Vorgabe zur permanenten

Türschließung zurückzuführen, sondern rein auf die Änderung der Außentemperaturen (vgl. auch hier Bild 5). Die gegenüber dem Außenklima erhöhten Innenraumtemperaturen im November und Dezember 2014 sind auf die maschinelle Klimatisierung des Bereiches der Ölberggruppe zurückzuführen, die im Rahmen der Festigungsmaßnahme vorgenommen wurde.

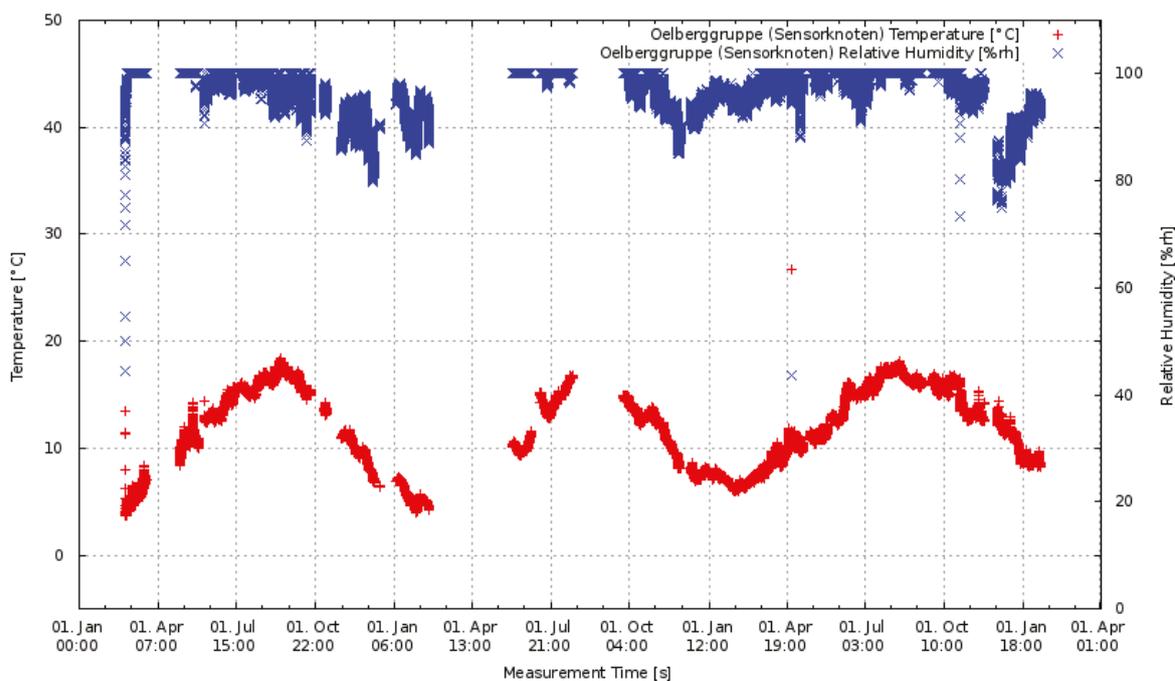


Bild 7 Temperatur und Feuchtigkeitsverlauf direkt am Ölberg zwischen Januar 2012 und Dezember 2014

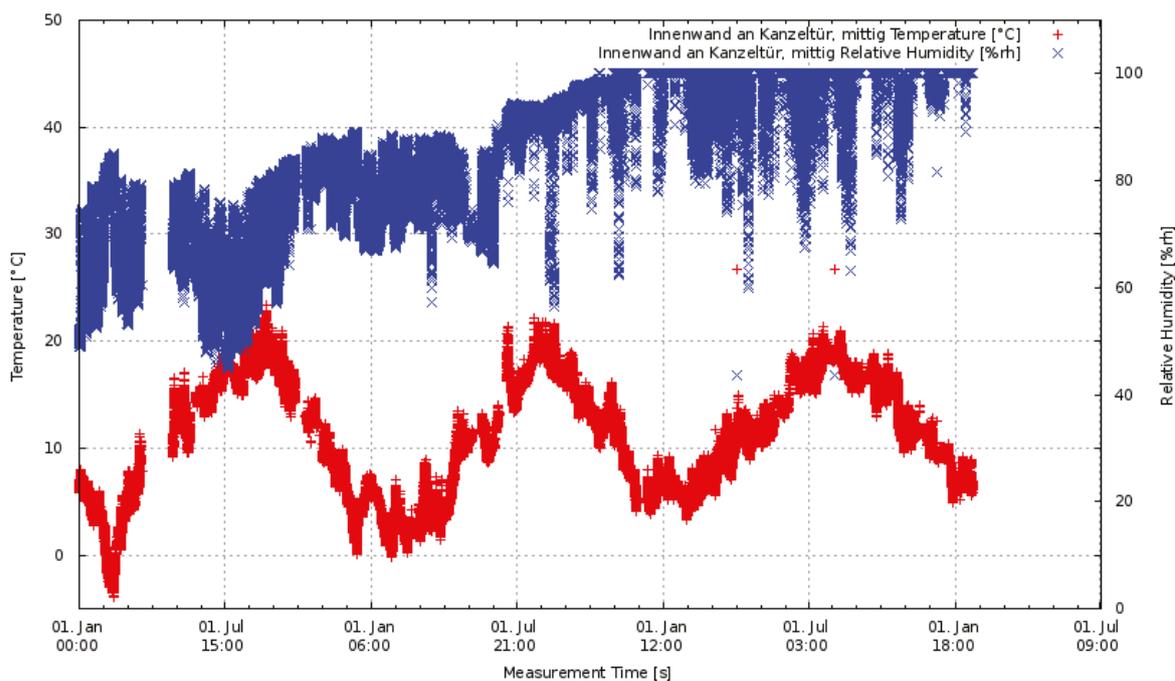


Bild 8 Temperatur- und Feuchtigkeitsverlauf innen im Bereich der Kanzeltür zwischen Januar 2012 und Dezember 2014.

Besonderheiten ergeben sich nachfolgend allerdings bei der Betrachtung der Feuchtwerte über den Zeitraum von 2012 bis 2014 (siehe hierzu Bild 7 und Bild 8). Wie in Bild 7 zu erkennen ist, liegt im Nahfeld der Ölberggruppe die relative Feuchte über die Jahre hinweg gesehen über 80% RF, wobei insbesondere auch die Feuchteminderung durch die im November und Dezember 2014 durchgeführte maschinelle Klimatisierung erkennbar ist.

Demgegenüber stellt sich die Situation im Bereich der Innenwand an der Kanzeltür anders dar. Während im Jahr 2012 die Feuchte noch in einem Bereich zwischen etwa 50% bis hin zu etwa 90% lag, hat sich dies im Laufe des Jahres 2013 und insbesondere 2014 zu höheren Feuchtegehalten hin verlagert, wobei einzelne, kurzzeitige signifikante Feuchtereduktionen durch eine vermehrte Öffnung der Eingangstür zu verzeichnen sind.

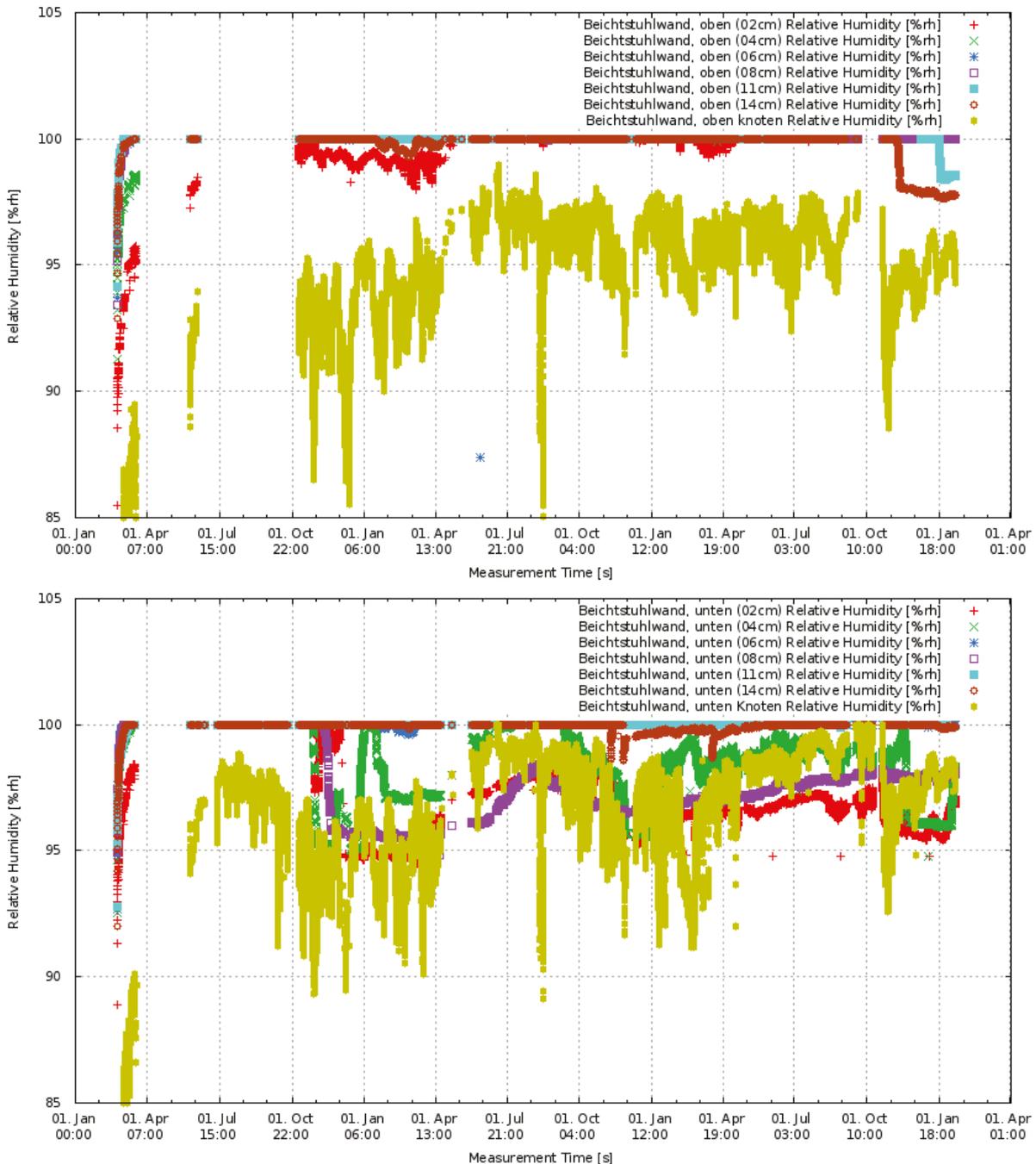


Bild 9 Tiefengestaffelte Feuchtemessungen im oberen und unteren Bohrloch in der Beichtstuhlwand (Zeitraum 2012 bis 2014)

Bild 9 zeigt die Ergebnisse der tiefengestaffelten Feuchtemessungen in den vorhandenen Bohrlöchern an der Seitenwand der Beichtstuhlnische. Nach einer anfänglichen Akklimatisierung ist festzustellen, dass die Bohrlochfeuchte in den verschiedenen Tiefen in beiden Bohrlöchern zwischen etwa 95% und 100% schwankt. Es ist daher, wie zunächst erwartet, in der Regel von einem überhygroskopischen Feuchtezustand im Stein auszugehen, in dem nicht nur der Feuchtetransport maßgeblich durch Kapillartransport stattfindet sondern auch der Salztransport, wobei die meisten der vorhandenen Salze durchgehend in gelöster Form vorliegen dürften (ausgenommen hiervon ist Gips). Auffällig ist jedoch auch, dass im oberen Bohrloch häufiger Feuchtegehalte von 100% RF gemessen wurden als im unteren Bohrloch. Dieser Umstand könnte darauf zurückzuführen sein, dass sich in der Wand unten Salze in höherer Konzentration (bzw. auch eine Variation des Salzsystems) in der Porenlösung befinden als oben und durch (den sich einstellenden unterschiedlichen Dampfdruck) niedrigere Ausgleichsfeuchten im Stein vorliegen. Eine eindeutige Interpretation ist hier aufgrund der eingeschränkten Messgenauigkeit der eingesetzten Sensorik und der Unklarheit über die tatsächlich vorliegenden Salzkonzentrationen allerdings nicht möglich. Auffällig ist bei den Messungen im oberen Bohrloch aber auch, dass im Zuge der maschinellen Klimatisierung (ab November 2014) die Feuchte im Bohrloch in einer Tiefe von zunächst 14 cm und anschließend in einer Tiefe von 11 cm absinkt. Die primär auf die Ölberggruppe gerichtete Entfeuchtung wirkt sich demnach bereits relativ schnell auch auf die Feuchte tiefer im Stein aus.

5 Zusammenfassung

Funkbasierte Messsysteme ermöglichen es, physikalische, mechanische und witterungs- bzw. raumklimabedingte Einwirkungen an Bauwerken zu erfassen. Werden die Messdaten genutzt um eine Zustandsbewertung der aktuellen Bauwerksverhältnisse vorzunehmen, lassen sich kritische Bauwerkszustände, die zu einer Schädigung der Bausubstanz führen können, identifizieren und quantifizieren.

Kann mittels Monitoring ein kritischer Grenzzustand festgestellt werden, bietet es sich an, den Nutzer, Betreiber und/oder Eigentümer auf die besonderen Verhältnisse mittels echtzeitnaher Visualisierung, SMS, Mail o. ä. hinzuweisen. Vorteilhaft ist es dabei, wenn die Informationen des Sensornetzes zur Er-

kundung der Bauwerksverhältnisse unmittelbar genutzt würden, um zeitnah auch solche Aktivitäten anzustoßen, mit denen der eigentlichen Ursache der Beanspruchung wirksam entgegnet werden kann. Mit einer rechnergestützten Analyse der Messwerte und einer Bewertung der Auswirkungen können dann auch geeignete Aktionen initiiert werden. Dies könnten z.B. Regelstrategien zur Klimastabilisierung sein, anhand derer die Raumluftverhältnisse in einer denkmalverträglichen und kontrollierten Weise optimiert werden können.

6 Literaturreferenzen

- [Hamann, 1998] Hamann, C.H.; Vielstich, W.: Elektrochemie. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 1998. ISBN 978-3-527-27894-7.
- [Krüger 2015] Krüger, M.: Klimakonzeption zur präventiven Konservierung des St. Salvators. In: J. Frick, J. Zöldföldi (Hrsg.) DBU-Projekt: „Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd. Fraunhofer IRB Verlag, 2015, S. 133-143
- [Lehmann 2011] Lehmann, F., Krüger, M.: Wireless impedance measurements to monitor moisture and salt migration in natural stone. In: M. Krüger (ed.), Cultural Heritage Preservation, European Workshop on Cultural Heritage Preservation, Berlin. Fraunhofer IRB Verlag, pp. 224-231.
- [Lehmann 2013] Lehmann, F., Martínez Garrido, M.I., Krüger, M.: On the advance of impedance measurements for monitoring moisture in sandstone. In: A. Troi, E. Lucchi (ed.), Cultural Heritage Preservation, 3rd European Workshop on Cultural Heritage Preservation, Bozen. Felix Verlag editrice, pp. 259-264.
- [Terheiden 2007] Terheiden, K.: Feuchte- und Salztransport: Charakterisierung der Interaktion zwischen Porenfluid und porösem Bauwerkstoff. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2007. ISBN 978-3-86727-455-5.
- [Zöldföldi, 2015] Zöldföldi, J. et al.: St. Salvator - Materialtechnische Analysen am Stübensandstein der Ölberggruppe. In: J. Frick, J. Zöldföldi, J. (Hrsg.) DBU-Projekt: „Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd. Fraunhofer IRB Verlag, 2015, 93-103

Autoren

- Krüger, Markus
TTI GmbH - TGU Smartmote
Pfaffenwaldring 2b
70569 Stuttgart
krueger@smartmote.de
- Price, Eric
TTI GmbH - TGU Smartmote
Pfaffenwaldring 2b
70569 Stuttgart
price@smartmote.de

St. Salvator – Materialtechnische Analysen am Stubensandstein der Ölberggruppe

Naturwissenschaftliche Untersuchungen zu Festigungsmaßnahmen

Judit Zöldföldi, Jörg Bowitz, Friedrich Grüner, Sara Larisch

Abstract: Das 1620 von Kaspar Vogt geschaffene Ölberg Relief ist bis auf einzelne Ergänzungen aus dem anstehenden, hellen, grau-gelblichen, teilweise rötlichen, mittel bis grobkörnigen Stubensandstein gearbeitet. Grundvoraussetzung für die Musterkonservierung waren systematische materialtechnische Untersuchungen am Stubenssandstein neben der Erfassung von Schadenspotentialen aus klimatischen, hydrogeologischen, mikrobiellen und nutzungsbedingten Belastungen des Objekts. Mit zerstörungsfreien und minimalinvasiven Methoden wurden Materialkennwerte, wie Feuchte- und Salzbelastung vor Ort ermittelt. Weiterführende Untersuchungen unter Laborbedingungen wurden an Probenmaterial aus den niedergeteufte Bohrungen und an den Musterflächen entnommenen Bohrkernen durchgeführt.

Keywords: Stubensandstein, Feuchte, Salze, Polarisations- und Rasterelektronenmikroskopie, Porosität, Wasserdampfdiffusionswiderstand, kapillare Wasseraufnahme, NIR-Spektroskopie

1 Stubensandstein

Das im Jahr 1620 von Kaspar Vogt geschaffene Ölberg Relief ist bis auf einzelne Ergänzungen aus dem anstehenden, hellen, grau-gelblichen, teilweise rötlichen, mittel bis grobkörnigen Oberen Stubensandstein (km4) des Mittleren Keupers gearbeitet (Bild 1).

Die mikroskopischen Aufnahmen zeigen, dass es sich beim anstehenden Gestein um einen Stubensandstein handelt, welcher überwiegend tonig, kaolinitisch gebunden ist. Die Quarz-Quarz Kontakte sind rar, was zu dem bekannten Schadensbild führt. Der Sandstein besteht überwiegend aus monokristallinen Quarzen, selten polykristallinen Quarzen, Feldspäte (weitgehend verwittert), Kaolinit und Glimmer. Baryt kommt in kleinen Mengen, aber häufig vor. Ein fortschreitender Verlust der originalen Oberflächen ist festzustellen [Fiedler, 2015].



Bild 1 Die St. Salvator Kapellen in Schwäbisch Gmünd

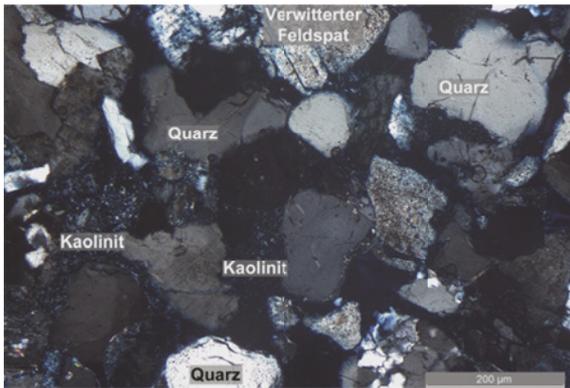


Bild 2 Dünnschliffaufnahme vom kaolinitisch gebundenem Stubensandstein

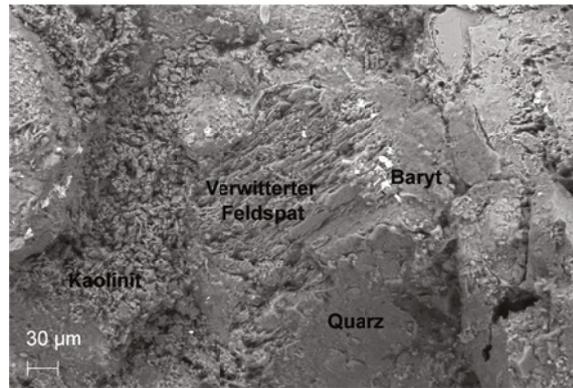


Bild 3 REM-Aufnahme vom kaolinitisch Stubensandstein mit verwitterten Feldspäten und Barytpartikeln

2 Porosität

Mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie und der Dünnschliffmikroskopie in Kombination mit Bildanalyse wurde der Porenraum der Stubensandsteinproben untersucht. Die Quecksilberdruckporosimetrie zeichnet sich durch einen sehr großen Messbereich von ca. 3 nm bis 950 µm aus. Mit Quecksilberdruckporosimetrie sind der Mikroporen- und fast der gesamte Mesoporenbereich erfassbar.

Dem Porenvolumen entspricht die bei einem bestimmten Druck intrudierte Menge an Quecksilber, während der Porengrößenverteilung eine Druckabhängigkeit von der gefüllten Porengröße zugrunde liegt. Bild 4 und Bild 5 zeigen, dass der Großteil der Poren eine Porenweite von ca. 20-40 µm aufweist und eine Inhomogenität in Abhängigkeit von der Tiefe kaum vorhanden ist.

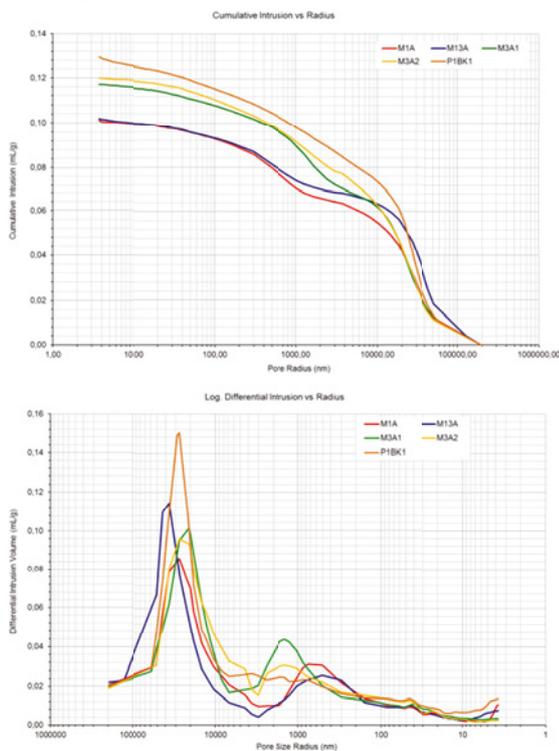


Bild 4 Kumulative Intrusionskurve (oben) mit der daraus abgeleiteten Porengrößenverteilung (unten)

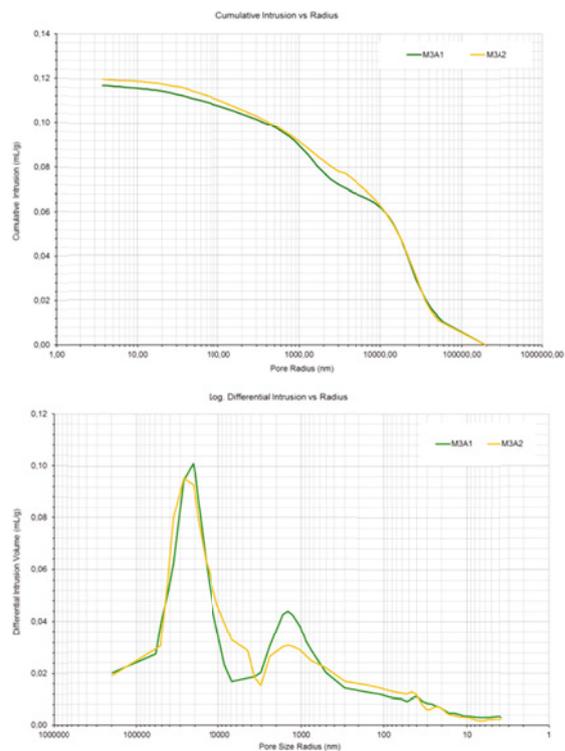


Bild 5 Kumulative Intrusionskurve (oben) und Porengrößenverteilung (unten) im Musterfeld 3, ohne Festigung, in verschiedenen Tiefen.

3 Materialfeuchte

Materialfeuchtemessungen im Innern der beiden Kapellen (Bild 6) erfolgten von Zeit zu Zeit mit Time Domain Reflectometry (Mikrowellen Laufzeit Reflektionsmessung, Messgerät: TRIME FM der Firma IMKO Elektronik, Stacheder, 1996) im Hochfrequenzbereich (Gigahertz). Bei dieser Messmethode beeinflusst der Wassergehalt vor allem die Signallaufzeit und der Salzgehalt die Amplitude der Signale. Erfasst werden oberflächennahe Bereiche bis etwa 5 cm Tiefe. Bei bekannter Rohdichte wird die Feuchtigkeit in Masse-% ausgegeben (Bild 7). Die Dämpfung der Signalamplitude ergibt eine Information über den Salzgehalt (Bild 8). Ohne Salze beträgt die Dämpfung etwa 65 Skalenteile. Dieser Wert verringert sich in Gegenwart von Salzen. Die Messwerte zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Oberen Kapelle zeigen an allen Profilen, dass im Sommer 2013 im Vergleich zu den Werten von 2012 die Materialfeuchte deutlich anstieg (orangene und rote Linien), danach wieder sank (hellblaue Linien). Die niedrigen Amplituden im Profil 2 nach der Festigung deuten darauf hin, dass sich die Salze in der angebrachten Schlämme akkumuliert haben.

Zusätzlich zu zerstörungsfreien und minimalinvasiven Untersuchungen konnten an Musterflächen für die Erprobung des Festigungsmittels mehrere Bohrkern für tiefengestaffelte Untersuchungen entnommen werden. Die Musterflächen befinden sich im Bereich des Beichtstuhls, an der linken Seitenwand der Nische vor der Ölbergdarstellung und sind normalerweise vom Beichtstuhl verdeckt (Bild 9). Die Musterflächen wurden in zwei Höhen (150-170 cm und 180-200 cm vom Bodenniveau, Bild 10) mit jeweils 4 Feldern angelegt. Dieser Bereich zeigte die stärkste Salzbelastung. Im Bereich der Musterflächen wurden zu verschiedenen Zeiten Bohrkern (Durchmesser 20 und 35 mm) gezogen. Materialfeuchte und Salzkonzentration wurden im Tiefenprofil wurden (Tabelle 1 bis 3). Die Ergebnisse vom Mai 2012 zeigen, dass der Stubensandstein in der Kapelle einen sehr hohen Feuchtegehalt aufweist; 3,66 bis 4,85 Masse-% entsprechen etwa 30 bis 50 % Durchfeuchtungsgrad. Zur Oberfläche hin nimmt der Feuchtegehalt ab, was auf eine Phase der Austrocknung zu diesem Zeitpunkt hinweist. Nach der anhaltenden Regenperiode im Frühjahr 2013 stieg der Durchfeuchtungsgrad auf bis zu 80 % (Bohrkernentnahme im Juni und August 2013, Tabellen 2-3) an. Aus diesem Grund, konnten die Fes-

tigungsmaßnahmen nicht wie geplant im Frühjahr 2013, sondern erst 2014 durchgeführt werden.



Bild 6 Messprofile mit dem TDR Messgerät in der Oberen Kapelle (Foto: Landesamt für Denkmalpflege im RP Stuttgart, Felix Pilz).

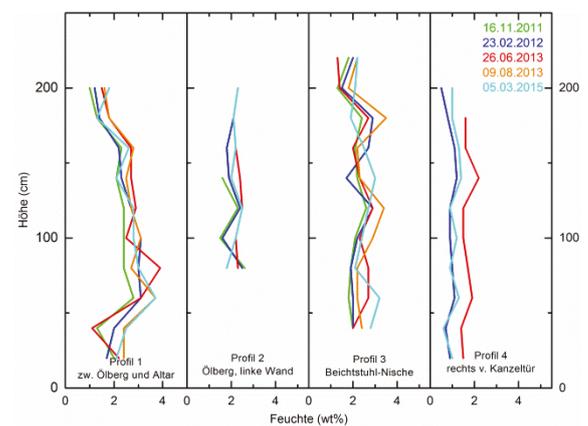


Bild 7 Feuchtemessungen mit dem TDR Messgerät in 4 Profilen in der Oberen Kapelle

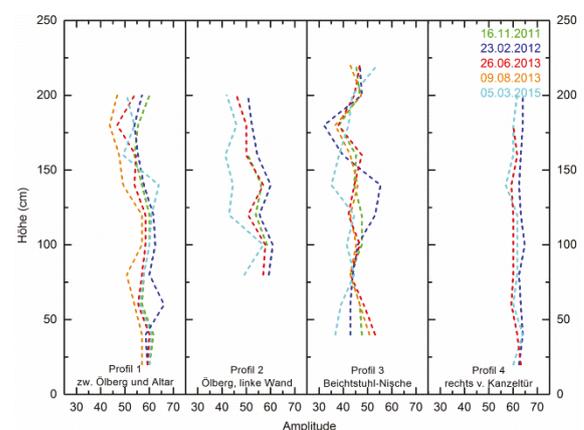


Bild 8 Amplituden der TDR-Messungen in der Oberen Kapelle



Bild 9 Musterflächen für weiterführende Materialanalysen und für die Erprobung der Festigungsmittel

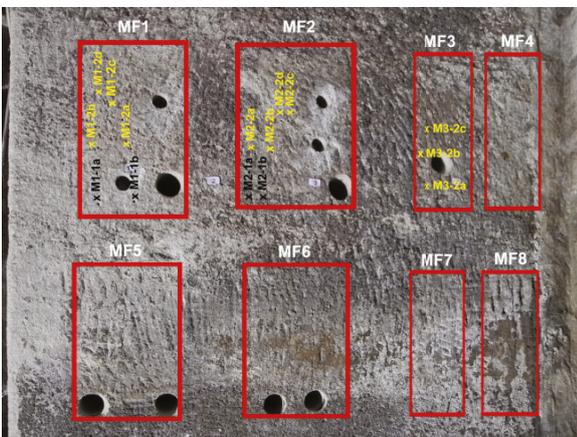


Bild 10 Anordnung der Musterflächen in der Beichtstuhlnische

Tabelle 2: Feuchtegehalte mittels Darmmethode in Abhängigkeit von der Tiefe (26.06.2013)

Probenentnahme am 26.06.2013			
Bohrkern	Tiefe (cm)	Gewichtsverlust (%)	Durchfeuchtungsgrad (%)
MF1BK136			
MF1BK136/1	0-3	3,70	49
MF1BK136/2	3-6	3,88	52
MF1BK136/3	6-9,05	4,02	54
MF1BK136/4	9,5-12,5	4,01	54
MF1BK136/5	12,5-16	4,13	55
MF1BK136/6	16-18	4,58	61
MF2BK136			
MF2BK136/1	0-2,5	4,78	64
MF2BK136/2	2,5-5	4,49	60
MF2BK136/3	5-7	3,78	50
MF2BK136/4	7-10,5	4,80	64
MF2BK136/5	10,5-13,5	4,16	55
MF2BK136/6	13,5-16,5	4,42	59
MF2BK136/7	16,5-20,5	4,19	56
MF3BK136			
MF3BK136/1	0-3	4,59	61
MF3BK136/2	3-6	5,39	72
MF3BK136/3	6-9	5,25	70
MF3BK136/4	9-11	5,16	69
MF3BK136/5	11-14	5,02	67
MF3BK136/6	14-15	5,39	72
MF3BK136alt			
MF3BK136alt/1	10-12,5	4,86	65
MF3BK136alt/2	12,5-16	4,57	61
MF9Blanko136			
MF9BK136/1	0-1	4,56	61
MF9BK136/2	1-2,5	5,13	68
MF9BK136/3	2,5-4	5,09	68
MF9BK136/4	4-5	4,61	62
MF9BK136/5	5-8	6,10	81
MF9BK136/6	8-9,5	5,98	80
MF9BK136/7	9,5-13	5,86	78

Tabelle 1: Feuchtegehalte mittels Darmmethode in Abhängigkeit von der Tiefe (08.05.2012)

Probenentnahme am 08.05.2012			
Bohrkern	Tiefe (cm)	Gewichtsverlust (%)	Durchfeuchtungsgrad (%)
SBK5/1			
SBK5/1/1	0-2,5	3,81	42
SBK5/1/2	2,5-5,5	4,22	47
SBK5/1/3	5,5-12,5	4,38	49
SBK5/2			
SBK5/2/1	0-2	3,66	41
SBK5/2/2	2-4	4,85	54
SBK5/2/3	4-13	4,31	48
SBK6/1			
SBK6/1/1	0-3,5	3,17	35
SBK6/1/2	3,5-8	4,32	48
SBK6/1/3	8-11,5	4,45	48
SBK6/2			
SBK6/2/1	0,1-1,5	4,01	45
SBK6/2/2	1,5-4	4,14	46
SBK6/2/3	4-12	4,47	49

Tabelle 3: Feuchtegehalte mittels Darmmethode in Abhängigkeit von der Tiefe (08.09.2013)

Probenentnahme am 08.09.2013			
Bohrkern	Tiefe (cm)	Gewichtsverlust (%)	Durchfeuchtungsgrad (%)
MF11/139/2			
MF11/139 2/1	0-2	2,43	32
MF11/139 2/2	2-6	1,01	14
MF11/139 2/3	6-10	5,14	69
MF11/139 2/4	10-16	2,08	28
MFA20/139 1			
MFA20/139 1/1	0-2	3,60	48
MFA20/139 1/2	2-4	6,64	88
MFA20/139 1/3	4-6,5	4,20	56
MFA20/139 1/4	6,5-10	4,54	60
MFA20/139 1/5	10-14	4,52	60
MFA20/139 1/6	14-18	4,54	60
MF10/139 1			
MF10/139 1/1	0-2	5,07	68
MF10/139 1/2	2-4	4,94	66
MF10/139 1/3	4-7	4,74	63
MF10/139 1/4	7-10,5	5,07	68
MF10/139 1/5	10,5-14	4,78	64
MF10/139 1/6	14-16	4,71	63
MF10/139 1/7	16-18	4,07	54

3.1 Salzbelastung

An wässrigen Eluaten von Bohrkernen der Musterflächen wurde tiefengestaffelt die Salzkonzentration mit Hilfe der Ionenchromatographie ermittelt (Tabelle 4). Es sind hauptsächlich Sulfate neben geringeren Mengen an Nitraten vorhanden. Der Salzgehalt steigt zur Oberfläche hin an.

Die schwarze Kruste auf der Oberfläche besteht vorwiegend aus Gips mit darauf liegenden Schmutz- und Rußpartikeln, was die Röntgenbeugungs- und REM-Untersuchungen zeigten.

Tabelle 4: Salzgehalte (Ionenchromatographie an wässrigen Eluaten) in Abhängigkeit von der Tiefe

Bohrkern	Tiefe (cm)	Cl ⁻ (Masse-%)	NO ₃ ⁻ (Masse-%)	SO ₄ ²⁻ (Masse-%)
SBK5/1	0-1	0,02	0,16	0,44
	1-2,5	0,01	0,22	0,01
	2,5-3	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	3-5	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	5,5-7	< 0,01	< 0,01	< 0,01
SBK5/2	10,5-12,5	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	0-1	0,01	0,07	0,44
	1-2	< 0,01	0,04	0,02
	2-3	< 0,01	0,04	< 0,01
	3-4	< 0,01	0,02	< 0,01
	4-6	< 0,01	0,01	< 0,01
SBK6/1	11-13	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	0-1,5	< 0,01	0,04	0,13
	1,5-3,5	< 0,01	0,02	0,01
	3,5-5,5	< 0,01	0,01	< 0,01
SBK6/2	9-11	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	0,1-0,2	0,01	0,09	3,10
	0,2-1,5	< 0,01	0,03	0,09
	1,5-3	< 0,01	0,02	0,01
	3-4	< 0,01	0,01	< 0,01
	4-6	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	10-12	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Um großflächig Informationen zur Verteilung der Salze zu erhalten, wurde ein zerstörungsfreies Verfahren basierend auf der Reflexionsspektroskopie im Nahen Infrarot (NIR-Spektroskopie) erprobt. Mittels eines mobilen Infrarot-Spektrometers wurde die diffuse Reflexion im Bereich 800 bis 2500 nm detektiert. In diesem Bereich liegen Oberton- und Kombinationsschwingungen der Grundschwingungen von kovalenten Molekülbindungen des mittleren Infrarot (MIR). Auf Grund der höheren Energie des nahen infraroten Lichts im Vergleich zum mittleren Infrarot und der geringeren Absorptionskoeffizienten ergibt sich eine größere Eindringtiefe (Millimeter statt Mikrometer) und ermöglicht damit eine einfache und zerstörungsfreie Messung in

diffuser Reflexion. Im NIR-Bereich können u. a. Tonminerale, Sulfate, Hydroxide und Karbonate schnell und unmittelbar vor Ort bestimmt werden [Bowitz J. & Ehling A 2008, 2010]. Zusätzlich ist die Identifikation von Ergänzungsmassen möglich.

In St. Salvator wurden mehr als hundert Einzelmessungen in der Oberen Kapelle, vor allem im Bereich des Ölbergreliefs, durchgeführt (Bild 11). Die Auswertung der erzeugten Reflexionsspektren erfolgt durch Vergleich mit digitalen Spektrenbibliotheken, die speziell für die Untersuchung von Salzen auf Sandsteinen zusammengestellt wurden. Dabei ist zu beachten, dass es bisher kaum Erfahrungen, sowohl mit der qualitativen als auch mit der quantitativen Salzanalyse mittels NIR-Spektroskopie gibt. Eine besondere Schwierigkeit in St. Salvator bestand in der starken Durchfeuchtung des Sandsteins, welche zu starken Wasserbanden im NIR-Spektrum führte. Es konnten Gips, Magnesium- und Natriumsulfate, sowie in wenigen Bereichen auch Chloride und Karbonate identifiziert werden. Die Ergänzungsmassen erwiesen sich größtenteils als zement- oder gipshaltig. Da die Kapelle und auch das Relief der Ölbergdarstellung direkt aus dem anstehenden Fels herausgearbeitet wurden, konnten die speziell für Sandsteine entwickelten Referenzspektren mit den für Sandsteine charakteristischen Tonmineralen benutzt werden. Zu diesen Referenzspektren wurden Spektren von bauschädlichen Sulfaten, Nitraten und Chloriden hinzugefügt. Anschließend wurden die Mineral- und Salzgehalte mit dem vom Hersteller des eingetzten Spektrometers (PIMA) entwickelten Analyseprogramm (PimaView) berechnet.

Es muss noch einmal deutlich betont werden, dass die Zuverlässigkeit von Salzanalysen mittels NIR-Spektroskopie unbedingt mit anderen Methoden validiert werden muss. Daher sind die vorliegenden Ergebnisse als Hinweise zu verstehen. Eine Ausnahme stellt die Analyse von Gips dar. Aufgrund der sehr charakteristischen Reflexionsbanden von Gips ist dessen Bestimmung als vertrauenswürdig einzustufen. Eine Bestätigung der Ergebnisse erfolgte jedoch kurz nach den Festigungsmaßnahmen, als im Bereich der Waden der Soldaten Salzausblühungen erschienen, die als Magnesium-Sulfate identifiziert werden konnten, wie sie bereits zuvor in den IR-Spektren ermittelt wurden. Diese Salze sind leicht löslich. Die durchgeführte Festigung und die aufgetragene Schlämme verursachte einen spürbaren Wassereintrag und die darauf folgende Trocknung förderte die Salze an die Oberfläche.



Bild 11 Analysenpunkte der zerstörungsfreien NIR-Messungen am Ölberg [Dokumentationsgrundlage: Landesamt für Denkmalpflege im RP Stuttgart, Felix Pilz].

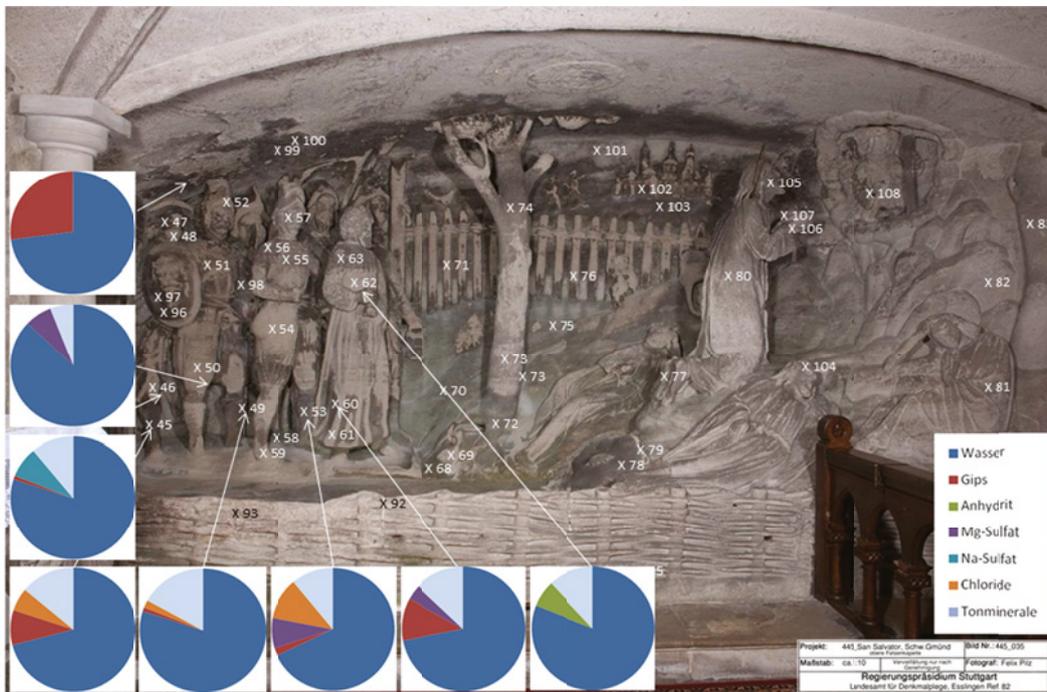


Bild 12 Beispiel für die Auswertungen der IR-Messungen an den figürlichen Darstellungen. [Dokumentationsgrundlage: Landesamt für Denkmalpflege im RP Stuttgart, Felix Pilz]

4 Kapillare Wasseraufnahme nach Karsten und Mirowski

Die Kenntnis der kapillaren Wasseraufnahme war für die Zustandsbeurteilung, bzw. die Aufnahmefähigkeit der Festigungsmittel von großem Interesse. Einschlägige Kenngrößen sind der Wasseraufnahmekoeffizient w [$\text{kg}(\text{m}^2\text{Vh})$], der Wassereindringkoeffizient B [cm/Vh] und die Wasseraufnahmekapazität WAK [Vol.-%]. Sie lassen sich mit Exaktheit nur durch Labormessungen bestimmen, allerdings wäre dies im Bereich des Ölbergreliefs nur durch weitere Probenentnahmen möglich gewesen. Deshalb wurden in den Felsenkapellen von St. Salvator Messungen mit Prüfröhrchen nach Karsten und nach Mirowski ausgeführt, mit denen die Kenngrößen der kapillaren Wasseraufnahme zerstörungsfrei abgeschätzt werden können.

Das Prüfröhrchen nach Karsten besteht aus einem zu einer Seite hin offenem und mit einem flachen Rand versehenen Glaszylinder, der an der Objekt-oberfläche aufgekittet wird, sowie mit einem gradierten Rohr, an dessen Skala im Verlauf der Messung die aufgenommene Flüssigkeitsmenge in ml abgelesen wird. Die Anbringung von Karstenröhrchen ist aber auf stark sandenden oder schuppenenden Oberflächen, wie im Ölberg kaum möglich, weshalb Tests mit dem Mirowski Röhrchen durchgeführt wurden.

Die Mirowski-Messungen sind insbesondere für die Bereiche an Skulpturen oder anderen, kleinteiligen Objekten mit unregelmäßigen Messflächen geeignet. Der Kapillartränkungsprüfer nach Mirowski besteht aus einem gradierten Röhrchen, dessen oberes Ende luft- und flüssigkeitsdicht abgeschlossen und dessen offenes, unteres Ende um 90° gekrümmt ist. Nach der Wasserbefüllung des Röhrchens wird in das offene Ende ein kreisrundes, gut getränktes Schwämmchen als "Leitungsventil" gesteckt. Das Schwämmchen wird dann in Kontakt mit der Objektoberfläche gebracht. Entzieht diese dem Schwamm Flüssigkeit, so entsteht ein Unterdruck im Röhrchen. Der Druckausgleich erfolgt durch Luftzufuhr durch das Schwämmchen. Infolge der kapillaren Wasseraufnahme bildet sich von Messbeginn an ein Feuchtfleck um das Schwämmchen. Aus dessen Durchmesser lässt sich auf den Wasseraufnahmegrad bzw. die Richtung der Flüssigkeitsaufnahme schließen. Die aufgenommene Flüssigkeitsmenge ist in der Regel proportional zur Saugdauer (im Gegensatz zur Messungen nach Kar-

sten). Das ermöglicht die Berechnung eines Flüssigkeitsaufnahmewertes je Stunde (ml/h). Bei dessen Berechnung sollte jedoch bei verzögertem Saugbeginn die Zeitdauer bis zum Einsetzen des Saugens unberücksichtigt bleiben. Es besteht keine direkte Vergleichbarkeit der berechneten kapillaren Aufnahmegeschwindigkeiten nach Mirowski in (ml/h) zu den Ergebnissen der Messungen mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen (w -Wert).

Die Ergebnisse zeigen (Bild 13), dass in Bereichen mit stark sandender und zermürbter Oberfläche eine erhöhte kapillare Wasseraufnahme nachgewiesen werden konnte.

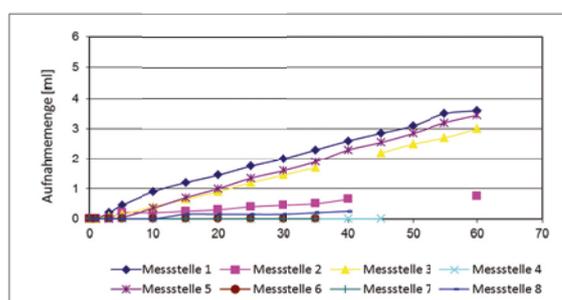


Bild 13 Grafische Darstellung der Ergebnisse der kapillaren Wasseraufnahme mit Mirowski Prüfröhrchen. M1: schwach sandend, M2: schwach sandend, aber dichtes Gestein ohne Rückwitterung, M3: stark sandende und zermürbte Oberfläche, M4: originale, feste Oberfläche, M5: Oberfläche 2-3 mm zurückgewittert, stark sandend, M6: feste Oberfläche, M7: feste Oberfläche, M8: Oberfläche dicht, leicht sandend, mit Gipskruste.

5 Der Stubensandstein nach der Festigung

5.1 Gefestigter Stubensandstein unter dem Mikroskop

Im Mai 2012 wurden die ersten Applikationen an den Musterflächen durchgeführt. Auch diese Flächen wurden vorher mittels Laser gereinigt. Es wurden in beiden Höhen die Rezepturen I-1, II-L [Wendler, 2015] und herkömmlicher Kieselsäureester appliziert. Während die Probefelder im oberen Bereich (MF 01 bis 04) insgesamt ein gleichmäßiges Aufnahmeverhalten zeigten, sind die Probefelder im unteren Bereich (MF 05 bis 08) in ihrer unteren

Hälfte sehr dicht und zeigen nahezu keine Aufnahme von Festiger. Bei genauer Betrachtung lässt sich in dieser Höhe eine rostbraun-gelblich gefärbte Zone feststellen, die annähernd waagrecht verläuft. Von der gefärbten dichten Zone wurde eine Materialprobe entnommen und als Karbonat (Kalzit) identifiziert.

Da die Musterflächen eher gut erhaltene Oberflächen zeigen und mürbe, absandende Oberflächen in den Kapellen nur in aus denkmalpflegerischer Hinsicht als Musterfläche nicht geeigneten, figürlichen Bereichen vorkommen, wurden vergleichbare Flächen in der Nachbarschaft (bei Dr. Pfander) gesucht um die ausgewählten Festiger auch an mürben Flächen zu erproben. Es wurde dabei so viel Festigungsmittel appliziert, wie das Gestein aufnehmen konnte.

Etwa 4 Wochen nach der Festigung wurden Bohrkern an den Musterflächen in der Oberen Kapelle und bei Dr. Pfander entnommen. Frische Bruchflächen der Proben und aus den Bohrkernen hergestellte Dünnschliffe wurden mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Bild 14 zeigt, dass der Festiger II-L nur oberflächennah beobachtbar ist, und dass er die Poren ausgefüllt hat. Festiger I-1 ist dagegen bis in eine Tiefe von etwa 2,5 cm Eindringen (Bilder 15-17). Er füllt die Poren nicht vollständig aus und das "Anhaften" an Quarzkörnern scheint erfolgreicher im Vergleich zum Festiger II-L.

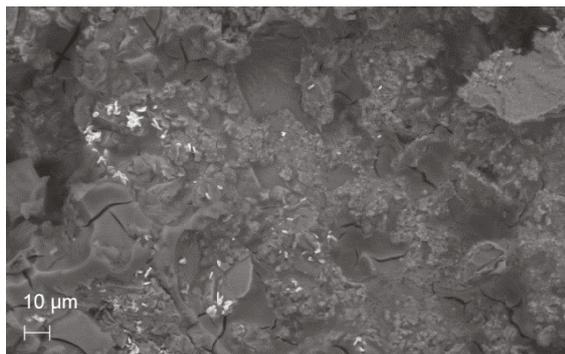


Bild 14 REM Aufnahme der Bruchfläche einer mit dem II-L gefestigten Probe, ca. 2 mm Tiefe, Obere Kapelle.

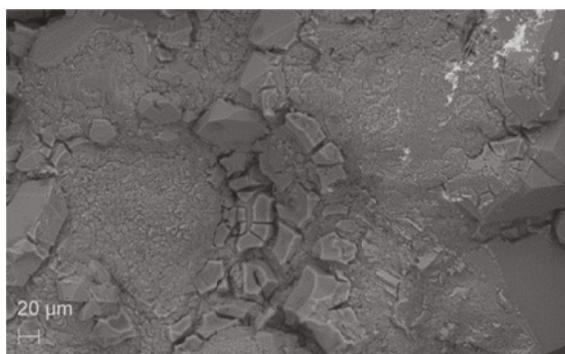


Bild 15 REM Aufnahme der Bruchfläche einer mit dem I-1 gefestigten Probe, ca. 20 mm Tiefe, Obere Kapelle.

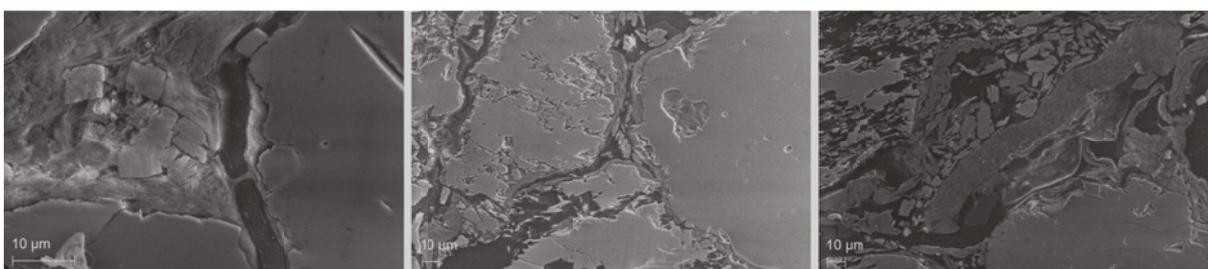


Bild 16 REM Aufnahme des Dünnschliffs einer mit dem I-1 gefestigten Probe in unterschiedlichen Tiefen: links ca. 2 mm, Mitte ca. 8 mm und rechts ca. 15 mm von der Oberfläche entfernt.

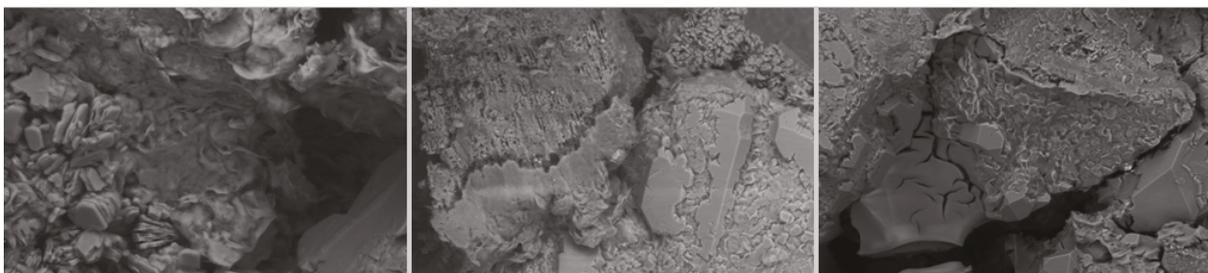


Bild 17 REM Aufnahme der Bruchfläche einer mit dem I-1 gefestigten Probe in unterschiedlichen Tiefen: links ca. 2 mm, Mitte ca. 15 mm und rechts ca. 25 mm von der Oberfläche entfernt

5.2 Porositätsänderung nach der Festigung

Quecksilberdruckporosimetrie wurde an ungefestigten und gefestigten Probekörpern durchgeführt. Eine leichte Verschiebung der Porenradien ist im Bereich von 10-60 µm festzustellen, die aber nicht darauf hindeutet, dass Poren von bestimmten Größen völlig verschwinden würden (Bild 18). Die feineren Proben scheinen nicht vom Festiger beeinflusst worden zu sein.

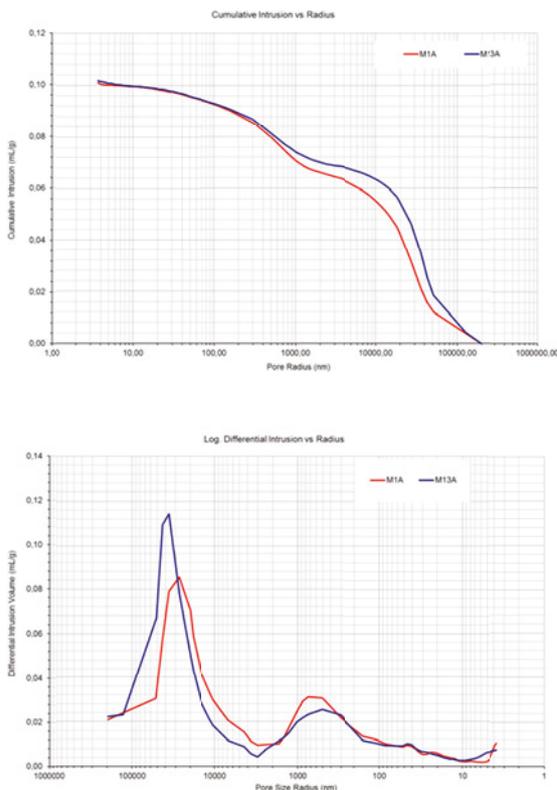


Bild 18 Kumulative Intrusionskurve (oben) mit der daraus abgeleiteten Porengrößenverteilung (unten) vor (M1A) und nach (M13A) der Festigung mit dem Festiger I-1.

Aus den entnommenen Bohrkernen nach der Festigung wurden Dünnschliffe unter Verwendung von blau eingefärbtem Harz hergestellt. Diese wurden mittels Bildanalyse untersucht. Die Methodik hat als Ergänzung zur Quecksilberdruckporosimetrie Ergebnisse zur Porengrößenverteilung insbesondere im Bereich von Makroporen geliefert. Die leichten Unterschiede können entweder auf die Auswirkung der Festigung oder die Inhomogenität des Stubensandsteines zurückgeführt werden (Bilder 19-22).

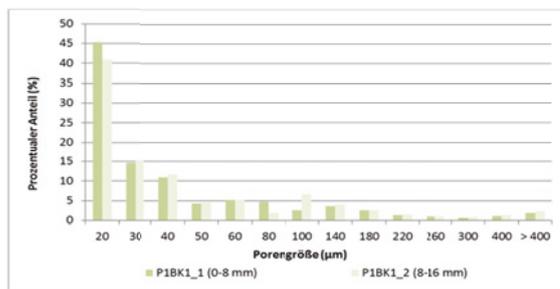


Bild 19 Porengrößenverteilung von einem Bohrkern in zwei Tiefen, entnommen am mit dem Festiger I-1 gefestigten Musterfeld.

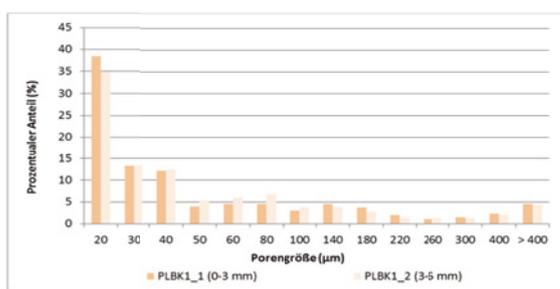


Bild 20 Porengrößenverteilung von einem Bohrkern in zwei Tiefen, entnommen am mit dem Festiger II-L gefestigten Musterfeld.

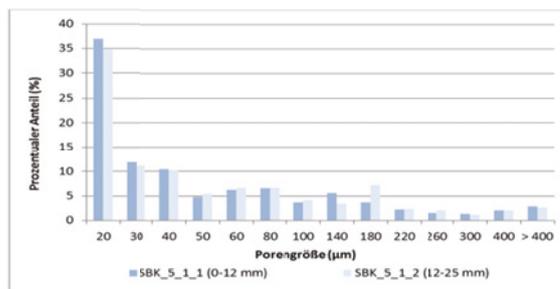


Bild 21 Porengrößenverteilung von einem Bohrkern in zwei Tiefen, entnommen am mit dem Festiger II-L gefestigten Musterfeld in der Oberen Kapelle.

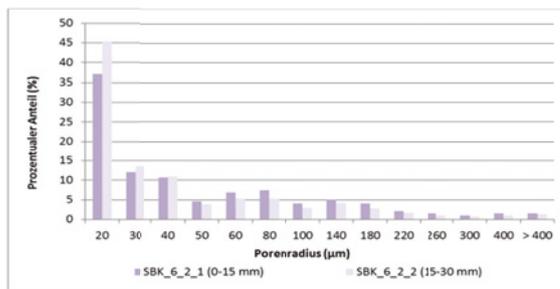


Bild 22 Porengrößenverteilung von einem Bohrkern in zwei Tiefen, entnommen am mit dem Festiger I-1 gefestigten Musterfeld in der Oberen Kapelle.

5.3 Wasserdampfdiffusion

Als Wasserdampfdiffusion bezeichnet man die Eigenbewegung des Wasserdampfes durch Baustoffe hindurch. Triebkraft hierfür sind unterschiedliche Wasserdampfdrücke auf den beiden Seiten eines Bauteils. Der in der Luft oder im Baustoff enthaltene Wasserdampf wandert von der Seite des höheren Dampfdrucks in Richtung des Druckgefälles. Der Wasserdampfdruck ist von der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig.

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand drückt aus, wie stark ein Baustoff die Diffusion (Ausbreitung) von Wasserdampf verhindert und wird mittels der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl gemessen. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ) eines Baustoffs gibt an, um welchen Faktor das betreffende Material gegenüber Wasserdampf dichter ist als eine gleich dicke, ruhende Luftschicht. Je größer die μ -Zahl, desto dampfdichter ist ein Baustoff. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand wurde an den gleichen Stubensandsteinscheiben (aus den Kernbohrungen) vor und 5 Wochen nach der Festigung mit dem Festiger I-1 ermittelt. Ein leichter Anstieg des Wasserdampfdiffusionswiderstandes konnte bei den Messungen nach der Festigung festgestellt werden. Nach der Befrachtung der gefestigten Sandsteinscheiben mit der für die Konservierungsmaßnahmen vorgesehenen Schlämme sank die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl wieder leicht.

5.4 Schlusswort

Die Erfassung vom Bestand und Zustand des Ölberg-Reliefs und die Vorbereitung und Durchführung der Konservierungsmaßnahmen wurden durch umfangreiche naturwissenschaftliche Analysen begleitet. Ziel dieser Untersuchungen war, die Entwicklung und Auswahl der eingebrachten Festiger, die im dauerfeuchten Milieu erfolgreich angewendet werden musste, zu unterstützen.

Tabelle 5: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ) an Stubensandsteinscheiben (aus den Kernbohrungen) vor und nach der Festigung mit dem Festiger I-1, bzw. nach der Auftragung von der Schlämme

Probe	μ vor Festigung	μ nach Festigung	μ mit Schlämme
STST1	12,6	18,0	14,4
STST2	13,5	18,6	13,2
STST3	13,4	16,1	11,5
STST5	12,0	13,9	9,5
STST6	10,9	13,5	10,5
STST7	17,2	18,1	16,5
STST8	18,8	18,6	17,6
STST9	15,6	16,1	14,9
STST10	13,5	13,9	12,3
Mittelwert	12,6	13,5	12,2

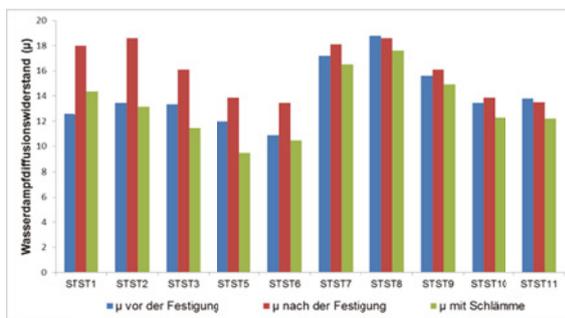


Bild 23 Graphische Darstellung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes an Stubensandsteinscheiben (aus den Kernbohrungen in unmittelbarer Nähe der Felsenkapellen) vor und nach der Festigung mit dem Festiger I-1.

Danksagung

Wir danken Herrn Dr. Pfander für die Zurverfügungstellung einer Musterfläche in seinem Anwesen. Weiterhin danken wir Frau Luz, Frau Ullmann, Frau Gudan, Herrn Vita und Herrn Raitzig für die Durchführung von zahlreichen Analysen und Herrn Kaiserauer und Herrn Kubik für die Unterstützung bei der Bildbearbeitung.

Literaturreferenzen:

- [Stacheder M. 1996] Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik (TDR for Geotechnical Applications). PhD Thesis. Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, Vol. 40, Karlsruhe, pp. 170.
- [Bowitz J. & Ehling A 2008] Non-destructive infrared analyses: a method for provenance analyses of sandstones. *Environmental Geology*, 56, 3 - 4: pp. 623 – 630; Springer Berlin.
- [Bowitz J. & Ehling A 2010] Zerstörungsfreie Infrarotspektroskopie - Einsatzmöglichkeiten in der Denkmalpflege, Archäologie und Bauforschung. Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums, 25, pp. 42 – 46; Wernersche Verlagsgesellschaft mbH Worms.
- [Fiedler, 2015] Das Ölbergrelief am Salvator in Schwäbisch Gmünd Bestand / Zustand / Konservierung. In: J. Frick, J. Zöldföldi (Hrsg.) DBU-Projekt: „Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd. Fraunhofer IRB Verlag, 2015, S. 61-82.

[Wendler 2015] Rezeptierung, Erprobung und Anwendung von feuchtetoleranten Steinfestigern für poröse Gesteine mit erhöhtem Feuchtegehalt. In: J. Frick, J. Zöldföldi (Hrsg.) DBU-Projekt: „Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd. Fraunhofer IRB Verlag, 2015, S. 125-131.

Autoren:

Dr. Judit Zöldföldi
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
Referat Denkmalschutz
Pfaffenwaldring 2b
70569 Stuttgart
Judit.Zoeldfoeldi@mpa.uni-stuttgart.de

Dr. Jörg Bowitz
Schönwalder Str. 60
13585 Berlin
joerg.bowitz@web.de

Dr. Friedrich Grüner
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
Referat Denkmalschutz
Pfaffenwaldring 2b
70569 Stuttgart
Friedrich.Gruener@mpa.uni-stuttgart.de

Sara Larisch
Restauratorin für Steinobjekte
Helmensbergweg 1
73728 Esslingen
mail@larisch-restaurierung.de

Mikrobiologische Untersuchung der Felsenkapellen St. Salvator in Schwäbisch Gmünd

Stefanie Scheerer

Abstract Ziel des Forschungsprojekts war die Charakterisierung der quantitativ bedeutendsten Mikroorganismen-Gruppen in der oberen und unteren Kapelle von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd, sowie deren Beitrag zum Steinzerfall zu untersuchen. Weiterhin wurden Bekämpfungsstrategien entwickelt, um die Besiedlung der Steinoberflächen zu reduzieren. Obwohl andere Faktoren, wie beispielsweise die Salzbelastung, einen größeren Beitrag am schlechten Erhaltungszustand der Felsenkapellen beitragen, können die zum Teil intensiven Biofilme ebenfalls am Abbau der Steine beitragen. Wasserstoffperoxid, Alkohol (Ethanol/Isopropanol), UV-C Strahlung und Infrarot-Laserlicht wurden in ihrer Effizienz zur Reduktion der Biofilme getestet. Alkohol Behandlungen und UV-C Bestrahlung, bzw. eine Kombination aus mechanischer Feuchtreinigung mit Alkohol in Kombination mit UV-C Bestrahlung zeigte eine gute Reduktion der Biofilme an ungedüngten Bereichen der Steinoberflächen. Ohne eine Eliminierung der Ursachen des Befalls, kann jedoch eine Wiederbesiedelung der Steinoberflächen nicht ausgeschlossen werden.

Keywords: Biodeterioration, mikrobieller Befall, Algen, Pilze, Bakterien, Steinzerfall, Aktivitätsmessung, antimikrobielle Behandlung

1 Einführung

Beide Kapellen des Wallfahrtsorts St. Salvator in Schwäbisch Gmünd trugen deutliche Spuren von mikrobiologischem Bewuchs. Der Beitrag von Mikroorganismen am Abbau von Kulturgut, besser bekannt unter dem Begriff "Biodeterioration", ist ein seit langer Zeit bekanntes Problem (Warscheid et al., 1996, Scheerer et al., 2009). Die Einordnung von vorhandenen Schäden nach (mikro-) biologischen oder nicht-biologischen Ursachen ist jedoch in dem meisten Fällen sehr schwierig oder sogar unmöglich. Um die einzigartigen Felsenkapellen von St. Salvator langfristig und nachhaltig schützen zu können, wurde durch das DBU-geförderte Forschungsprojekt untersucht, welche Rolle die reichlich vorhandene Mikroflora am Steinzerfall spielt.

Obwohl der Fokus dieses Forschungsprojekts auf die Ölbergsszene in der oberen Kapelle ausgerichtet war, sollte im mikrobiologischen Teilbereich auch der Befall der unteren Kapelle, insbesondere der

Kreuzigungsgruppe, untersucht werden. Es wurde vermutet, dass sich sowohl die Zusammensetzung der Mikroflora als auch die Klimabedingungen in den beiden Kapellen unterschieden, was folglich einen Einfluss auf das Konzept zur Erhaltung der denkmalgeschützten Stätten haben könnte.

Am deutlichsten wahrnehmbar war die mikrobielle Besiedlung anhand der großflächigen Grünfärbung der Steinoberflächen, welche durch den Bewuchs mit Algen erzeugt wurde. Diese Färbung war nicht homogen über den gesamten Stein verteilt sondern sehr unregelmäßig mit Stellen, an denen ein mehrere Millimeter dicker Biofilm vorhanden war, während an anderen Stellen makroskopisch ein Befall kaum sichtbar war. Die Grünfärbung der Oberflächen war in längeren Feuchteperioden deutlich intensiver ausgeprägt als in Trockenzeiten. Phototrophe Biofilme sind bekannt dafür, dass sie unter trockenen Bedingungen grau bis schwarz wirken und in feuchtem Zustand grün erscheinen (Ortega-Morales et al., 2004).

2 Bestandsaufnahme der vorhandenen Mikroorganismen

Die Bestandsaufnahme konnte im Rahmen des Forschungsprojekts keine umfassende Darstellung aller beteiligten Arten von Mikroorganismen sein; vielmehr sollten die quantitativ bedeutendsten Mikroorganismen-Gruppen identifiziert und charakterisiert werden.

Ziel war die Zusammensetzung der Mikroflora von Bereichen unterschiedlichen Erhaltungszustands miteinander zu vergleichen und zu untersuchen, ob ein neu gebildeter Biofilm eine andere Zusammensetzung hat als ein bereits seit vielen Jahren bzw. Jahrzehnten etablierter Biofilm. Dies spielt für die geplante Entfernung / Reduktion der Biofilme eine wichtige Rolle.

In der oberen Kapelle wurde der mikrobiologische Befall nur im Bereich der Ölbergszene untersucht, während in der unteren Kapelle der Bereich der Kreuzigungsgruppe untersucht wurde. Auf die Analyse der Mikroflora im gefassten Bereich der Kreuzigungsgruppe wurde verzichtet, da einerseits wenig Probenmaterial zur Verfügung stand und andererseits die Salzbelastung eindeutig als Schadensursache dominierte.

Auffallend war der bereits beschriebene Unterschied der Farbigkeit der Biofilme. Die tendenziell feuchtere untere Kapelle wies durchgängig einen intensiveren Grünton des Befalls auf als die obere Kapelle, welche von einem braun-grünen bis grau-grünen Biofilm geprägt war (Bild 1, 2). Der Unterschied der Farbigkeit der Biofilme unterlag, insbesondere in der oberen Kapelle, einerseits einem jahreszeitlichen Wechsel mit unterschiedlichem Feuchtevorkommen und reflektierte andererseits die Feuchteverteilung im Objekt. Freistehende, tendenziell trockene Bereiche waren hier eher von grauer Farbigkeit während Bereiche mit einer geringen Oberfläche und großem Steinvolumen, welche tendenziell feuchter waren, einen deutlich grünen Biofilm aufwiesen. Weiterhin war die Zusammensetzung der Biofilme der beiden Bereiche unterschiedlich, wie deren Abzucht in Flüssignährmedium zeigte (Bild 3). Neben dem Wechsel in der Farbigkeit der Biofilme beider Kapellen in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit, fiel die unregelmäßige Verteilung der Biofilme auf der Oberfläche auf, welcher den Erhaltungszustand der Oberflächen reflektierte.



Bild 1: Ölbergszene in der oberen Kapelle mit braun-grünem Biofilm



Bild 2: Kreuzigungsgruppe in der unteren Kapelle mit intensiv grünem Biofilm



Bild 3: Mischkulturen der Mikroflora in Flüssignährmedium der unteren Kapelle (links) und der oberen Kapelle (rechts)

In beiden Kapellen bieten die zum Teil große Verfügbarkeit von Wasser und Vertiefungen in den Oberflächen ideale Mikronischen für die Besiedelung durch Mikroorganismen. Vertiefungen, in denen sich Wasser und auch organische Partikel ansammelten, waren förderlich für die Biofilmbildung. Jedoch waren auch Vertiefungen, die eine Unterseite bildeten und damit das Ansammeln von luft-

getragenen Partikeln nicht förderten, in nahezu gleichem Maße von dicken, gut entwickelten Biofilmen überzogen (Bild 8). Das lässt darauf schließen, dass die Oberflächenfeuchtigkeit, die sich in den vertieften Ecken bildete, der Hauptfaktor des mikrobiellen Wachstums war.

2.1 Obere Kapelle, Ölbergsszene

Die Steinoberflächen der Ölbergsszene in der oberen Kapelle, die allgemein etwas trockener wirkten als das Steinmaterial der unteren Kapelle, wiesen einen sehr inhomogenen Befall auf. Die fleckige Verteilung entsprach dem Erhaltungszustand der Oberflächen. An gut erhaltenen Oberflächen war der Biofilm deutlicher sichtbar und in dichter Ausprägung vorhanden, während stark abgesandete Oberflächen keinen makroskopisch sichtbaren Befall hatten (Bild 1, 4).



Bild 4: Inhomogene Verteilung des Biofilms in der Ölbergsszene

Vor allem erhabene Stellen waren stark verwittert und zeigten entsprechend keinen Biofilm. Flächige Bereiche wiesen eine bräunlich-grüne Verkrustung auf. In tiefergelegenen Stellen war der Biofilm dagegen nicht krustig sondern schwammig weich und bis zu mehrere Millimeter dick. Die Farbe des Biofilms nahm eine deutlich dunklere und grünere Schattierung ein als die verkrusteten Bereiche.

Es wäre zu einfach den Schluss zu ziehen, dass der Biofilm einen Schutzcharakter haben muss, da er an gut erhaltenen Bereichen vorhanden war und an stark verwitterten Bereichen nicht vorhanden war. Vielmehr muss berücksichtigt werden, dass die stark verwitterten Stellen erhabene Eckbereiche darstellen mit viel Oberfläche und wenig Steinvolumen. Dadurch waren diese Stellen trockener, was zu einer verstärkten Salzbildung führen konnte.

Diese Oberflächen sandeten so stark ab, dass sich ein neu gebildeter Biofilm nicht etablieren konnte, weil die Mikroorganismen gemeinsam mit den Steinpartikeln immer wieder abgetragen wurden. In den flächigen Bereichen dagegen konnte sich ein Biofilm über lange Zeit hinweg etablieren und in tief-liegenden, muldenartigen Stellen, wo die Feuchtigkeit entsprechend besonders hoch war, konnte sich sogar ein sehr dicker Biofilm bilden, da diese Bereiche vermutlich nie vollständig austrockneten.

In einer Vertiefung mit stark ausgeprägter Biofilmbildung (Ölbergsszene, Wurzelbereich des Baumstamms) hatte sich durch den mikrobiellen Biofilm und der damit verbundenen Anreicherung von organischen Partikeln eine Humusschicht ausgebildet, die das Wachstum von frühen Stadien von Moosen zuließ (Bild 5).

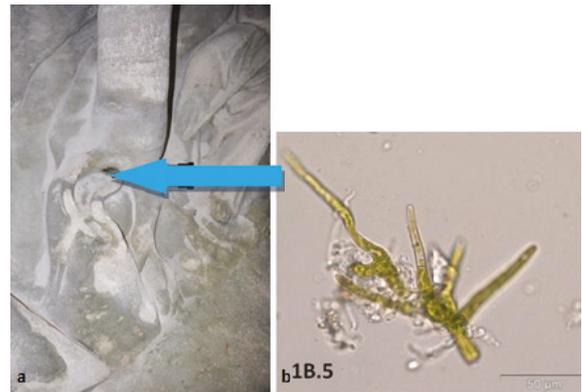


Bild 5: Bildung früher Stadien von Moosen im stark ausgeprägten Biofilm; Übersicht (a), mikroskopische Aufnahme (b); Balken: 50µm

Im Hintergrund der Ölbergsszene, die die Oberfläche des natürlich gewachsenen Felsens bildete, war an der 4. Zaunlatte von links eine deutliche rosa Färbung wahrnehmbar (Bild 6). Diese wurde bereits 1993 von anderer Seite mikrobiologisch untersucht und zu dieser Zeit auf den Befall durch rosa pigmentierte Hefen und Bakterien zurückgeführt.

Die rosa gefärbten Stellen wurden nun im Rahmen dieses Forschungsprojekts erneut untersucht. Eine Aktivitätsmessung (mittels ATP-Analyse) der Stellen im Vergleich zu umliegenden, nicht-gefärbten Stellen, ergab, dass es sich nicht um einen aktiven Befall biologischen Ursprungs handeln kann. Die mikroskopische Untersuchung bestätigte dies und zeigte darüber hinaus, dass sich keine größere Zelldichte

auf den rosafarbenen Bereichen befand als auf den nicht-gefärbten Bereichen. Dies weist darauf hin, dass es sich bei den rosa gefärbten Stellen nicht um eine Verfärbung biologischen Ursprungs handelte, sondern um eine natürliche Farbvariation des Gesteins (Kalifeldspäte, Analyse MPA).



Bild 6: Rosafarbene Stellen im Hintergrund der Ölbergsszene. Übersicht (a), Detailaufnahme der rosa Färbung (b), Mikroskopische Aufnahme der rosa Verfärbung (x1000) (c)

2.2 Untere Kapelle, Kreuzigungsgruppe

Die Figurengruppe der Kreuzigungsszene war farbig gefasst und wies keinen makroskopisch wahrnehmbaren Biofilm auf.

Entlang des Bodens und der Wand der Nische in der sich die Figurengruppe befand, war ein flächiger Biofilm unterschiedlicher Stärke vorhanden. Nur wenige erhabene Bereiche waren hier vorhanden und der Erhaltungszustand der Nische war homogener als am Ölberg. Im rechten vorderen Bereich des Sockels war an einer erhabenen Stelle ein absandender Bereich vorhanden, wo sich im Gegensatz zu den umliegenden Bereichen kein Biofilm befand. Tiefer liegende Stellen wiesen einen dichteren Biofilm auf, der jedoch nirgends die maximale Biofilmstärke der Ölbergsszene erreichte (Bild 2, 7 und 8).

Auffallend war weiterhin der schichtige Befall an der Rückwand der Nische. Die Ausprägung des Biofilms korrelierte hier mit den Inhomogenitäten des Steins (Bild 8). Denkbare Ursachen für diesen Befund wäre eine unterschiedliche Porosität des

Steins, bei dem manche Schichten die Etablierung der Biofilm stärker förderten als andere Schichten. Weiterhin könnten die stärker befallenen Schichten einen besseren Wassertransport aus dem Fels heraus ermöglichen, was ebenfalls das Algenwachstum förderte.

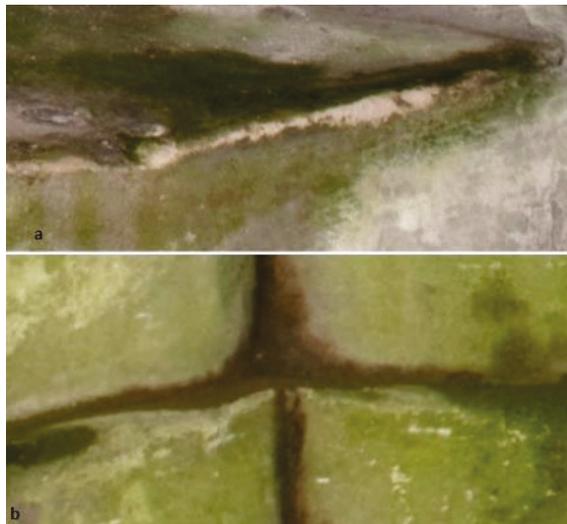


Bild 7: Absandende Stelle ohne Biofilm (a) und tiefliegende Bereiche mit dichtem Biofilm (b) in der Nische der Kreuzigungsgruppe



Bild 8: Schichtiger Verlauf des Biofilms, der den Inhomogenitäten des Steins folgte

2.3 Differenzierung der beteiligten Mikroorganismen-Gruppen

Da eine umfassende Identifikation der vorhandenen Mikroflora in diesem Rahmen nicht möglich war, wurde eine Identifikation lediglich dort angestrebt, wo Fragestellungen mit konservatorischer Relevanz geklärt werden konnten. Es wurden 16 verschiedene Probenahmestellen nach folgenden Gesichtspunkten ausgewählt:

- Unterscheidet sich die Mikroflora an gut bzw. schlecht erhaltenen Oberflächen?
Dies könnte einen Hinweis auf das zerstörerische Potential der Mikroorganismen und deren Biofilme geben.
- Ist die Zusammensetzung von lang etablierten und jüngeren Biofilmen unterschiedlich?
Diese Frage ist relevant, da nach einer Reinigung bzw. (Teil-) Entfernung des derzeit auf der Oberfläche befindlichen Biofilms, nicht davon ausgegangen werden kann, dass das mikrobielle Wachstum bei anhaltender erhöhter Feuchtigkeit langfristig gestoppt werden kann.
Falls junge Biofilme in ihrer Zusammensetzung den etablierten Biofilmen unähnlich sind, muss ermittelt werden, ob das Schadenspotential der sich neu bildenden Mikroflora höher ist als das der etablierten Mikroflora. In diesem Fall sollte eine Entfernung der mikrobiellen Biofilme sehr kritisch abgewägt werden.

Direkte mikroskopische Untersuchungen (Lichtmikroskopie x400 – x1000 und REM) von Probenmaterial aus unterschiedlichen Bereichen der oberen und unteren Kapelle wurden ebenso durchgeführt wie die Anzucht der Mikroflora auf verschiedenen Nährmedien und morphologische Differenzierung der isolierten Organismen. Die Ergebnisse hatten gezeigt, dass die mikrobielle Gesellschaft zwar eine große Vielzahl von unterschiedlichen Gruppen von Mikroorganismen umfasste; jedoch dominierten Algen an allen untersuchten Stellen.

Obwohl das Klima, Aussehen des Befalls und Erhaltungszustand an den Probenahmestellen verschieden waren, wurden in beiden Kapellen ähnliche dominierende Algen gefunden. Die meisten Standorte wurden von kokkalen und fadenförmigen Grünalgen / Xanthophyceae dominiert; dabei handelte es sich vermutlich um eine Gesellschaft morphologisch ähnlicher Arten und Gattungen, die zu dem Formkreis *Apatococcus/Desmococcus* (Chlorophyta, Trebouxiophyceae) z.B. *Chlorella*, *Heterococcus* (Xanthophyceae) und *Jenufa* (Chlorophyceae) gehören. Bei *Jenufa sp.* handelte es sich vermutlich um eine neue Art der erst kürzlich entdeckten Gattung *Jenufa* (Němcová et al., 2011).

Cyanobakterien (photosynthetische Bakterien, früher Blaualgen genannt), meist einzellige Formen mit starker Schleimbildung, waren in den meisten Proben vorhanden, jedoch nicht dominant.

Algen und Cyanobakterien waren in den meisten Stellen direkt miteinander vergesellschaftet und bildeten einen gemeinsamen Biofilm, der eine makroskopisch-visuelle Trennung der beiden unterschiedlichen Mikroorganismengruppen nicht zuließ. An einer Stelle im oberen Nischenbereich der Kreuzigungsgruppe, jedoch, war eine klare, schichtartige Trennung von Algen und Cyanobakterien makroskopisch sichtbar (Bild 9).

Der Grund dieser schichtartigen Trennung ist nicht vollständig geklärt, beruht aber wahrscheinlich auf dem höheren Feuchtebedarf der Algen, da innerhalb der tiefsten Stelle der Kante die konstant höchste Materialfeuchtigkeit herrscht.



Bild 9: Schichtartige Trennung von Algen (hellgrüner Bereich an der tiefsten Stelle der Kante) und Cyanobakterien (darunterliegender blau-grüner Bereich) in Übersichtsaufnahme (a) und Detail (b)

Die Mikroflora umfasste neben phototrophen Organismen (Algen und Cyanobakterien) auch Pilze, heterotrophe sowie autotrophe Bakterien und Diatomeen (Kieselalgen, photosynthetische Protistengruppe mit einer harten Zellhülle aus SiO_2). Diatomeen gelten als Indikator für eine konstant hohe Materialfeuchtigkeit.

Nitratmessungen von Laboranzüchtungen zeigten, dass sich sowohl in der oberen als auch in der unteren Kapelle Nitrifikanten, welche Ammoniumverbindungen (v.a. Ammoniak, Ammonium) zu Nitrit und weiter zu Nitrat oxidieren können, unter der chemolithotrophen Bakterienpopulation befanden. Das Vorkommen von Nitrifikanten wird allgemein

durch eine erhöhte Gesteinsfeuchte stark begünstigt (Mansch et al., 1999; Ortega-Morales, 1999).

Die auf den untersuchten Proben befindlichen Pilze gehörten zur Gruppe der Schimmelpilze. In der Gruppe der Schimmelpilze dominierten solche, die eine hohe Materialfeuchtigkeit indizieren (*Acremonium strictum*, *Acremonium kiliense*, *Acremonium furcatum*, *Engyodontium album*). In situ Wachstum konnte an vielen Probenahmestellen durch verschiedene *Cladosporium* Arten, insbesondere durch *Cladosporium cladosporioides* nachgewiesen werden. Weiterhin wurden in geringeren Mengen typische außenluftgetragene Gattungen (*Penicillium*, *Aspergillus*) isoliert, die beim vorliegenden Befund jedoch eher eine luftgetragene Kontamination darstellten.

Der mikrobielle Artenreichtum war in der oberen Kapelle (Ölberggruppe) deutlich grösser als in der unteren Kapelle. In der unteren Kapelle (Kreuzigungsgruppe) wurden fast ausschließlich Algen nachgewiesen, in einer Probe waren Cyanobakterien dominant vorhanden. Der Anteil von Pilzen und nicht-Photosynthese betreibenden Bakterien war geringer als in der oberen Kapelle.

3 Einfluss des Klimas auf die mikrobielle Aktivität

Um den Einfluss zu untersuchen, den das Klima auf die mikrobielle Aktivität der Mikroflora hatte, wurde an 2 Stellen in der oberen Kapelle und 2 Stellen in der unteren Kapelle die mikrobielle Aktivität bei unterschiedlichen Klimaverhältnissen gemessen.

Die Untersuchungen der oberen Kapelle zeigten deutlich, wie die Aktivität mit steigender Feuchtigkeit und steigender Temperatur zunahm (Bild 10, linke Hälfte). In der unteren Kapelle hingegen folgte die mikrobielle Aktivität nicht eindeutig den Klimaverhältnissen. Hier schienen komplexere Parameter die Aktivität der Mikroflora zu beeinflussen, welche noch nicht vollständig geklärt sind. Untersuchungen hatten gezeigt, dass in der Nähe des Fensters die Oberflächentemperatur höher war, wodurch die Oberflächenfeuchtigkeit geringer war (Krüger, 2015). Dies zeigte sich in einer deutlich niedrigeren mikrobiellen Aktivität an der fensternahen Untersuchungsstelle (Bild 10, rechts). Zusätzlich zur Lage in Fensternähe wäre es möglich, dass eine geringere Oberflächenfeuchtigkeit in dieser Region daher stammte, dass diese Stelle eine geringe Verbindung zum Fels hatte, da die dahinter liegende Hauswand

aus Mauerwerk bestand und nicht dem gewachsenen Fels (Zöldföldi, 2015). Am linken Sockelbereich der Kreuzigungsgruppe schien generell eine sehr stark erhöhte Materialfeuchtigkeit zu herrschen. Unklar blieb, warum die Werte invers den erwarteten Werten waren. Eventuell wurden Zellen durch die tropfende Kondensationsfeuchtigkeit entfernt, was die höhere Aktivität bei trockenem Klima erklären könnte. Warum die Aktivität jedoch bei geringer Temperatur stieg, sollte weiter untersucht werden.

Zusätzlich zu den Kondensationserscheinungen, bedingt durch das Außenklima, wurde Feuchtigkeit, als Hauptfaktor für mikrobielles Wachstum und Aktivität, vom hinter den Kapellen liegenden Fels an die Oberflächen getragen. Probekörper aus Stein, die in den Kapellen in Kunststoffbehältern standen, wirkten in beiden Kapellen trockener als die originalen Gesteinsoberflächen der Felsenkapelle. Wurden diese Kunststoffbehältnisse verschoben, war die originale Steinoberfläche an dieser Stelle stark durchfeuchtet und zeichnete sich dunkel von der umgebenden Oberfläche ab (Bild 11). Weiterhin war die mikrobielle Aktivität auf Probekörpern, die direkt auf der originalen Steinoberfläche auflagen deutlich höher als die von Proben, die in den Kunststoffschalen lagen (Bild 12). Die größere Streuung und damit der höhere statistische Fehler (siehe Fehlerindikatoren) lag an der geringeren Anzahl der Messungen an den Probekörpern, die direkt auf dem Fels gelagert waren.

Das zeigte, dass neben den klimatischen Bedingungen, die eine stärkere mikrobielle Aktivität in der warm-feuchten Jahreszeit begünstigte, die aufsteigende Feuchtigkeit des gewachsenen Felsens für die oberflächliche Materialfeuchtigkeit und damit für den mikrobiellen Befall verantwortlich war. Dies war besonders stark in der unteren Kapelle der Fall.

4 Beitrag der Mikroorganismen am Steinzerfall

Weder qualitativ noch quantitativ konnte die Mikroflora mit dem Erhaltungszustand der originalen Steinoberfläche in Verbindung gebracht werden. (Bild 13). Die verschiedenen Gruppen von Mikroorganismen waren sowohl auf gut erhaltenen Bereichen als auf solchen in schlechtem Erhaltungszustand in ähnlichen Mengenverhältnissen verteilt; die Unterschiede lagen im Bereich der versuchsbedingten Abweichung.

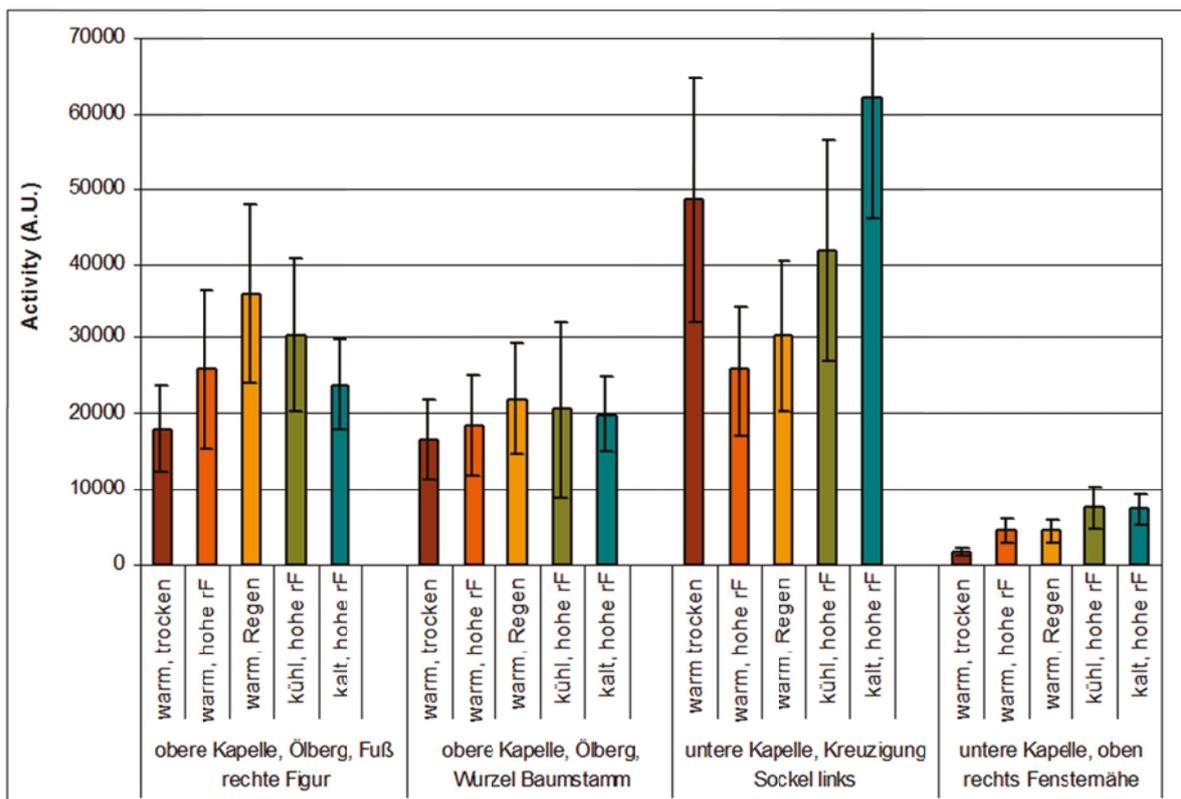


Bild 10: Aktivitätsmessungen an 2 Stellen der oberen Kapelle (linke Hälfte) und der unteren Kapelle (rechte Hälfte) bei unterschiedlichen Klimaverhältnissen



Bild 11: Feuchte Stellen am Boden nach dem Entfernen der Kunststoffbehälter

Das ließ darauf schließen, dass die Mikroorganismen am Erhaltungszustand keine übergeordnete Rolle spielten. Es wird jedoch angenommen, dass sie dennoch am Steinzerfall durch eine Vielzahl von verschiedenen Mechanismen beitragen, wie der mechanische Belastung, Veränderung der physikalischen Charaktere im Oberflächennahen Bereich (Oberflächenstruktur, Porengröße, Absorptionsverhalten, Oberflächendichte) sowie durch reaktive Bestandteile des Biofilms, welche mit der Steinmatrix reagieren können (Scheerer et al., 2009).

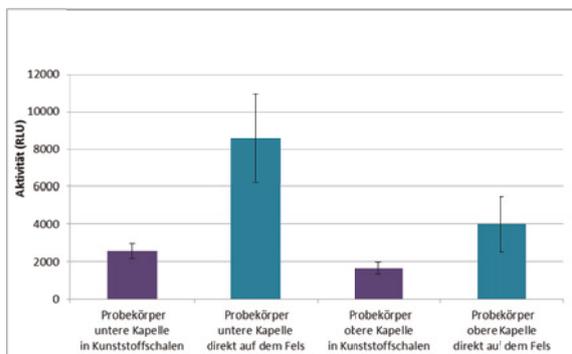


Bild 12: Mikrobielle Aktivität der Probekörper mit Kontakt zur Felsoberfläche im Vergleich zu solchen welche in einer feuchteisolierenden Kunststoffschale gelagert waren

4.1 Eindringtiefe

Eine Art der Steinschädigung, die von Mikroorganismen ausgeht ist das Eindringen in die Steinmatrix. Dies bewirkt eine mechanische Beanspruchung der Oberfläche, die bei Volumenveränderungen zu Schädigung führen kann (Scheerer et al., 2009). Die mengenmäßig dominierenden Mikroorganismen (Grünalgen / Xanthophyceae) sind zu endolithischem Wachstum fähig, d.h. sie können sich in das Gestein einbohren, und könnten so zum Abbau der Oberflächen und des unmittelbar darunterliegenden Gesteinsmaterials beitragen.

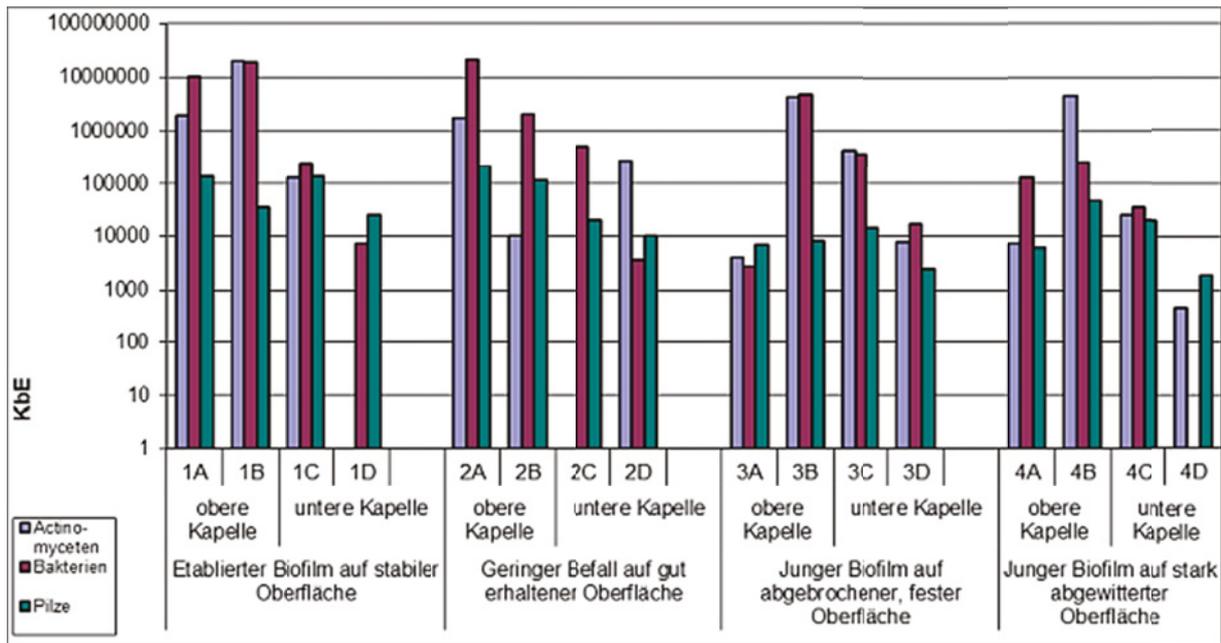


Bild 13: Quantitative Untersuchung von Actinomyceten, sonstigen Bakterien und Pilzen in der oberen unteren Kapelle

Ebenso sind Cyanobakterien bekannt dafür, dass sie sich aktiv in Gesteinsoberflächen einbohren können. Die Mechanismen, die zu einem Einbohren der Mikroorganismen in den Stein führen, sind noch nicht vollständig geklärt (Salvadori, 2000; Carciapichel, 2006). Bisherige Studien (Warscheid et al., 1996) haben jedoch ergeben, dass Mikroorganismen vor allem in tropischen Klimazonen, wo die Hitzeeinwirkung und UV-Strahlung sehr intensiv ist und damit schädigend für die mikrobiellen Zellen wirkt, zu endolithischem Wachstum neigen. In gemäßigten Klimazonen dagegen ist das mikrobielle Wachstum stärker auf die Gesteinsoberfläche beschränkt, dies ist vor allem in Innenräumen der Fall (Gaylarde et al., 2001; Ortega-Morales et al., 2000).

Die phototrophen Mikroorganismen, die in beiden Kapellen dominierten, waren vor allem solche, die – obwohl sie Licht als Energiequelle für Stoffwechsellvorgänge nutzen – mit geringen Lichtintensitäten auskommen. Xanthophyceae (Gelbgrüne Algen), Cyanobakterien und Diatomeen sind bekannt dafür ausreichend Energie selbst aus geringen Lichtintensitäten beziehen zu können. Aber auch die vorhandenen Grünalgen sind gut an geringe Lichtverhältnisse angepasst. Beispielsweise die einzellige kokkale Grünalge *Jenufa sp.*, die zu einer neuen Gattung gehört, die erst 2011 entdeckt und beschrieben wurde, wurde zuvor von endolithischem (unterhalb der Oberfläche) Wachstum in Dolomitgestein der Zentralalpen isoliert, wo eben-

falls geringe Lichtverhältnisse zu erwarten sind (Němcová et al., 2011). Dennoch ist ein endolithisches Wachstum über die obersten Millimeter hinaus wegen der geringen Lichtverhältnisse in den Felsenkapellen unwahrscheinlich, da die Lichtintensitäten vermutlich bereits an der Gesteinsoberfläche zu gering sind, um einen aktiven Stoffwechsel zu unterstützen. Bereits 1988 berichteten Nienow et al. dass die Lichtqualität und –intensität die wichtigsten limitierenden Faktoren sind, die die Eindringtiefe von endolithisch wachsenden phototrophen Gesellschaften sind.

Neben den Lichtverhältnissen wird die Möglichkeit des endolithischen Wachstums von der Porengröße des Steins bestimmt (Young, 1997). Die Porengröße des vorliegenden Stubensteins ließe ein endolithisches Wachstum der Algen zu. Durchschnittlich hatten die isolierten Algen eine Zellgröße von ca. 8 µm. Die Porengröße des Stubensandsteins lag nach Messungen der MPA Stuttgart hauptsächlich zwischen 20 und 40 µm; quantitativ ausgedrückt haben ca. 45 % der Poren eine Größe von 20 µm und je 15 % der Poren haben eine Größe von 30 µm bzw. 40 µm. Das restliche Porenvolumen der Stubensandsteine hat eine größere Porengröße, die jedoch mengenmäßig geringer vertreten ist (Bild 14).

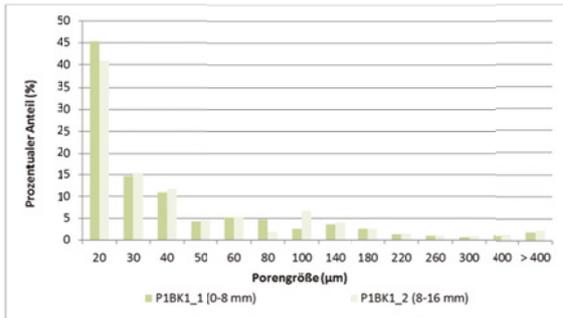


Bild 14: Porengrößenverteilung des Stubensandsteins [Zöldföldi, 2015]

Auch die Suche nach Nährstoffen als Grund für endolithisches Wachstum (Matthes-Sears et al., 1997) traf für photosynthetische Organismen nicht zu. Lediglich die Suche nach unbesiedelten Lebensräumen (Matthes-Sears et al., 1997) wäre für die dominierenden Photosyntheten ein Grund für endolithisches Wachstum. Für die mengenmäßig deutlich geringer vertretenen heterotrophen Mikroorganismen (Pilze und Bakterien) wäre eventuell die Suche nach Nährstoffen denkbar; da jedoch die Ansammlung von organischen Partikeln auf der Oberfläche stark ausgeprägt war und die Zusammensetzung von mikrobiellen Biofilmen eine ideale Nährstoffgrundlage für heterotrophe Mikroorganismen bietet (Ortega-Morales et al., 1999), konnte davon ausgegangen werden, dass auf den Gesteinsoberflächen von St. Salvator kein Mangel an organischen Nährstoffen herrschte.

Das häufig angewendete PAS-Verfahren (Perjodsäure-Schiff Reaktion), bei dem mittels Farbreaktion die Eindringtiefe von Biofilmen in ein Material nachgewiesen werden kann, konnte im Fall des Stubensandsteins nicht angewendet werden. Durch das bei der Farbreaktion notwendige lange (ca. 30 minütige) Baden, Schütteln und Spülen der Probe in wässrigen Lösungen hatte das Gesteinsfragment des extrem schwach gebundenen Stubensandsteins zerstört. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen der Gesteinsoberfläche zeigten, dass an den untersuchten Stellen die Eindringtiefe der Biofilme der oberen und der unteren Kapelle unterschiedlich war. Beim Fragment der oberen Kapelle schien der Biofilm sehr oberflächlich (Bild 15). Beim Fragment der unteren Kapelle war sichtbar, dass die bakteriellen Filamente tiefer in die sehr lockere Gesteinsoberfläche eindrangen und mit Gesteinsfragmenten und Salzkristallen ein inniges Geflecht bildeten (Bild 16).

Es muss bei der Interpretation dieser Ergebnisse jedoch beachtet werden, dass aus denkmalgeschützlichen Gründen jeweils nur ein Fragment aus jeder Kapelle untersucht wurde. Ob sich die Ergebnisse auf andere Stellen der jeweiligen Kapelle übertragen lassen, ist fragwürdig.

4.2 Säureangriff

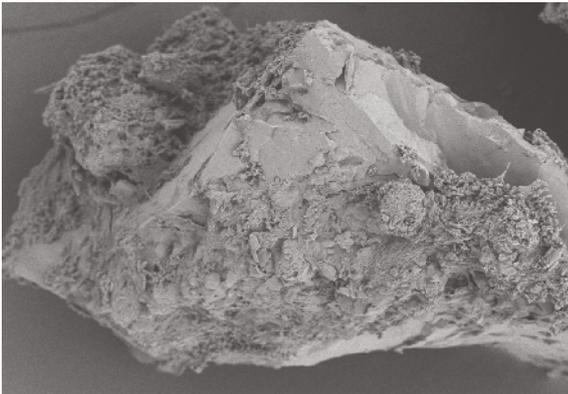
Viele Vertreter von allen auf den Gesteinsoberflächen vorhandenen Mikroorganismengruppen (v.a. Pilze, Algen, Bakterien) können unterschiedliche Säuren produzieren, die säureunbeständige Materialien auflösen und Verbindungen mit bestimmten Ionen des Steins bilden können, wobei die Anionen der Säure mit Kationen des Steins reagieren.

Die pH Messungen an den Steinoberflächen in den Felsenkapellen hatten gezeigt, dass sich keine signifikanten pH Unterschiede an Stellen mit starker Biofilmbildung und Stellen mit geringer mikrobieller Belastung befanden. An stark abgebauten Stellen mit extrem geringer Kornbindung (sandige Erscheinung) oder abgebrochener Originaloberfläche waren auffallend wenige Mikroorganismen vorhanden. An diesen Stellen war der pH-Wert stark erhöht, was darauf schließen lässt, dass die auskristallisierten Salze für die pH-Wert Erhöhung verantwortlich waren. An den meisten anderen untersuchten Stellen war der pH Wert, unabhängig von der Besiedlungsdichte, etwas über dem neutralen Bereich zwischen pH 7,5 und 8,5. Da die von Mikroorganismen gebildeten Säuren schnell mit Bestandteilen des Steins reagieren können und sich dadurch neutralisieren können, ist der in situ pH Wert kein hinreichendes Maß für die mikrobielle Säurebildung. Verschiedenen Pilze, Bakterien und Hefen, die von den Gesteinsoberflächen beider Kapellen isoliert wurden, waren daher unter Laborbedingungen auf Indikator Nährmedien auf ihre Fähigkeit zur Säurebildung hin untersucht worden.

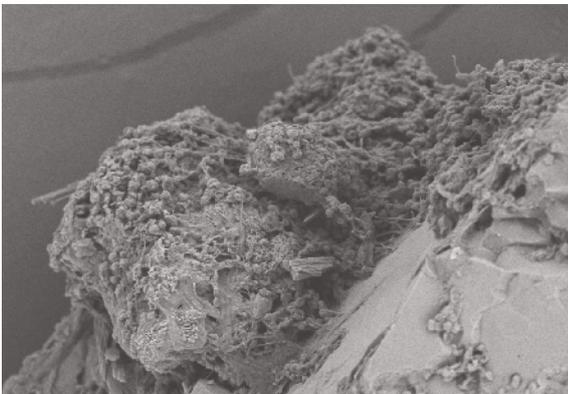
Nur 2 der 12 untersuchten Mikroorganismen waren unter Laborbedingungen fähig Säuren zu bilden.

Weiterhin wurde die Veränderung des pH Werts von Probekörpern über 2 Jahre hinweg getestet, die mit einer mikrobiellen Mischkultur einerseits aus der oberen Kapelle und andererseits aus der unteren Kapelle beimpft wurden.

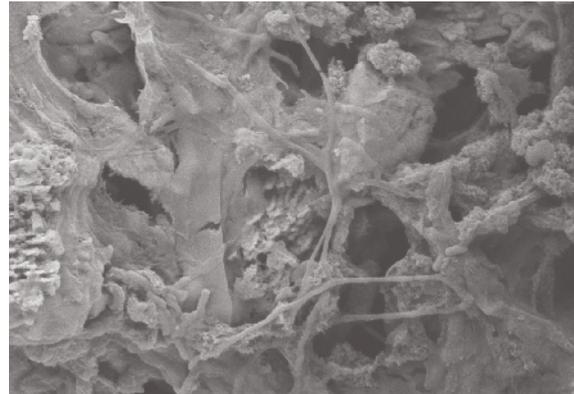
Zuerst wurde der pH-Wert der 2 Mischkulturen zu verschiedenen Zeiten des Wachstums in der Flüssigkultur getestet.



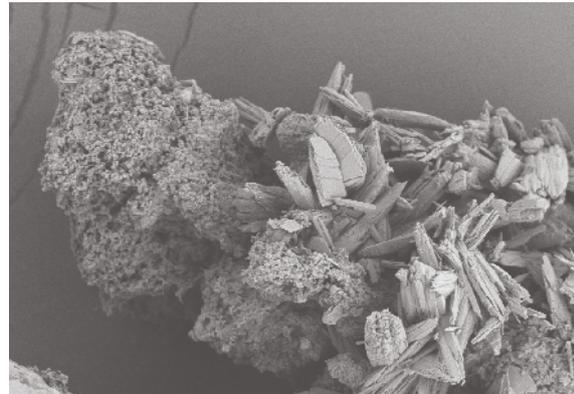
Fraunhofer IGB Sembray 4 11 -AKUS- 532K
 2416 2 4922 20.0kV X10.0k
 11.00mm x 1.00mm 1.00mm



Fraunhofer IGB Sembray 4 11 -AKUS- 532K
 2416 2 4922 20.0kV X10.0k
 11.00mm x 1.00mm 1.00mm



Fraunhofer IGB Sembray 4 11 -AKUS- 532K
 2416 2 4922 20.0kV X10.0k
 11.00mm x 1.00mm 1.00mm



Fraunhofer IGB Sembray 4 11 -AKUS- 532K
 2416 2 4922 20.0kV X10.0k
 11.00mm x 1.00mm 1.00mm

Bild 15: Probenahmestelle (a), Übersicht über ein Gesteinsfragment aus der Ölbergsszene mit partiellem Bewuchs eines oberflächlichen, gemischten Biofilms (b), Detailaufnahmen des oberflächlichen Biofilms. Deutlich sichtbar ist die starke Ausbildung der extrapolymeren Matrix („Schleim“)(c, d), Übersicht einer anderen Stelle desselben Gesteinsfragments. Auch hier, in dieser lockeren Gesteinsstruktur mit Salzkristallen, ist der Biofilm nur oberflächlich mit dem Substrat verbunden (e)

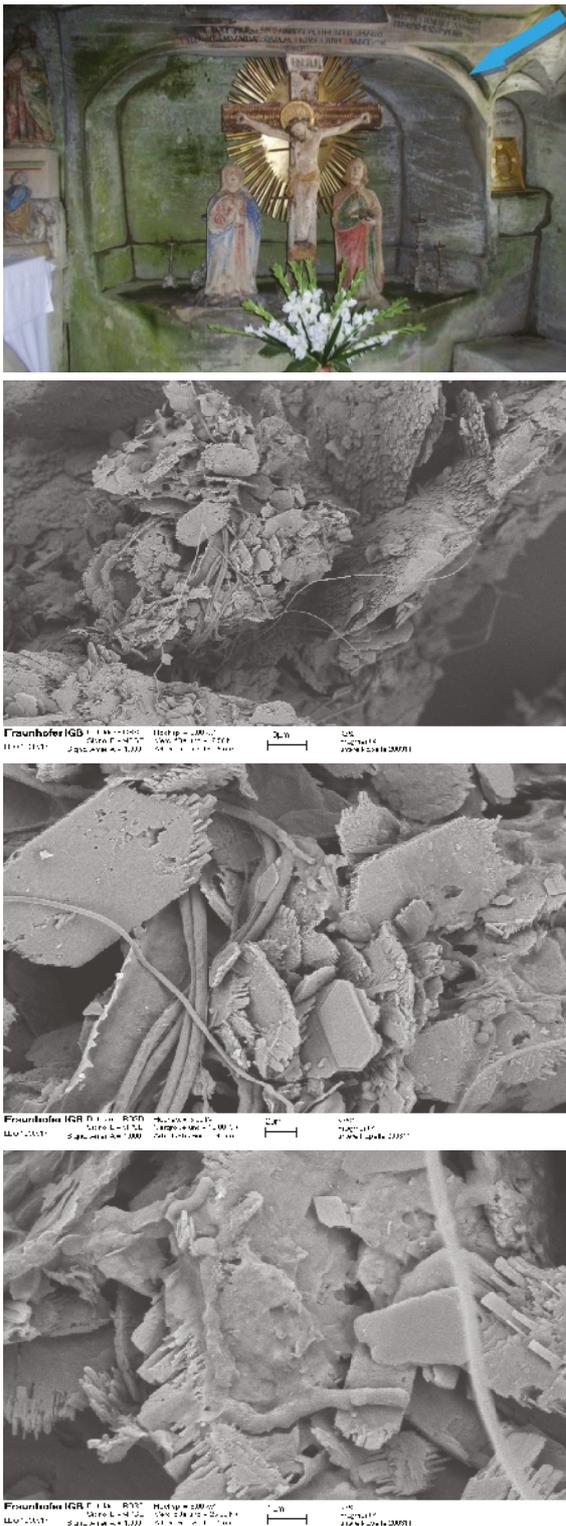


Bild 16: Probenahmestelle der Kreuzigungszene (a), Übersicht über ein Gesteinsfragment mit partiellem Bewuchs eines innig mit der Gesteinsmatrix und Salzkristallen verbundenen gemischten Biofilms (b), Detail des oberflächlichen Biofilms mit inniger Verbundenheit zwischen mikrobiellen Filamenten und Gestein (c) und starker Ausbildung der extrapolymeren Matrix („Schleim“) (d)

Das Ausgangsmedium, welches vor der Beimpfung auf pH 7,0 eingestellt wurde, war nach 2-wöchigem Wachstum im Flüssigmedium der oberen Kapelle auf pH 8,5 gestiegen und die der unteren Kapelle auf pH 8,0. Die weitere Inkubation führte bei beiden flüssigen Mischkulturen langfristig zu einem neutralen pH-Wert. Kurz vor der Inoculation der Probekörper war der pH Wert der Flüssigkulturen erneut angestiegen, was auf ein beginnendes Absterben der Zellen im Flüssigmedium zurückzuführen war. Das Inoculum der oberen Kapelle hatte am Tag der Beimpfung der Steinproben pH 8,5, das der unteren Kapelle pH 8,3. Die pH-Wert Veränderungen der sich entwickelnden Biofilme auf den Probekörpern wurde regelmäßig überprüft (Bild 17).

Auch wenn der pH Wert kurz nach der Inoculation der Steinproben im Vergleich zu den Werten vor der Beimpfung leicht abfiel, wurde der saure Bereich nie erreicht. Er blieb selbst nach zwei Jahren im Bereich von ca. 7,5.

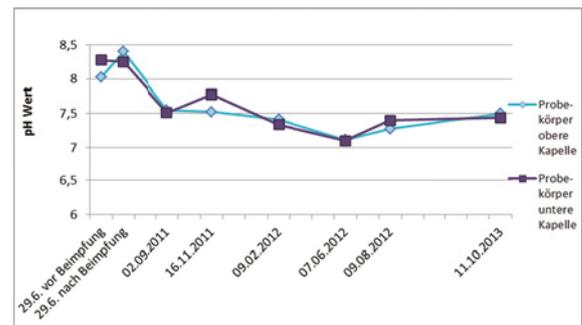


Bild 17: Veränderung des pH Werts im Verlauf von zwei Jahren nach der Beimpfung der Probekörper

4.3 Allgemeine Schäden durch mikrobielle Biofilme auf Steinoberflächen

Das zerstörerische Potential der Mikroflora konnte nicht in direkten Bezug zum Erhaltungszustand der Steinoberflächen gebracht werden, da die Schäden, die durch die vorhandenen starken Salzeinlagerungen in der oberflächennahen Steinmatrix den Erhaltungszustand signifikanter beeinflusste. Es handelte sich bei den vorliegenden Biofilmen jedoch um einen starken, großflächigen Befall. Ein starker Befall muss stets kritisch für das Substrat gewertet werden (Mansch et al. 1999).

Algen ernähren sich von Licht und CO₂ der Luft und haben damit (außer Wasser) keine ernährungsspezifischen Anforderungen an das Material auf dem sie

wachsen. Indirekt können sie jedoch das Wachstum von anderen Mikroorganismen fördern. Die Zellen selbst bestehen aus Proteinen, einer Zellwand aus Zellulose und viele Algen haben Stärkekörper als Kohlenhydratspeicher in der Zelle eingelagert, welche als Nährstoffe von anderen Organismen verwertet werden können. Weiterhin waren viele der Algen von St. Salvator in eine Schleimhülle (hauptsächlich Polysaccharide) eingebettet, welche ebenfalls vielen anderen Organismen als Nährstoffquelle dienen kann.

Da Mikroorganismen auf Gesteinsoberflächen hauptsächlich in Form von Biofilmen (mikrobielle Zellen mit extrazellulärer Matrix) vorkommen, bildet diese Schicht eine Oberfläche, die stark mit Wasser angereichert ist. Dies ist in besonderem Maße der Fall für Algen-Biofilme, da Algen besonders viel Feuchtigkeit zum Leben benötigen. Dieser feuchte oberflächliche Film, der einer Kompresse ähnelt, kann bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt Frostschäden in der obersten Gesteinsschicht auslösen.

Wechselhafte Feuchteverhältnisse können zu starken Quell- und Schwundverhalten des Biofilms führen, was zu einer signifikanten mechanischen Belastung der oberflächennahen Steinmatrix führt. Das Wasserabsorptionsverhalten des Biofilms unterscheidet sich deutlich vom originalen Stein. Ein trockener Biofilm wirkt hydrophob, während ein feuchter Biofilm eine stark wasserspeichernde Funktion besitzt mit großer Wasseraufnahmekapazität. Dadurch wird den Mikroorganismen die wichtigste Umgebungsbedingung (Wasser) für deren Wachstum bereitgestellt und wasserlösliche Bestandteile des Steins und dessen Abbauprodukte können im oberflächennahen Bereich verstärkt transportiert werden (May, 2003; Papida et al., 2000).

Biofilme verändern weiterhin den physikalischen Charakter des Objekts. Die Oberflächenstruktur wird nicht nur visuell beeinträchtigt; es werden auch physikalische Parameter verändert. Die Porengröße wird durch die Einlagerung der Zellen verringert, wodurch sich die Oberflächendichte vergrößern kann. Dadurch kann es zur Schalenbildung im Oberflächenbereich des Steins kommen.

Die physikalischen, insbesondere mechanischen, Schäden durch Mikroorganismen sind oft den Schäden von Pflanzenwurzeln ähnlich. Die mikrobiellen Filamente dringen vorwiegend entlang der Schwachstellen der Steinmatrix ein. Durch das

Wachstum und die Vermehrung von Zellen sowie durch die Feuchtigkeitsaufnahme nehmen sie an Volumen zu. Das Resultat ist, dass sich vorhandene Risse öffnen und neue Mikrorisse entstehen. Schmutz und Zellrückstände toter Mikroorganismen lagern sich in diesen Rissen ein und bilden eine Humusschicht, wodurch sich weitere Organismen (Mikroorganismen und höhere Organismen) ansiedeln können. Dies wurde bereits am Ölberg an einer Vertiefung beobachtet, wo Anfänge von Moosbildung innerhalb eines dichten mikrobiologischen Biofilms sichtbar waren (Bild 5a, b). Durch ein solches Schadensbild kann ein Kreislauf entstehen, denn eine fragmentierte, poröse Oberfläche bietet besseren Halt für Mikroorganismen, die sich dadurch besser ansiedeln können.

5 Bekämpfungsstrategien

Es wird ausgeschlossen, dass Mikroorganismen die alleinige Ursache am schlechten Erhaltungszustand Gesteinsstruktur darstellten. Es wird jedoch angenommen, dass sie am Steinzerfall durch eine Vielzahl von verschiedenen Mechanismen beitragen.

Die Entfernung bzw. Reduktion der Biofilme wurde aus folgenden Gründen angestrebt:

- Vermeiden der oben beschriebenen Schadensmechanismen durch Biofilme
- Verbesserung des homogenen Eindringens des Festigungsmittels
- Verbesserung der allgemeinen Hygiene und damit des visuellen Erscheinungsbilds, sowie Vermeidung einer beschleunigten Wiederverunreinigung der klebrig-feucht besiedelten Oberflächen.

5.1 Untersuchungen zu antimikrobiellen Behandlungen an Probekörpern

Um eine effektive und zugleich objektschonende Bekämpfungsstrategie zu entwickeln, wurden zahlreiche Tests mit chemischen und physikalischen Methoden durchgeführt. Ca. 130 Probekörper wurden hergestellt aus Bohrkernen eines ca. 1 km entfernten Tunnelbaus. Die Probekörper wurden beimpft mit relevanten Mischkulturen einerseits aus der oberen und andererseits aus der unteren Kapelle. Die entsprechend beimpften Probekörper wurden in der jeweiligen Felsenkapelle ausgelegt, um dort etablierte Biofilme ausbilden zu können.

Folgende chemische und physikalische Behandlungsmethoden wurden für die Untersuchungen ausgewählt:

- Wasserstoffperoxid H_2O_2 (10 %, 15 %),
Der Auftrag erfolgte mittels Pumpsprüher. Pro Applikation wurden 20 Sprüheinheiten aufgetragen, welche insgesamt ein Gewicht von 1,3 g hatten. Die Dosis pro Applikation entsprach $16,5 \text{ g/m}^2$. Die Behandlung wurde nach jeweils 30 min wiederholt und insgesamt 5 Mal durchgeführt. Insgesamt wurden 6,5 g H_2O_2 pro Probekörper ($78,5 \text{ cm}^2$) aufgetragen.
- 80% (v/v) Alkohol (Ethanol, Isopropanol)
Der Auftrag erfolgte mittels Pumpsprüher. Pro Applikation wurden 30 Sprüheinheiten aufgetragen, welche insgesamt ein Gewicht von 2 g hatten. Die Dosis pro Applikation entsprach $25,5 \text{ g/m}^2$. Die Behandlung wurde nach jeweils 30 min wiederholt und insgesamt 5 Mal durchgeführt. Insgesamt wurden 10 g Alkohol pro Probekörper ($78,5 \text{ cm}^2$) aufgetragen.
- UV Strahlung (254 nm)
Eine UV Lampe mit 220 Watt wurde über einen Zeitraum von 96 Stunden in 20, 50 und 100 cm Entfernung zur Oberfläche aufgestellt. Die Bestrahlungsstärke bei 254 nm entsprach bei 20 cm Abstand 1656 nW/m^2 , bei 50 cm Abstand 790 nW/m^2 und bei 100 cm 486 nW/m^2 .
- Laser 1064 nm
Zum Einsatz kam ein Nd:YAG Laser, CL 20 Backpack der Firma Clean Lasersysteme. Das emittierte Laserlicht hat eine Wellenlänge von 1064 nm. Jeder Probekörper wurde mit einer Bestrahlungszeit von 3,5 min bei maximaler Leistung (0,5 mJ) behandelt. Die Pulsdauer betrug 120 ns, die Pulsfrequenz 40 kHz und die Laserleistung betrug 20 W.

Mindestens 3 Probekörper wurden pro antimikrobieller Maßnahme behandelt. Die Effektivität wurde durch ATP Messungen vor und nach der Behandlung bewertet.

Die Untersuchungen zeigten, dass das Laserlicht die geringste Reduktion der mikrobiologischen Aktivität bewirkte. Ebenso war die UV Bestrahlung bei großer Entfernung der Strahlungsquelle nur im Vergleich zum hohen Vorzustand effizient (Bild 19). Die absoluten Werte nach der UV Behandlung mit großer Entfernung der Strahlungsquelle waren zu hoch, um als effektive Behandlung akzeptiert werden zu können. Eine geringe Entfernung der Bestrahlungsquelle erhöhte die Reduktionswirkung stark (Bild 18).

Die Alkoholbehandlung war ebenfalls erfolgreich. In der unteren Kapelle reduzierte Isopropanol (80%ig) die Mikroflora stärker als Ethanol, während in der oberen Kapelle Ethanol (80%ig) ein besseres Ergebnis lieferte (Bild 19, 20).

Wasserstoffperoxid (H_2O_2) reduzierte die Aktivität der Mikroflora am meisten. Jedoch zeigten sich in den mit H_2O_2 behandelten Probekörpern kleine punktförmige Farbveränderungen. (Bild 21). Vermutlich handelt es sich hierbei um Korrosionsprodukte von Einschlüssen in der Steinmatrix. Obwohl die desinfizierende Wirkung sehr gut war, wurde H_2O_2 nicht in in situ Versuchen getestet.

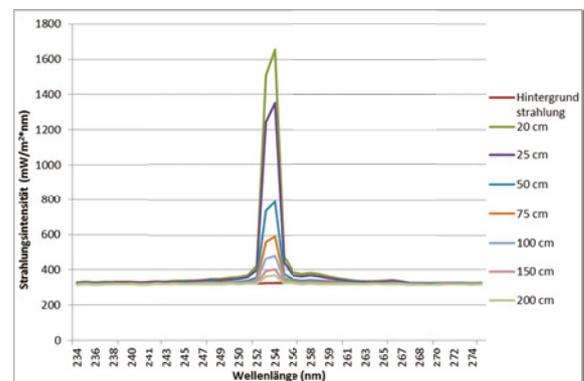


Bild 18: UV-Strahlungsintensität in Abhängigkeit von der Entfernung der Strahlungsquelle zur bestrahlten Oberfläche

5.2 Untersuchungen ausgewählter antimikrobieller Methoden an Musterflächen der unteren Kapelle

Die Musterflächen wurden im Vorraum in der unteren Kapelle am westlichen Bereich der Nordwand durchgeführt.

Problematisch bei der Interpretation der Ergebnisse war, dass jede Behandlung nur einmal durchgeführt werden konnte, da es sich um Probefelder im Originalmaterial handelte. Demnach sind die Ergebnisse nur als Tendenz zu verstehen; eine Reproduzierbarkeit ist nicht gewährleistet. Die Reduktionswirkung an den Musterfeldern der unteren Kapelle war deutlich geringer als an den Probekörpern (Bild 22 - 24). Der Grund dafür ist, dass etablierte Biofilme resistenter sind als frisch gewachsene mikrobielle Zellkulturen.

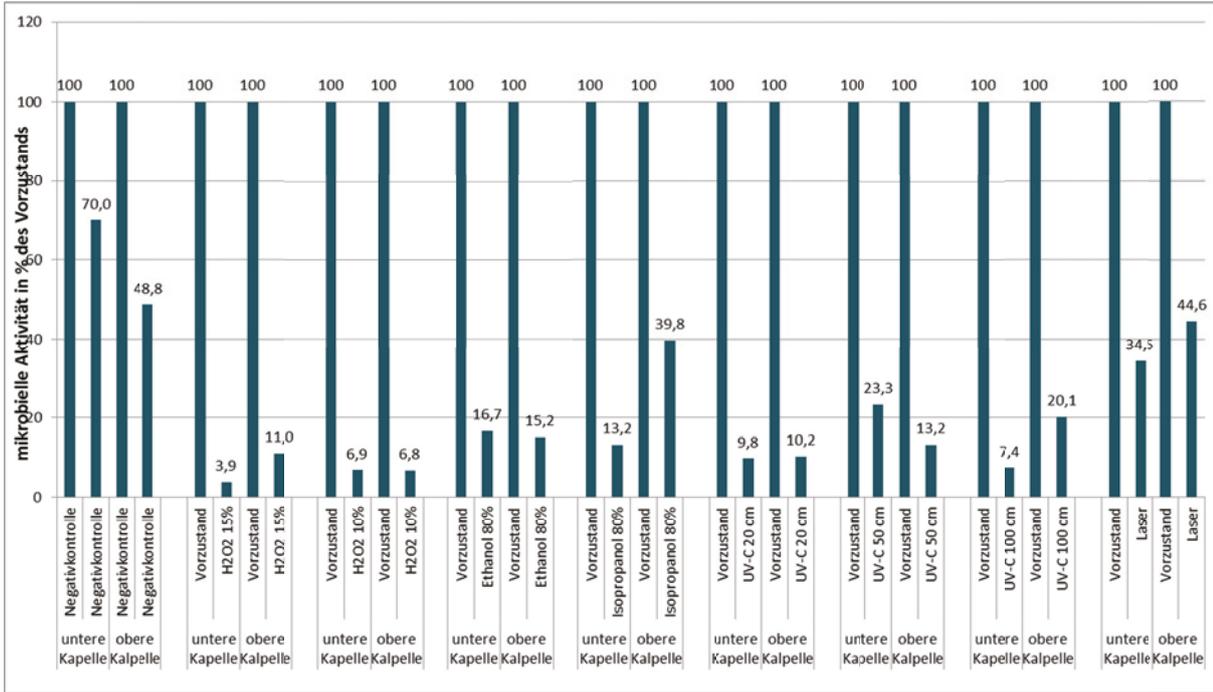


Bild 19: Prozentuale Reduktion der mikrobiellen Aktivität durch verschiedene an den Probekörpern (Bohrkerne) durchgeführten Behandlungen

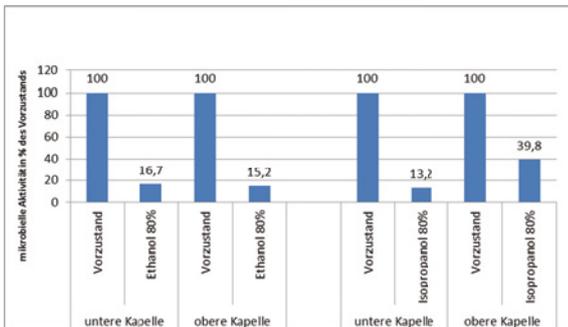


Bild 20: Effektivität von Ethanol und Isopropanol zur Desinfektion der Steinoberflächen der oberen und unteren Kapelle



Bild 21: Punktförmige, braune Farbveränderungen der Oberfläche des Probekörpers nach der H₂O₂ Behandlung

Dies sollte in den Versuchen umgangen werden, indem die Probekörper bereits vor einem Jahr beimpft wurden, damit sich innerhalb eines Jahres nahezu etablierte Biofilme entwickeln konnten. Da jedoch die Feuchtigkeit in den Kunststoffbehältern, die als Isolationsschicht zur originalen Oberfläche nötig waren, deutlich geringer war als im originalen Fels, konnte sich der Biofilm nicht entsprechend ausbilden. Weiterhin hatte der Biofilm der Originaloberflächen viele Jahre Zeit um sich zu etablieren. Dies zeigte sich auch an stark absandeten Stellen der Originaloberflächen, wo die Oberfläche zu kurze Zeit intakt bleibt damit sich dichte Biofilme ausbilden können. Die Probekörper wurden mit einer Zellkultur der umliegenden Mikroflora beimpft, um eine anfängliche hohe Zelldichte zu erreichen, aber dennoch konnten sich die Biofilme nicht in entsprechender Dichte ausbilden, wie auf den originalen Oberflächen. Die geringe Reproduzierbarkeit von Biozidbehandlungen unter Laborbedingungen auf die in situ Mikroflora ist ein wohlbekanntes Problem in der Mikrobiologie (Nugari et al., 2003).

Die mechanische Reinigung an stark befallenen Flächen der unteren Kapelle brachte keine messbare Reduktion der mikrobiologischen Aktivität (Bild 22). Der Grund dafür liegt vermutlich darin, dass es keine abtötende Behandlung ist und niemals der gesamte Biofilm einer bestimmten Stelle be-

probt werden kann. Selbst nach einer mechanischen Reinigung blieben demnach genügend Mikroorganismen übrig, um eine hohe Aktivität anzuzeigen. Warum die Aktivität nach der mechanischen Reinigung leicht anstieg, kann jedoch dadurch nicht erklärt werden. Eventuell wurde die oberste Schicht des Biofilms entfernt und darunter liegende, geschützt wachsende Organismen in der Probe gemessen.

Auch die Festigungsbehandlung der Probefelder reduzierte signifikant die Aktivität der Mikroflora. Festiger L zeigte auf den Probefeldern eine größere Hemmwirkung als Festiger 1. Höchst wahrscheinlich handelte es sich dabei um eine Kombination aus dem Einfluss des Lösemittels (verschiedene Alkohole) über mehrere Tage hinweg auf die Mikroflora und der Festigungswirkung, bei der die mikrobiellen Zellen im Festiger eingebettet werden, was den Austausch von Gasen und Stoffwechselprodukten behindert.

Isopropanol, 80%ig, (für die Anwendung in der unteren Kapelle) hemmte die mikrobielle Aktivität direkt nach der Behandlung stark, jedoch erhöhte sich die Aktivität bereits einige Wochen nach der Behandlung (Bild 23). Eine mögliche Erklärung ist, dass der Alkohol nicht ausreichte, um die Mikroorganismen abzutöten. Der Rückstand von geringen Alkoholkonzentrationen zusammen mit dem langsamer verdunstenden Wasser, welcher die mikrobielle Aktivität erhöht, konnte somit von den Zellen verstoffwechselt werden. Auffallend war der starke Anstieg der Aktivität, wenn die Flächen vor der Isopropanol-Behandlung gefestigt wurden.

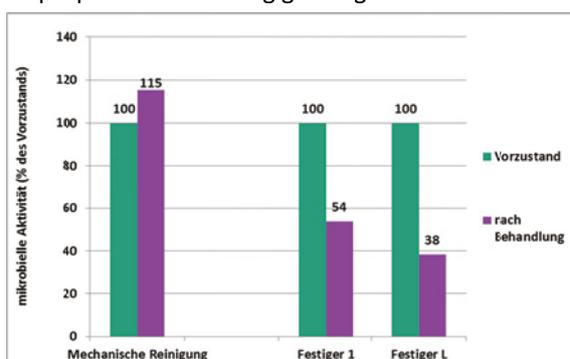


Bild 22: Prozentuale Verringerung der mikrobiellen Aktivität durch mechanische Reinigung und Festigung mit verschiedenen Festigern

UV Licht hatte, im Gegensatz zur Isopropanolbehandlung, direkt nach der Bestrahlung keine stark reduzierende Wirkung auf die Aktivität der Mikroorganismen. Die mikrobielle Aktivität reduzierte

sich jedoch weiterhin im Laufe der folgenden 6 Wochen. Lediglich die Probefelder, die bereits vor der Bestrahlung gefestigt waren, konnten durch die UV Bestrahlung nicht signifikant reduziert werden. Vermutlich reduzierte der Festiger die Eindringtiefe der UV Strahlung.

Die ausgewählten Probefelder waren sehr stark von Mikroorganismen befallen und stellten damit eine Extremsituation für die Entfernung des Biofilms in der unteren Kapelle dar. UV Strahlung ist eine reine Oberflächenbehandlung, dessen Eindringtiefe sehr gering ist und selbst bei stark UV-transparenten Materialien im oberflächennahen Bereich bleibt. Die mechanische Reinigung der Oberfläche vor der UV Bestrahlung hat daher die Effektivität der Behandlung deutlich verbessert. Trotzdem blieben unter den durch die Bestrahlung abgetöteten Zellen weitere Algenzellen lebensfähig. In Bild 25 von einer UV bestrahlten Musterfläche wird deutlich, wie die Ritzstreifen der Probenahme vor der Bestrahlung (graue Pfeile) besonders stark gebleicht wurden, da durch die Probenahme der Biofilm weitgehend entfernt wurde. Stellen, die erst nach der UV Bestrahlung geritzt wurden (grüne Pfeile) entfernten die oberste, gebleichte Schicht des Biofilms und ließen ungebleichte, grüne Zellen sichtbar werden. Die UV Bestrahlung zeigte, zusätzlich zur stärkeren Reduktion der mikrobiellen Aktivität, ein deutlich besseres visuelles Erscheinungsbild als die Isopropanol Behandlung (Bild 26).

5.3 Antimikrobielle Wirkung von kombinierten Behandlungen an Musterflächen der unteren Kapelle

Um die Effektivität einer antimikrobiellen Behandlung möglicherweise zu steigern, wurden Untersuchungen durchgeführt zu einer kombinierten Behandlung aus Isopropanol und UV Bestrahlung.

Die Effektivität der Kombinationsbehandlung wurde mittels Aktivitätsmessungen (ATP Messungen) evaluiert und über einen Zeitraum von 3 Monaten mit Negativkontrollen verglichen (Bild 27).

Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigte, dass eine kombinierte Behandlung aus einer Kombination von mechanischer Reinigung mit Isopropanol (80%) und UV Bestrahlung effektiver die auf der Musterfläche in der unteren Kapelle vorhandene Mikroflora reduziert, als jede der einzelnen Methoden.

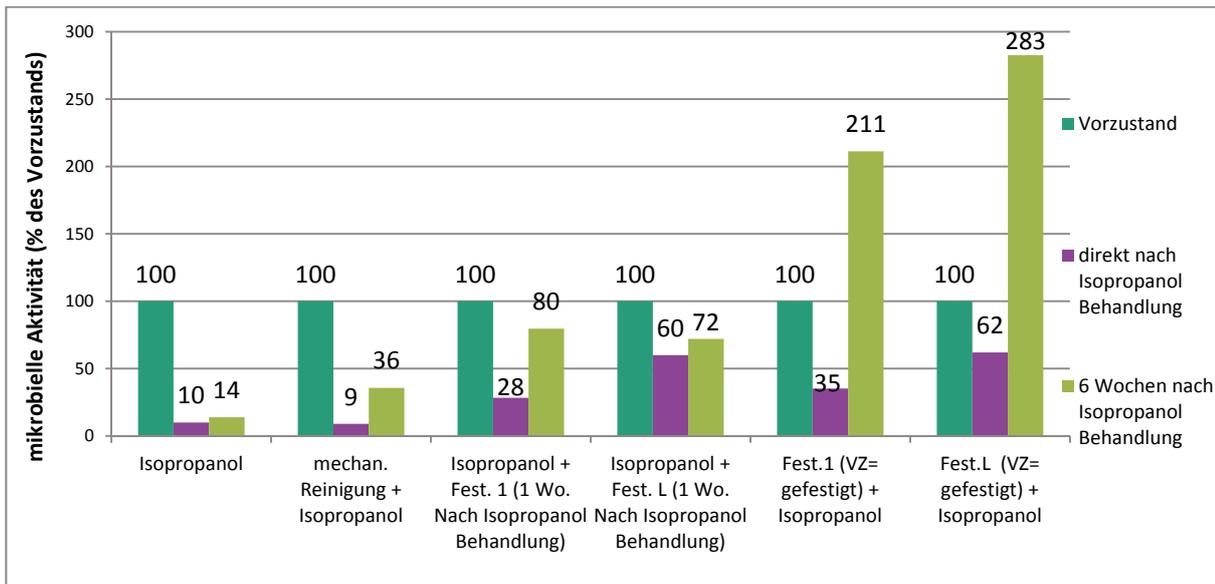


Bild 23: Prozentuale Verringerung der mikrobiellen Aktivität durch Isopropanol der Musterflächen in der untern Kapelle

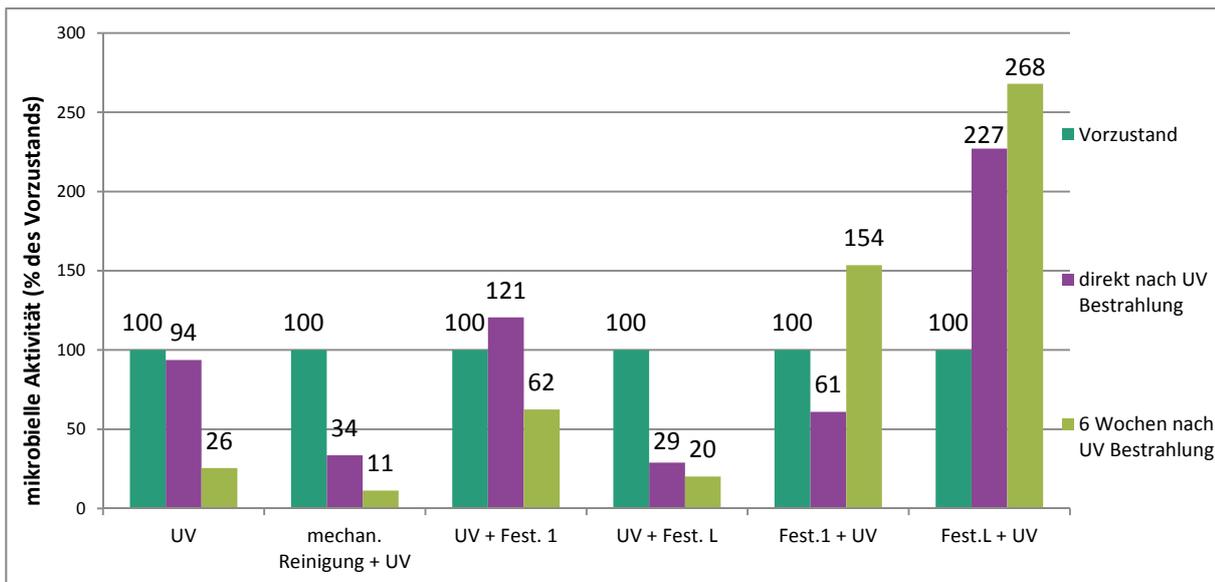


Bild 24: Prozentuale Verringerung der mikrobiellen Aktivität durch die UV Bestrahlung der Musterflächen in der untern Kapelle

Dennoch zeigten die in situ Tests auch, dass bereits nach 3 Monaten die mikrobielle Aktivität wieder deutlich zugenommen hatte. Die Aktivität war bei allen Probestellen über dem Wert des Vorzustands. Jedoch ist dies auch bei der unbehandelten Negativkontrolle der Fall. Das zeigt, dass die mikrobielle Aktivität im Laufe der Untersuchung, die von Februar bis Mai durchgeführt wurde, aufgrund des Temperaturanstiegs zunahm. Aber auch wenn die Werte wegen des klimatisch bedingten Aktivitätsanstiegs korrigiert würden, wäre die Aktivität 3 Monate nach

der Kombinationsbehandlung lediglich 43,5% der des Vorzustands.

Aus diesen Untersuchungen wird deutlich, dass eine nachhaltige Reduktion der mikrobiellen Aktivität in der untern Kapelle von St. Salvator mit den untersuchten Methoden nicht möglich ist.

Visuell ist jedoch auch noch nach einem Jahr ersichtlich, dass der Biofilm stark reduziert wurde.

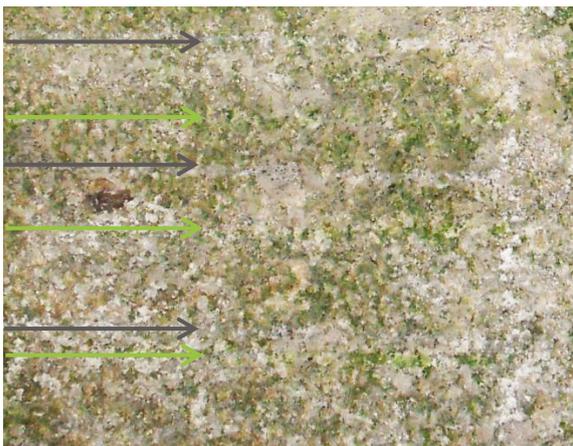


Bild 25: UV-bestrahlte Musterfläche, grauen Streifen (graue Pfeile): Probenahme vor Bestrahlung; grünen Streifen (grüne Pfeile): Probenahme nach UV Bestrahlung

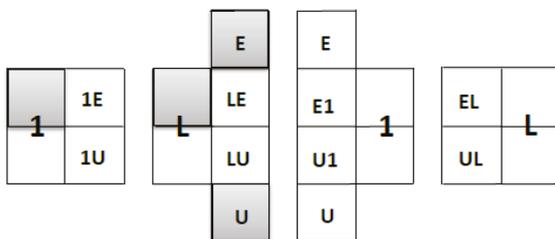


Bild 26: 1= Festiger I-1, L= Festiger II-L

U= UV-C Bestrahlung, E= Isopropanol Behandlung,
Graue Flächen= vor der Behandlung mechanisch
mit Pinsel u. Mikrofasertüchern gereinigt;
linke Seite= vor der antimikrobiellen Behandlung
gefestigt; rechte Seite= nach der antimikrobiellen
Behandlung gefestigt

Für eine großflächige Entfernung bzw. Reduktion des Biofilms muss daher das Für und Wider an jeder Stelle der Kapelle sehr gut gegeneinander abgewägt werden.

Am Ölberg war die weitest mögliche Entfernung des Biofilms notwendig, um eine geeignete Oberfläche für das gleichmäßige Eindringen des Festigers zu schaffen. Eine UV-Bestrahlung konnte am Ölberg nicht stattfinden, da während der mechanischen Reduktion des Biofilms Reste einer polychromen Fassung der Figurengruppe gefunden wurden. Die Reinigung wurde dort daher rein mechanisch durchgeführt. An Stellen, wo eine Feuchtreinigung ein besseres Reinigungsergebnis erzielte, wurde 80%iger Ethanol eingesetzt, welches in der oberen Kapelle die mikrobielle Aktivität besser reduzierte als Isopropanol (Bild 20). Die Oberflächen wurden sofort mit Reinigungstüchern abgetupft, um das übermäßige Eindringen des Ethanols in den Stein zu verhindern.

6 Schlussfolgerung

Eine umfassende Darstellung aller beteiligten Arten von Mikroorganismen wurde in diesem Forschungsprojekt nicht angestrebt. Vielmehr sollten die quantitativ bedeutendsten Mikroorganismen-Gruppen identifiziert und charakterisiert werden.

Die Untersuchungen zeigten, dass die mikrobielle Gesellschaft beider Kapellen zwar eine große Vielzahl von unterschiedlichen Mikroorganismen-Gruppen umfasste; jedoch dominierten -neben einigen Schimmelpilzen und Bakterien- verschiedene Algenarten an allen untersuchten Stellen.

Obwohl andere Faktoren, wie beispielsweise die Salzbelastung, einen größeren Beitrag am schlechten Erhaltungszustand insbesondere der Figurengruppen der Felsenkapellen einnehmen, können die zum Teil intensiven Biofilme ebenfalls am physikalischen und chemischen Abbau der Steine beitragen. Eine Reduzierung der mikrobiellen Biofilme war nicht nur wegen der dadurch induzierten Schadensprozesse erstrebenswert, sie war auch für die geplante Festigung notwendig, um das homogene Eindringen des Festigers zu gewährleisten.

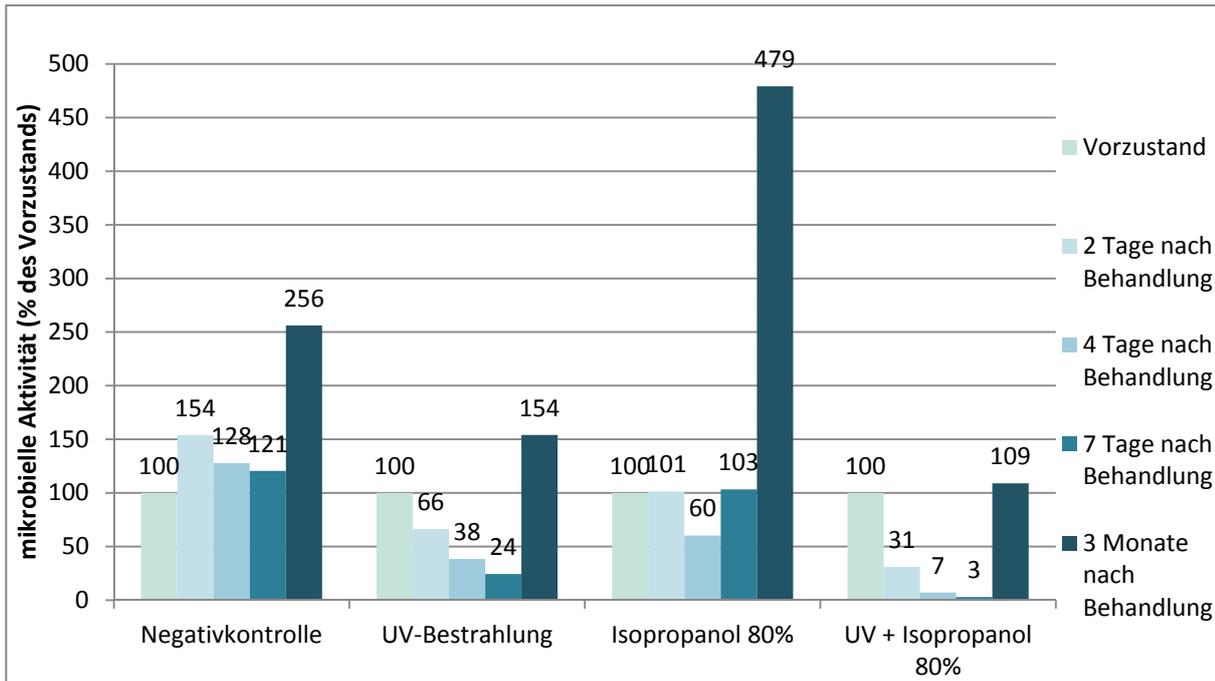


Bild 27: Prozentuale Verringerung der mikrobiellen Aktivität durch eine Isopropanol (80%ig) Behandlung, UV-Bestrahlung und Kombinationsbehandlung aus mechanischer Reinigung mit Isopropanol (80%ig) und UV Bestrahlung. Vorzustand: unbehandelter Zustand

2 Tage: Negativkontrolle: unbehandelt

UV Bestrahlung: 48h UV Bestrahlung

Isopropanol: 1 x mechanische Reinigung mit Isopropanol (80%)

UV + Isopropanol: 1 x mechanische Reinigung mit Isopropanol (80%) und 48 h UV Bestrahlung

4 Tage: Negativkontrolle: unbehandelt

UV Bestrahlung: 96h UV Bestrahlung

Isopropanol: 2 x mechanische Reinigung mit Isopropanol (80%)

UV + Isopropanol: 2 x mechanische Reinigung mit Isopropanol (80%) und 96 h UV Bestrahlung

4 Tage: Negativkontrolle: unbehandelt

UV Bestrahlung: 1 Woche UV Bestrahlung

Isopropanol: 3 x mechanische Reinigung mit Isopropanol (80%)

UV + Isopropanol: 3x mechanische Reinigung mit Isopropanol (80%) und 1 Woche UV Bestrahlung

Hauptfaktor des mikrobiellen Befalls war die erhöhte Feuchtigkeit im oberflächennahen Bereich. Dabei handelte es sich einerseits um Feuchtigkeit, die vom gewachsenen Fels ständig nachströmt und damit ohne massive Eingriffe ins Objekt nicht kontrollierbar ist. Andererseits handelt es sich dabei um temporäre, außenklimabedingte Kondensationserscheinungen an den kühlen Steinoberflächen. In der oberen Kapelle war der Einfluss des Außenklimas als Feuchtelieferant wichtiger für die Aktivität der Mikroflora, während in der unteren Kapelle die Zusammenhänge komplexer waren und vermutlich die vom Fels nachrückende Feuchtigkeit eine größere Rolle spielte als das Außenklima.

Die Kontrolle des mikrobiellen Befalls über eine Eliminierung der Ursachen (hier die oberflächenna-

he Feuchtigkeit) bei gleichzeitiger mechanischer Reinigung ist im Allgemeinen die beste und nachhaltigste Methode, um mikrobiellen Befall zu bekämpfen ("TRBA 240", Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2010; "Schimmelpilz-Leitfaden", Umweltbundesamt 2005; "Handlungsempfehlungen", Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg, 2011).

Eine Trocknung der Steinoberflächen würde wegen der starken Salzbelastung jedoch zu größeren Schäden führen als die mikrobiell induzierten Schäden. Wegen nicht untersuchbarer Wechselwirkung des neu entwickelten Festigers mit einem möglichen Biozid, wurde der Einsatz von Bioziden grundsätzlich ausgeschlossen. Daher ist die einzige nachhaltige

Lösung die regelmäßige Kontrolle mit bedarfsorientierter Reduktion der Mikroflora.

Von den vier untersuchten Behandlungsmethoden (Wasserstoffperoxid, Alkohol, UV-C Strahlung und Laserlicht) zeigte die Bestrahlung durch Laserlicht (1064 nm) die geringste Reduktion der mikrobiologischen Aktivität. Die Werte waren in der oberen Kapelle, wo die Laserreinigung zur Entfernung der dunklen Verkrustungen durchgeführt wurde, nur wenig geringer als die der Negativkontrolle. Wasserstoffperoxid (H_2O_2), hingegen, reduzierte die Aktivität der Mikroflora am meisten. Jedoch zeigten sich an den mit H_2O_2 behandelten Probekörpern kleine punktförmige Farbveränderungen (Bild 21). Diese Behandlung kam beim Schimmelpilzbefall auf den Kittungen nach der Festigung zum Einsatz. Auf den Kittungen, die eine andere Zusammensetzung hatten als der originale Stubensandstein, löste die Behandlung keine Farbveränderungen aus und wurde daher punktuell auf den einzelnen Pilzkolonien zur Desinfektion und Aufhellung der dunkel pigmentierten Kolonien eingesetzt (Fiedler, 2015). Für die Behandlung der originalen Steinoberflächen von St. Salvator kamen eine Alkohol Behandlung und eine Bestrahlung durch UV-C Licht, sowie eine Kombination von beiden Methoden, in Frage. Die Mikroflora der unteren und der oberen Kapelle unterschied sich im Verhalten gegenüber Alkohol. Während die mikrobielle Aktivität in der oberen Kapelle durch Ethanol (80%) stärker reduziert wurde, war die antimikrobielle Effektivität in der unteren Kapelle durch Isopropanol (80%) größer. UV-C Strahlung hatte eine stark abtötende Wirkung im oberflächennahen Bereich, jedoch war die Eindringtiefe nicht ausreichend, um den Biofilm bis in tiefe Schichten zu bekämpfen.

Eine Kombination aus mechanischer Reinigung mithilfe von 80%igen Isopropanol / Ethanol mit UV-C Bestrahlung zeigte eine sehr gut Reduktion des Biofilms in der unteren Kapelle. Während die makroskopische Erscheinung auch nach einem Jahr noch eine nachhaltige Biofilmentfernung suggerierte, zeigten Aktivitätsmessungen, dass sich bereits ein makroskopisch nicht sichtbarer Wiederbefall eingestellt hatte. Da im vorliegenden Fall die Ursachen des mikrobiellen Befalls (oberflächennahe Feuchtigkeit) nicht eliminiert werden konnten, entsprach dieses Resultat den Erwartungen.

Nachhaltiges Konzept für die Kontrolle des mikrobiologischen Befalls kann demnach nur die regelmäßige Wartung der Felsenkapellen sein mit einer Reduktion des Biofilms, wenn dieser sich so stark

gebildet hat, dass eine Veränderung der oberflächennahen Eigenschaften des Steins mit einhergehender physikalischer und chemischer Schädigung zu erwarten ist.

7 Literaturreferenzen

- [Carcia-Pichel, 2006] Carcia-Pichel, F.: Plausible mechanisms for the boring on carbonates by microbial phototrophs. *Sedimentary Geology*, 185 (2006), Nr. 3-4, S. 205–213
- [Fiedler, 2015] Fiedler, K.: Das Ölbergrelief am Salvator in Schwäbisch Gmünd. Bestand / Zustand / Konservierung. In: J. Frick, J. Zöldföldi, J. (Hrsg.) DBU-Projekt: „Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd. Fraunhofer IRB Verlag, 2015, S. 61-82
- [Gaylarde et al., 2001] P. M., Gaylarde, C. C., Guiamet, P. S., Gomez de Saravia, S. G., Videla, H. A. :Biodeterioration of Mayan Buildings at Uxmal and Tulum, Mexico. *Biofouling*, 17 (2001), Nr. 1, S. 41–45
- [Krüger, 2015] Krüger, M.: Monitoring des St. Salvators mit drahtlosen Sensornetzen In: J. Frick, J. Zöldföldi (Hrsg.) DBU-Projekt: „Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd. Fraunhofer IRB Verlag, 2015., S. 83-92
- [Mansch et al., 1999] Mansch, R; Bartosch, S.; Bock, E.: Schädigungsbeiträge auf und in Bauwerksgestein durch biogene Nitrit- und Nitratbelastung sowie nitritkatalysierte Sulfatbildung aufgrund von Umweltbelastung durch Emission und Immission von Schwefel- und speziell Stickstoffverbindungen: Abschlußbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben Bau 5016 E. Univ. Hamburg, Institut für Allgemeine Botanik, Abt. Mikrobiologie, 1999
- [Matthes-Sears, U., Gerrath, J. A., and Larson, D. W., 1997] Abundance, biomass, and productivity of endolithic and epilithic lower plants on the temperate-zone cliffs of the Niagara Escarpment, Canada. *International Journal of Plant Sciences*. 158 (1997), Nr. 4, S. 451-460
- [Němcová et al., 2011] Němcová, Y., Eliáš, M., Eliáš, P., Eliáš, L., Neustupa, J.: *Jenufa* gen.

- nov.: a new genus of coccoid green algae (Chlorophyceae, incertae sedis) previously recorded by environmental sequencing. *Journal of Phycology*, 47 (2011), Nr. 4, S. 928–938
- [Nugari et al., 2003] Nugari, M. P., Salvadori, O. Biocides and treatment of stone: Limitation and future prospects. In "Art, Biology, and Conservation: Biodeterioration of Works of Art" (R. J. Koestler, V. H. Koestler, A. E. Charola, F. E. Nieto-Fernandez, Eds.), S. 518–535. The Metropolitan Museum of Art, New York, 2003
- [Nienow et al., 1988] Nienow, J. A., McKay, C. P., and Friedmann, E. I.: The cryptoendolithic microbial environment in the Ross Desert of Antarctica: Light in the photosynthetically active region. *Microbial Ecology*, 16 (1988), Nr. 3, 271–289
- [Ortega-Morales, 1999] Ortega-Morales, B. O.: Approche des communautés microbiennes et leur rôle dans la biodégradation des monuments Mayas du site archéologique d'Uxmal (Yucatan, Mexique). PhD Thesis. Université de Bretagne, Brest, 1999
- [Ortega-Morales et al., 2000] Ortega-Morales, O., Guezennec, J., Hernandez-Duque, G., Gaylarde, C. C., and Gaylarde, P. M.: Phototrophic biofilms on ancient Mayan buildings in Yucatan, Mexico. *Current Microbiology*, 40 (2000), Nr. 2, S. 81–85
- [Ortega-Morales et al., 2004] Ortega-Morales, B. O., Narvaez-Zapata, J. A., Schmalenberger, A., Dousa-Lopez, A., and Tebbe, C. C.: Biofilms fouling ancient limestone Mayan monuments in Uxmal, Mexico: A cultivation-independent analysis. *Biofilms*, 1 (2004), S. 79–90.
- [Salvadori, 2000] Salvadori, O.: Characterisation of the endolithic communities of stone monuments and natural outcrops. In "Of microbes and art. The role of microbial communities in the degradation and protection of cultural heritage" (O. Ciferri, P. Tiano and G. Mastromei, Eds.), S. 89–101. Kluwer Academic/ Plenum Publisher, New York, 2000
- [Scheerer et al., 2004] Scheerer, S., Ortega Morales, O., Gaylarde, C. Microbial Deterioration of Stone Monuments—An Updated Overview. *Advances in Applied Microbiology*, 66 (2009), S. 97–139
- [Warscheid et al., 1996] Warscheid, T., Becker, T. W., and Resende, M. A.: Biodeterioration of Stone: A comparison of (sub-) tropical and moderate climate zones. In "Biodegradation & biodeterioration in Latin America" (C. C. Gaylarde, E. L. S. de Sa', and P. M. Gaylarde, Eds.), Porto Alegre, 1996, S. 63–64
- [Zöldföldi, 2015] Zöldföldi, J. et al.: St. Salvator - Materialtechnische Analysen am Stubensandstein der Ölbergruppe. In: J. Frick, J. Zöldföldi, J. (Hrsg.) DBU-Projekt: „Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd. Fraunhofer IRB Verlag, 2015. S. 93-103

Leitfäden und Richtlinien

- ["Handlungsempfehlungen", Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg, 2011] Handlungsempfehlungen für die Sanierung von mit Schimmelpilzen befallenen Innenräumen, Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg, 2011
- ["Schimmelpilz-Leitfaden", Umweltbundesamt, 2005] Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen („Schimmelpilz-Leitfaden“), Innenraumluft-hygiene-Kommission des Umweltbundesamtes, 2002
- ["TRBA 240", Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2010] Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten mit mikrobiell kontaminiertem Archivgut, Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe 240, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2010

Autorin

- Dr. Stefanie Scheerer
BioPhil, Mikrobiologie & Restaurierung
Bockelstrasse 32
70619 Stuttgart
info@biophil-art.com
<http://biophil-art.com>

Rezeptierung, Erprobung und Anwendung von feuchtetoleranten Steinfestigern für poröse Gesteine mit erhöhtem Feuchtegehalt

Eberhard Wendler

Abstract: The consolidation of heavily moistened stone by commercial ethyl silicate products is a risky procedure, since the presence of ambient water frequently leads to a rapid gel formation on the stone surface, thus preventing the further intrusion of the strengthener. Specially designed micro-emulsions of the o/w-type have been tested in the laboratory, followed by application tests in situ. With the help of drill resistance as well as ultrasonic velocity measurements it could be demonstrated that these products are able to be transported inside a moistened stone structure up to a pore size filling with water of some 50 %. Since the micellar particles have a larger size than an ethyl silicate molecule, a sufficient intrusion depth is only possible in the case of coarse grained sandstones. Therefore, future work should be done out in order to reduce the particle diameter of the micro-emulsions.

Keywords: Sandstone, consolidation, moisture-resistant stone strengthener, ethyl silicate, micro-emulsion.

1 Problemstellung und Zielsetzung

Durch Verwitterungsvorgänge am Stubensandstein, die überwiegend durch das dauerfeuchte Milieu des Felsens (mit Grundwasser- und Oberflächenwassereintrag) bestimmt werden, haben sich schwarze Krustenbildungen, biologische Zersetzungen und Salzanreicherungen (insbesondere Gips) entwickelt. Darunter befinden sich teilweise Auflockerungszonen durch partielle Aufhebung der Kornbindung. Es ist ein rasch zunehmender Verlust der originalen Steinoberflächen festzustellen.

Es wurde beabsichtigt, Verfahren für die Gesteinskonservierung / -festigung zu entwickeln und zu erproben, die in dauerfeuchtem Milieu einsetzbar und wirksam sind. Übliche Steinfestiger auf Kieselsäureester-Basis sind nicht feuchtetolerant, da sie bei Wasserangebot rasch hydrolysieren und vernetzen und somit, anstelle tiefreichender Wirksamkeit, zu einer spontanen Gelbildung auf der Oberfläche führen. Die Idee der Entwicklung lag in einem Ein-

kapseln der Wirksubstanz in eine hydrophile Hülle, welche in Feuchtigkeit latent stabil ist und durch Kapillarkräfte transportiert wird. Das unter Reaktion mit Wasser aushärtende Ethylsilikat wird zunächst, in mizellare Strukturen eingekapselt, durch Kapillarkräfte in das Gesteinsgefüge transportiert und löst dort (nach dem „Brechen“ der Mikroemulsion) die Hydrolysereaktion aus, durch anschließende Kondensation kommt es zur Gelbildung.

Um Bindungsstellen an den Mineraloberflächen für das Gel zu schaffen, müssen ggf. dort sitzende Wasserfilme verdrängt werden. Dies kann im Bedarfsfall durch eine Modifizierung des Ethylsilikats mit funktionellen Silanen erzielt werden, wenn die funktionellen Gruppen eine höhere Affinität zum mineralischen Substrat besitzen als Wassermoleküle. Gleichzeitig wirken diese polaren Moleküle als Tensidbaustein, welcher für die Bildung von mizellaren Strukturen (Micro-Emulsionen) erforderlich ist (Bild 1).

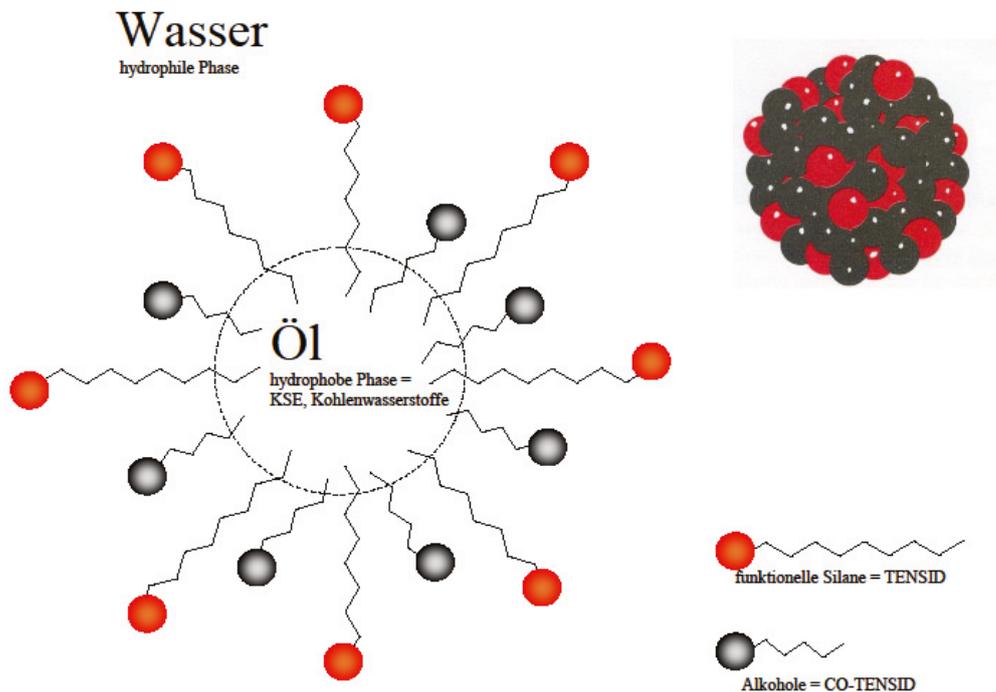


Bild 1 Bildung stabiler Microemulsionen mit Kieselsäureester-Kern. Die unpolare „Öl“-Phase befindet sich im Kern der kugelförmigen Mizelle, die polaren („wasserfreundlichen“) Gruppen sitzen auf deren Oberfläche (Microemulsion vom Typ o/w).

2 Rezeptierung

In zwei Versuchsreihen wurde zunächst ausgelotet, welche Kombinationen an unpolaren Lösemitteln und Tensiden mit Kieselsäureester in Wasser stabile Microemulsionen bilden. Dabei wurde in den meisten Fällen die unpolare Phase in definierter Menge in einem Erlenmeyerkolben vorgelegt (z.B. Lösung von Kieselsäureester in n-Butanol) und die polare Phase (z.B. Tensid in Wasser oder Wasser/Ethanolgemisch) unter kräftigem Rühren zuge tropft. Zunächst bildete sich im Regelfall eine Trübung aus, die bei weiterer Zugabe in eine opak transparente Phase überging (Microemulsion). Wurde eine kritische Menge überschritten, kam es häufig wieder zur Phasentrennung.

In Einzelfällen erfolgte ein spontane Gelierung, was gegen die Bildung eines Schutzkolloids spricht. Hier gelangte das Wasser unmittelbar in Kontakt mit der Kieselsäureesterphase und bewirkte rasch Hydrolyse und Kondensation. Dieser (unerwünschte) Vorgang ist auch zu erwarten, wenn ein übliches Kieselsäureesterprodukt mit überschüssiger Feuchte im Porenraum in Kontakt kommt.

Bild 2 zeigt die erprobten Zusammensetzungen und eine vierstufige Bewertung der Mischungen (++ , + , - , --), die auch die Lagerstabilität innerhalb von 48 h berücksichtigte. Die Mischungen I-1 und II-L wurden als aussichtsreich bewertet und in der Folge weiter verwendet.

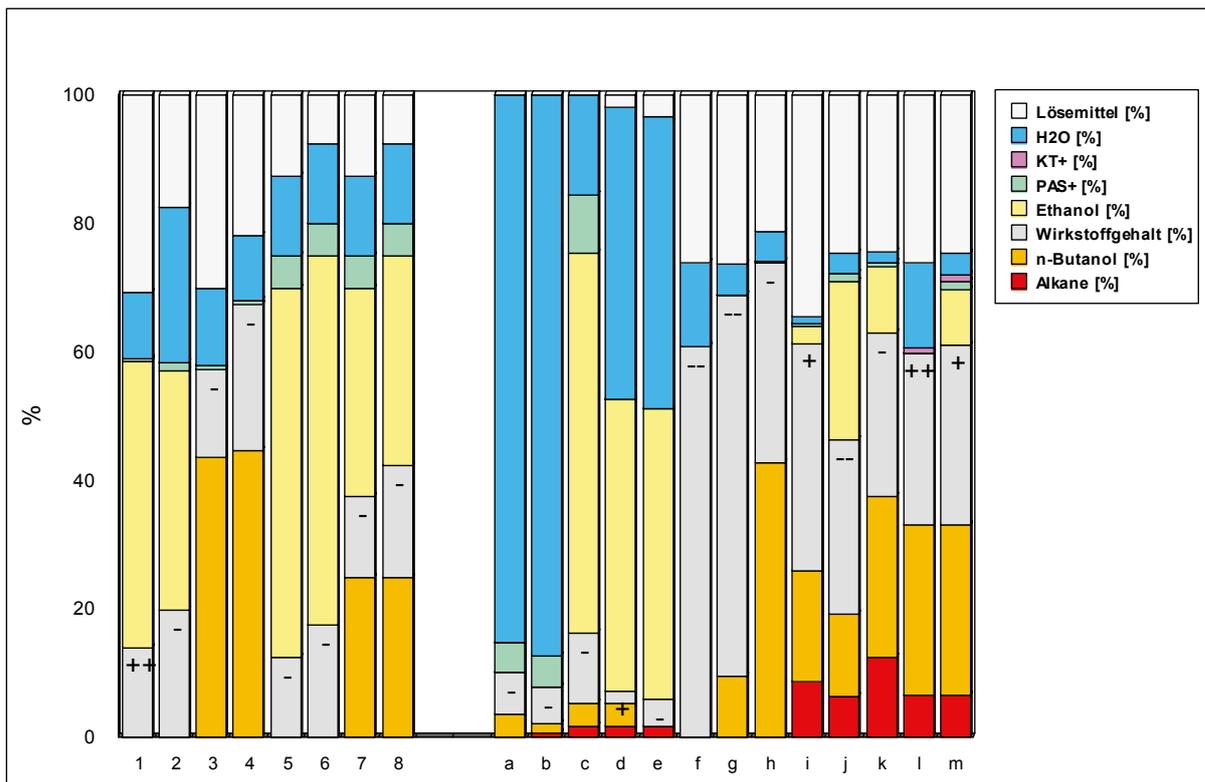


Bild 2 Zusammensetzung der geprüften Kombinationen und Bewertung (Bildung einer stabilen Microemulsion). Die farbliche Kennzeichnung der Komponenten gibt näherungsweise die Abfolge der Polaritäten wieder (rot = völlig unpolar, blau = stark polar). Die Kieselsäureester-Komponente wurde jeweils in Wirkstoffgehalt und Lösemittel aufgeteilt (Lösemittel aus dem Kieselsäureester-Produkt, genaue Zusammensetzung nicht bekannt). Versuchsserie I (Varianten 1 – 8). Versuchsserie II (Varianten a – m). KT+ = kationisches Tensid. PAS+ = protoniertes Aminoalkylsilan in wässriger Phase.

3 Gesteinseigenschaften

Für die Erprobung im Labor wurden Kernproben aus zwei geologischen Sondierbohrungen entnommen und im unbehandelten Zustand zerstörungsfrei die mechanischen und hygri-schen Gesteinseigenschaften ermittelt. Die identischen Prüfkörper dienen anschließend der Laborerprobung von Festiger-Favoriten im definiert feuchte-konditionierten Zustand. Anschließend können die Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand in gleicher Weise geprüft werden.

Die kapillare Wasseraufnahme des Sandsteins ist hoch. Der Wasseraufnahmekoeffizient (w -Wert) aller Gesteinstypen liegt zwischen 5 und $15 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0.5}$. Grobkörniges Material hat dabei keine höhere Saugfähigkeit als feinkörniges.

Die Porosität liegt ebenfalls in relativ engen Grenzen (20 - 25 Vol.%) und nimmt mit zunehmender Grobkörnigkeit des Materials tendenziell ab.

Die Festigkeit, hergeleitet aus Ultraschallgeschwindigkeit und dynamischem E-Modul, zeigt starke Schwankungen und kann als gering bis sehr gering bezeichnet werden.

4 Laborerprobung

Die beiden als geeignet beurteilten wasserstabilen Varianten (s.o.) wurden zunächst an wassergesättigten Sandsteingranulaten erprobt. Dazu wurden aus dem lokalen Stubensandstein Lockersandfraktionen hergestellt und auf eine Fullerverteilung ausgemischt (Größtkorn 0,5-1 mm sowie deutlich geringere Mengenanteile der beiden nächst-kleineren Siebfraktionen). Dieses Gemenge dürfte in seiner Struktur dem stark absandenden Material in situ zumindest nahe kommen.

Die Wassersättigung dieser Lockersandmischung lag bei ca. 38 Gew.-%. Für die Sickersversuche (Eindringtest) wurden Chargen mit definierter Feuchte hergestellt: 50 %, 25 %, 12,5 % Wassersättigung. Diese

sowie eine trockene Sandmischung wurden jeweils 10 cm hoch in ein Glasrohr (12,5 mm Innendurchmesser) gefüllt und von oben her jeweils 5 ml der favorisierten Kieselsäureester-Microemulsion zugegeben. Gemessen wurden die Zeiten der vollständigen Absorption der Flüssigkeit sowie ggf. die Ankunftszeit des Flüssigkeitssaums am unteren Rohrende und die ggf. austretende Überschussmenge.

Bei einer Wassersättigung bis zu 25 % war keine Behinderung des Eindringens feststellbar, der gesamte Sand im Glasrohr war gleichmäßig durchsetzt und gefestigt worden. Eine weitere Steigerung der Durchfeuchtung auf 50 % Wassersättigung führte dagegen zu einer merklichen Behinderung des Eindringens, am oberen Ende blieb ein ca. 1 cm hoher Flüssigkeitspegel bestehen. Die große Wassermenge bewirkte hier offenbar eine gesteigerte Reaktivität des Kieselsäureesters trotz seiner Einbettung in das Schutzkolloid. Die Gelierung in den Poren verhinderte nach ca. 2 Minuten ein weiteres Eindringen des Mittels. Es gibt also offenbar eine kritische Obergrenze für die Materialdurchfeuchtung, die trotz Einbettung des Festigers in das Schutzkolloid eine zu rasche Gelierung bewirkt. Dieser Durchfeuchtungsgrad im Lockersandversuch entspricht in seiner Absolutmenge etwa der vollständigen Wassersättigung des Stubensandsteins. Der Zustand entspricht damit nicht der in-situ-Realität, eine Vollsättigung des Porenraums würde zudem den Zutritt jeglichen Materials ohnehin verhindern ("wo ein Körper bereits ist, kann kein anderer sein").

Die erwähnten (Abschnitt 3) Sandsteinprüfkörper aus dem näheren Umfeld der Kapelle wurden bei jeweils bekanntem Porenvolumen so feuchte-konditioniert, dass dies einmal 25 %, im anderen Falle 50 % Porenraumsättigung entspricht. Insgesamt 7 Bohrkernabschnitte, die zuvor mechanisch und hygrisch klassifiziert worden waren, wurden mit den entsprechend berechneten Wassermengen mittels Injektionsspritze befrachtet und anschließend, in Kunststofffolien abgedichtet, isotherm bei 20°C für eine Woche gelagert, um eine annähernde Gleichverteilung der Feuchtigkeit über den Probenquerschnitt zu erhalten.

Anschließend wurden die derart vorkonditionierten Prüfkörper mit zwei unterschiedlichen Favoritenrezepturen und (als Vergleich, Referenz) einem marktgängigen KSE kapillar getränkt. Die Mittelaufnahmeraten schwankten probebedingt stark, ein quantitativer Unterschied zwischen den beiden unterschiedlichen Konditionierungsbedingungen war dabei nicht erkennbar.

Nach Aushärtung wurde die Wirksamkeit durch tiefenabhängige Messung von Ultraschallgeschwindigkeit und dynamischem E-Modul im Vergleich zum Vorzustand nachgewiesen. Messungen des Bohrwiderstandes dienten der Überprüfung der Gleichmäßigkeit der Festigung in die Tiefe.

Bild 3 zeigt die Tiefenprofile für die Ultraschallgeschwindigkeit (nach 6-wöchiger Aushärtung und anschließender Trocknung) und den zugehörigen, näherungsweise aus der Ultraschallgeschwindigkeit und der jeweiligen Rohdichte ermittelten dynamischen E-Modul. Deutlich erkennbar ist hier in beiden Fällen die gefestigte Zone und deren Tiefenerstreckung. Das Resultat ist für die beiden neu rezeptierten Varianten (trotz teilweise deutlich geringerer Gelabscheiderate) jeweils klar besser als für das marktübliche Produkt (ca. 33 % Feststoffgehalt).

Weniger deutlich erkennbar sind die Unterschiede in den Bohrwiderstandsprofilen der mit 25 % Porenraumfüllgrad feuchte-befrachteten Proben (Bild 4, oben). Hier zeigen alle drei Produkte (gegenüber der unbehandelten Rückseite eines Kerns) eine klare Festigkeitssteigerung. Im Gegensatz dazu zeigt das marktübliche Produkt bei den mit 50 % Porenraumfüllgrad feuchte-befrachteten Proben mit dieser Prüfmethode keine erkennbare Wirksamkeit, während die beiden feuchteresistenten Produkte eine solche klar erkennen lassen (Bild 4, unten). Offenbar ist die Prüfung der Ultraschalllaufzeit (im Transmissionsverfahren) empfindlicher und damit besser geeignet, um Festigkeitssteigerungen zu detektieren. Diese Methode läßt sich in situ allerdings nur in freistehend figuralen bzw. entsprechend hinterschnittenen Reliefbereichen anwenden.

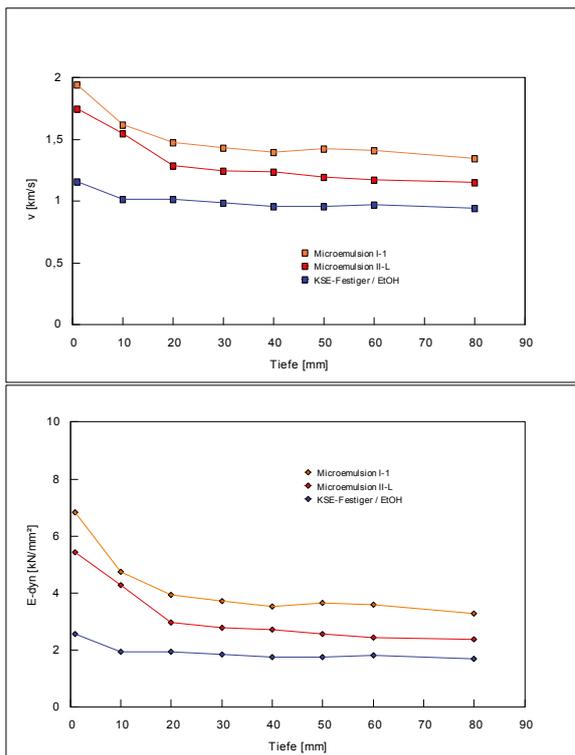


Bild 3 Tiefenprofile von Ultraschallgeschwindigkeit (oben) und zugehörigem dynamischen E-Modul (unten) nach stirnseitiger Tränkung mit unterschiedlichen Kieselsäureester-Produkten und 6-wöchiger Aushärtung. Proben vor Behandlung zu 50 % mit Wasser gesättigt. Produkt I-1: ca. 16 % Gelabscheiderate. Produkt II-L: ca. 26 % Gelabscheiderate. Referenzprodukt 510/EtOH: ca. 33 % Gelabscheiderate.

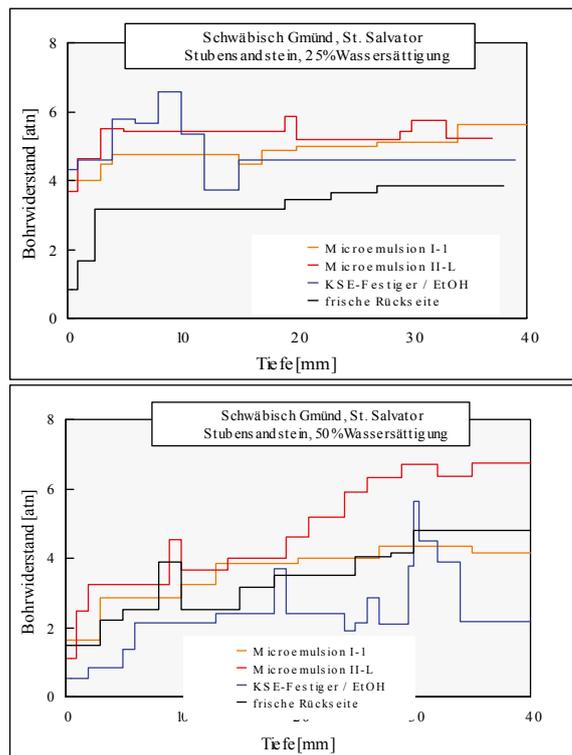


Bild 4 Tiefenprofile des Bohrwiderstands (Mittelwerte aus je 2 Einzelmesskurven) nach stirnseitiger Tränkung mit unterschiedlichen Kieselsäureester-Produkten und 6-wöchiger Aushärtung. Oben: Proben vor Behandlung zu 25 % mit Wasser gesättigt. Unten: Proben vor Behandlung zu 50 % mit Wasser gesättigt. Jeweils schwarz: unbehandelte Rückseite der Kernproben (jeweils Mittelwerte über drei Kernproben). Produkt I-1: ca. 16 % Gelabscheiderate. Produkt II-L: ca. 26 % Gelabscheiderate. Referenzprodukt 510/EtOH: ca. 33 % Gelabscheiderate.

5 Musterflächen

Im Bereich der unteren Kapelle waren im nördlichen Wandbereich an stark vergrünteten Stellen Musterflächen mit beiden favorisierten Festigern angelegt worden. Um einen besseren Zutritt in das Porengefüge zu erzielen, waren im Vorfeld der Behandlung an Teilflächen Versuche unternommen worden, das Ausmaß der Veralgung durch Behandlung mit Ethanol, alternativ durch Bestrahlung im UV-Bereich zu reduzieren. Nach Ablauf der notwendigen Erhärtungsdauer wurden die Flächen mittels Bohrwiderstandsmessung überprüft (Bild 5 und 6). Deutlich erkennbar ist bei der unbehandelten Ver-

gleichsprobe ein Festigkeitsmaximum im Tiefenbereich um 5 mm. Dieses bleibt auch nach Festigung teilweise erkennbar, Ursache hierfür könnte u. U. eine Anreicherung von Gips sein.

Summarisch läßt sich trotz (erwartungsgemäß) hoher Streubreite des inhomogenen Stubensandsteins eine eher geringe Festigungssteigerung für das Produkt I-1, eine eher deutliche für das (wirkstoffreichere) Produkt II-L erkennen.

Eine weitere Musterfläche war in der oberen Kapelle (Westwand in der Beichtstuhlnische) angelegt worden. Hier beschränkte sich die Tiefe der deutlichen Entfestigung auf nur ca. 1- 2 mm. Eine deutliche mikrobielle Besiedlung war hier nicht vorhanden, so dass entsprechende Vorbehandlungen ent-

fielen. Nach Anwendung beider Festiger und Aushärtung erfolgte auch hier eine Überprüfung mittels Bohrwiderstandsmessung (Bild 6). Auch an dieser Testfläche ist der Festigungserfolg mit dem Produkt

I-1 eher gering, jedoch klar vorhanden. Die Behandlung mit dem Produkt II-L ergibt dagegen fast einen optimal ausgeglichenen Verlauf.

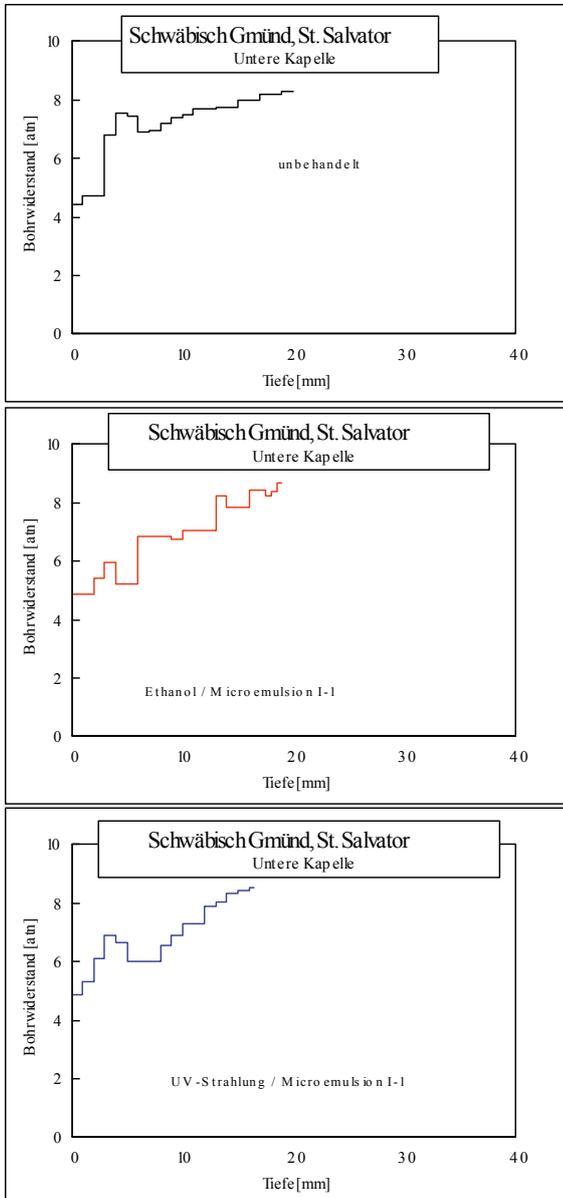


Bild 5 Musterfläche in der unteren Kapelle. Tiefenprofile des Bohrwiderstands (Mittelwerte aus je 2 Einzelmesskurven) vor/nach Algenreduzierung, nachfolgender Tränkung mit dem feuchteresistenten Produkt I-1 und anschließender Aushärtung. Mittelwerte aus je zwei Einzelmessungen.

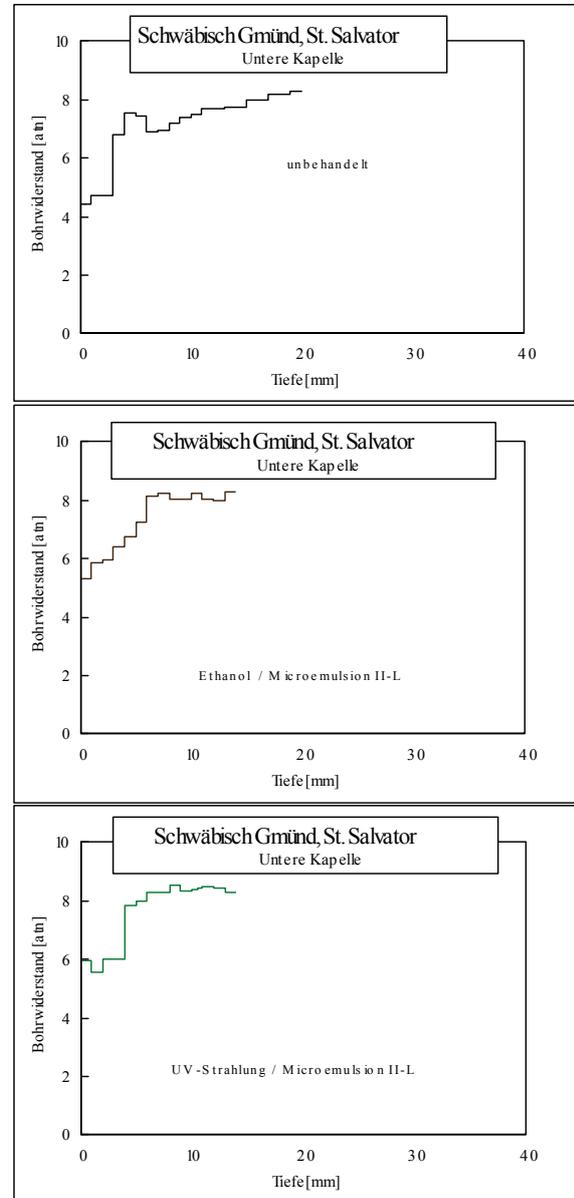


Bild 6 Musterfläche in der unteren Kapelle. Tiefenprofile des Bohrwiderstands (Mittelwerte aus je 2 Einzelmesskurven) vor/nach Algenreduzierung, nachfolgender Tränkung mit dem feuchteresistenten Produkt I-1 und anschließender Aushärtung. Mittelwerte aus je zwei Einzelmessungen.

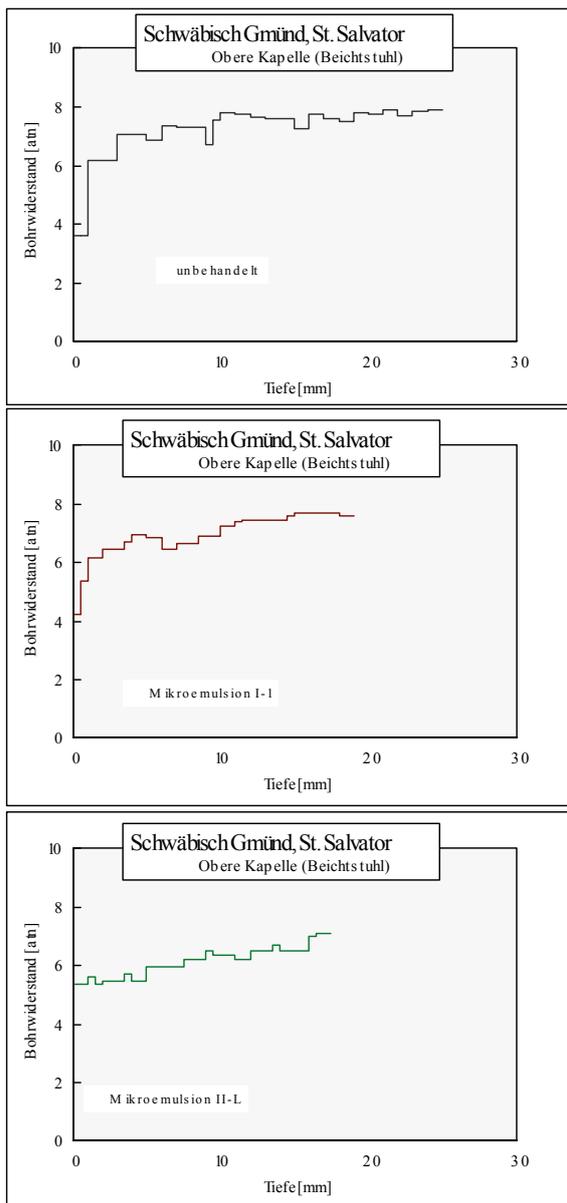


Bild 7 Musterfläche in der oberen Kapelle. Tiefenprofile des Bohrwiderstands (Mittelwerte aus je 2 Einzelmesskurven) vor/nach Tränkung mit den feuchteresistenten Produkten I-1 und II-L sowie anschließender Aushärtung. Mittelwerte aus je zwei Einzelmessungen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen des DBU-Projekts entwickelten feuchteresistenten Steinfestiger auf Kieselsäureester-Basis sind in der Lage, wirksam in feuchtes, poröses Sandsteinmaterial einzudringen und in der Tiefe ihre gewünschte Wirkung zu entfalten. Voraussetzung dabei ist die Verfügbarkeit eines nicht mit Wasser gefüllten Restporenvolumens, welches im vorliegenden Fall bei ca. 50 % des ursprünglichen Wertes liegt. Da es sich bei den Rezepturen um Microemulsionen vom Typ o/w handelt, sind die molekularen Strukturen, welche sich durch den Porenraum bewegen sollen, deutlich größer als ein Kieselsäureester-Molekül (ca. um den Faktor 8 – 10). Es ist also davon auszugehen, dass sich die Produkte in engerporigen Systemen (z.B. fein- bis mittelkörnige Sandsteine) weniger gut applizieren lassen, bzw. dass das verfügbare Restporenvolumen dann entsprechend größer sein müsste. Eine weitere Hürde stellen in diesem Zusammenhang auch oberflächennahe Verdichtungen von Gefügen dar, häufig (und partiell auch im vorliegenden Fall) durch Anreicherung von Gips bedingt. Noch nicht abschließend geklärt werden konnten die Gründe für die teilweise reduzierte Lagerstabilität der Produkte. Im Normalfall wird bei sachgerechter Lagerung von einer Stabilität zwischen 6 und 12 Monaten ausgegangen, jedoch sollte dies in Anbetracht der noch geringen Erfahrungen jeweils sorgfältig überprüft werden.

Die Anwendung dieser neuartigen Produkte erfordert gewissenhafte Voruntersuchungen, insbesondere müssen der tiefenabhängige Feuchtezustand des Untergrundes sowie materialbedingte Veränderungen im Tiefenverlauf bekannt sein. Für fein- bis mittelkörnige Untergründe sind vorausgehende Tests in Werkstatt oder Labor obligatorisch, da hier noch keine Erfahrungen vorliegen.

Autor

Wendler, Eberhard
 Fachlabor für Konservierungsfragen in der
 Denkmalpflege
 Mühlangerstr. 50/1
 81247 München
 Email: e.wendler@t-online.de

Klimakonzeption zur präventiven Konservierung des St. Salvators

Aspekte zum Schadensrisiko durch Salze und zur Schimmelpilzbildung unter Berücksichtigung der Nutzung

Markus Krüger

Abstract: Anfang des Jahres 2015 wurde der St. Salvator in Schwäbisch Gmünd nach der umfangreichen Restaurierung insbesondere der Ölberggruppe wieder der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Auf der Grundlage der Erkenntnisse der vorangegangenen umfangreichen Forschungsaktivitäten wird in diesem Artikel der Frage nachgegangen, welche konkreten Maßnahmen im Rahmen der präventiven Konservierung und dem Erhalt der Kapellen des St. Salvators zielversprechend sind. Der vorliegende Beitrag befasst sich insbesondere mit dem Aspekt der klimatischen Situation innerhalb der Felsenkapellen, deren Auswirkung auf das weitere Schädigungsrisiko sowohl aufgrund von möglicher Salzkristallisation als auch durch Schimmelpilzbildung. Besonderes Augenmerk gilt der Berücksichtigung der hierbei sehr konträren Anforderungen an ein optimal zu gestaltendes Klima, welches in der Gesamtheit ein minimales Schädigungspotenzial offenbart und gleichzeitig die Nutzung des St. Salvators durch die Öffentlichkeit nicht signifikant einschränkt.

Keywords: Klimamonitoring, instrumentierte Dauerüberwachung, Klimakonzept, präventive Konservierung, Schimmelpilz, Salzkristallisation

1 Einleitung

Der Erhalt historischer Bauwerke für zukünftige Generationen ist eine große Herausforderung. Auch der St. Salvator in Schwäbisch Gmünd stellt ein bedeutsames und gleichsam schützenswertes Objekt dar, wobei als einmalige Besonderheit die direkt aus dem anstehenden Fels gehauene, und damit mit dem Salvator untrennbar verbundene Ölberggruppe hervorgehoben werden muss. Der Restaurierung und Konservierung der Ölberggruppe galt daher auch die primäre Aufmerksamkeit im Rahmen des DBU-Projekts "Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator (Schwäbisch Gmünd)".

Nach sorgfältig durchgeführten Voruntersuchungen und der differenzierten Beurteilung der Gesamtsituation mit all seinen Teilproblematiken und der

schließlich durchgeführten Steinfestigung Ende 2014 war der Frage nachzugehen, welche Maßnahmen zukünftig einen positiven Beitrag im Rahmen einer präventiven Konservierung des Objekts leisten können. Die Notwendigkeit, sich mit dieser Fragestellung differenziert auseinanderzusetzen, beruht vornehmlich auf dem Umstand, dass insbesondere in dem vergangenen Jahrhundert die Schädigung insbesondere der Ölberggruppe stark zugenommen hatte. Zwar konnte mit den aktuell durchgeführten Konservierungsmaßnahmen eine Festigung der Ölberggruppe vorgenommen werden, jedoch wurde die Festigung unter konservatorischen Gesichtspunkten sehr behutsam vorgenommen, um so nicht Fehler, wie sie bei anderen Objekten in der Vergangenheit vielfach gemacht wurden, zu wiederholen. Dies bedeutet allerdings auch, dass trotz der durchgeführten Maßnahme weiterhin ein Schädigungspotenzial insbesondere durch Salzkristallisation besteht.

Die im Folgenden diskutierten Maßnahmen zielen daher darauf ab, das Schädigungspotenzial durch Salzkristallisation auf ein Minimum zu reduzieren. Gleichwohl gilt es Problematiken wie Schimmelpilzbildung bzw. Algenbewuchs zu berücksichtigen. Alle diese Problematiken sind dabei am St. Salvator nicht grundsätzlich neu, sondern über die Jahrhunderte hinweg nur unterschiedlich in Ihrer Ausprägung. Variationen in der Ausprägung von Schädigungsprozessen sind dabei durchaus nutzungs- und nutzerabhängig.

Ein berühmtes Beispiel sind in diesem Zusammenhang die Höhlen von Lascaux. Unentdeckt überdauerten die Malereien gemäß wissenschaftlicher Datierungen 17.000 Jahre ohne bedeutsame Schädigungen. Die wenigen Jahrzehnte, in denen die Höhlenmalereien Besuchern zugänglich waren, reichten jedoch aus, signifikante Schädigungsprozesse zu initiieren. Diese Schädigungsprozesse, vorwiegend

Schimmelpilzbildung, dauern trotz Schließung der Höhlen für Besucher und der Installation einer Klimatisierung bis heute an [Martin-Sanchez 2014]. Dies liegt im Wesentlichen an dem Umstand, dass die relative Luftfeuchte auf Werte um 100% rF in den Höhlen eingestellt wurde, was dem historischen Höhlenklima entsprechen dürfte.

Vor diesem Hintergrund sind ähnliche Überlegungen hinsichtlich der Klimakonzeption für den teilweise höhlenähnlichen Charakter der Ölberggruppe des St. Salvator durchaus angebracht. Es ist nämlich nicht davon auszugehen, dass die Feuchtezufuhr aus dem anstehenden Fels zukünftig abreißt oder gar Überlegungen in die Richtung angestellt werden sollten, den Fels hinter der Ölberggruppe trocken zu legen. Das damit verbundene mögliche Schädigungspotenzial für die Ölberggruppe mit der Gefahr des Totalverlusts in naher Zukunft ließe sich nach bisherigem Wissensstand nicht kalkulieren.



Bild 1 Ölberggruppe des St. Salvators nach der Restaurierung

2 Schädigungsszenarien und Schädigungsrisiko

2.1 Schädigungsrisiko durch Salzkristallisation

Nach bisherigen Erkenntnissen ist der hohe Schädigungsgrad an der Ölberggruppe vornehmlich auf Salzkristallisation zurückzuführen [Zöldföldi 2015]. Oftmals ist die Schädigung durch Salzverwitterung

ein langwieriger Prozess, der zunächst nach einer anfänglichen Ruhephase und einer Aufkonzentration von Salzen im Bereich der Steinoberflächen nur geringe Schädigungen bewirkt. Nach einer längeren Initiierungsphase wird jedoch auch häufig ab einem gewissen Zeitpunkt eine starke Schädigungszunahme verzeichnet, deren Verlauf oftmals exponentiell ist. Eine exponentielle Zunahme der Steinverwitterung war auch an der Ölberggruppe im St. Salvator erkennbar, weswegen die umfangreichen Maßnahmen zur Konservierung bzw. Steinfestigung eingeleitet wurden.

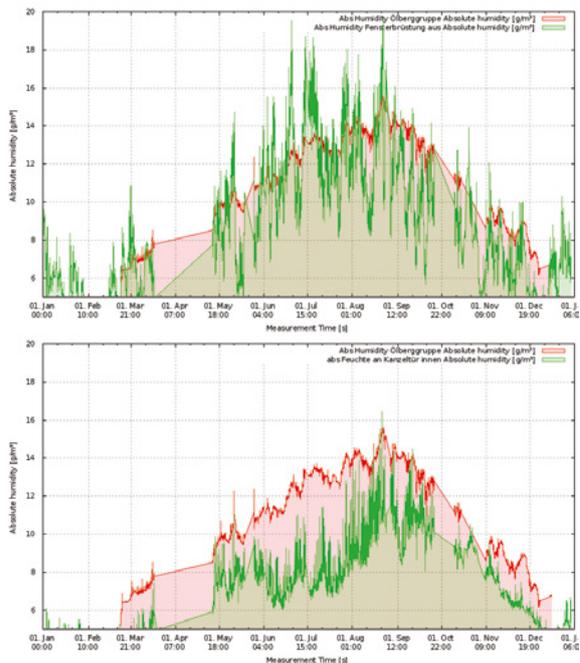


Bild 2 Absolute Feuchte an verschiedenen Messstellen 2012 (Außenklima sowie Nahfeldklima an Ölberggruppe und Kanzeltürwand)

Gemäß der Untersuchungen der MPA Universität Stuttgart liegen für die verschiedenen Probenahmestellen im Bereich des Ölbergs sehr unterschiedliche Ergebnisse bezüglich der vorhandenen Salze und Salzkonzentrationen vor (siehe diesbezüglich auch Abschlussbericht zum DBU Projekt [DBU 2015]). Als bauschädliche Salze wurden neben Gips auch Magnesiumsulfate, Natriumsulfate sowie auch Chloride detektiert. Berücksichtigt man hierbei die vorliegenden klimatischen Verhältnisse in der oberen Kapelle, so ergibt sich insbesondere anhand der Klimamessungen aus dem Jahr 2012, dass zumindest im Jahr 2012 vorwiegend mit einer nahezu durchgehenden Verdunstung von Feuchtigkeit über die Steinoberflächen auszugehen war [Krüger 2015]. Diesen Schluss kann man aus dem Vergleich der absoluten Feuchte im Nahfeld des Ölbergs und der absoluten Feuchte an der Innenwand nahe der Kanzeltür ableiten (siehe hierzu Bild 2, unten). Die absolute Feuchte im Bereich des Ölbergs lag nahezu über das gesamte Jahr über der Feuchte im Bereich der Kanzeltür, so dass mit einem kontinuierlichen Feuchtestrom und damit einer kontinuierlichen Verdunstung von Feuchtigkeit an der Ölberggruppe gerechnet werden musste. Folge einer derartig kontinuierlichen Verdunstung ist, dass sich Salze in der Porenlösung bis zur Übersättigung aufkonzentrieren und an den Steinoberflächen und im oberflä-

chennahen Bereich kristallisieren und eine Steinschädigung, wie sie ja auch vorliegt, langfristig unter bestimmten Bedingungen zu erwarten ist. Obwohl nur Messungen für das Jahr 2012 vorliegen, ist davon auszugehen, dass in den davorliegenden Jahren die klimatische Situation ähnlich war.

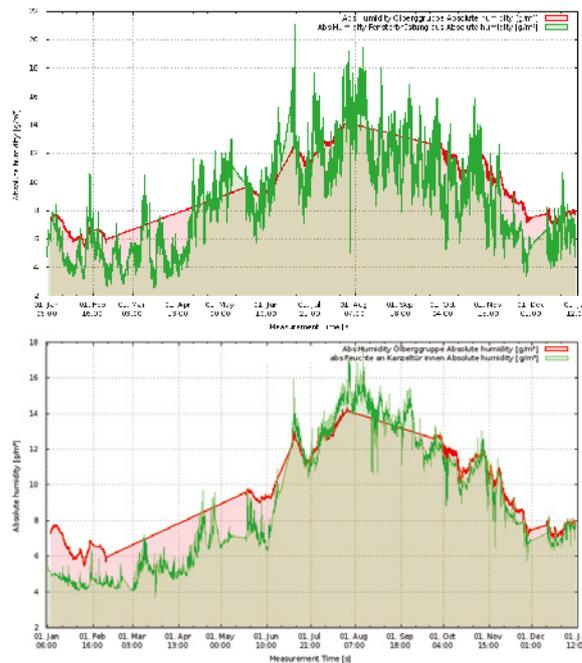


Bild 3 Absolute Feuchte an verschiedenen Messstellen 2013 (Außenklima sowie Nahfeldklima an Ölberggruppe und Kanzeltürwand)

Aufgrund des festgestellten hohen Schädigungsgrades der Ölberggruppe wurde in einer Sofortmaßnahme Mitte 2013 initiiert, die Eingangstür zur oberen Kapelle dauerhaft geschlossen zu halten. Diese Maßnahme diente primär dem Zweck, das Klima innerhalb der oberen Kapelle zu stabilisieren und damit das Risiko einer weiteren Schädigung zu minimieren. Im Hinblick auf die klimatische Situation im Nahfeld um die Ölberggruppe hat sich diese Maßnahme positiv ausgewirkt, wie dies aus Bild 3 (unten) und Bild 4 (unten) ersichtlich wird. So kann aus den Abbildungen entnommen werden, dass ab ca. Juli 2013 nicht nur die Differenz zwischen der Feuchte nahe der Kanzelwand und der Feuchte am Ölberg minimiert wurde, sondern auch insgesamt die Fluktuation bzw. Schwankungen der absoluten Feuchte im Bereich des Ölbergs gegenüber dem Vergleichsjahr 2012 abgenommen haben. Insgesamt wurde damit die Verdunstung von Feuchtigkeit an der Steinoberfläche minimiert und auch ein stabilerer Feuchtezustand erreicht. Es kann davon ausgegangen werden, dass damit auch mögliche

steinschädigende Kristallisationsvorgänge von Salzen minimiert wurden. Je höher die relative Luftfeuchte im Nahfeld um die Ölberggruppe und je geringer die Differenz der absoluten Feuchten innerhalb der Kapelle ist, desto geringer ist die Verdunstung von Wasser über die Steinoberflächen (und damit Transportvorgänge von gelösten Salzen an die Steinoberfläche).

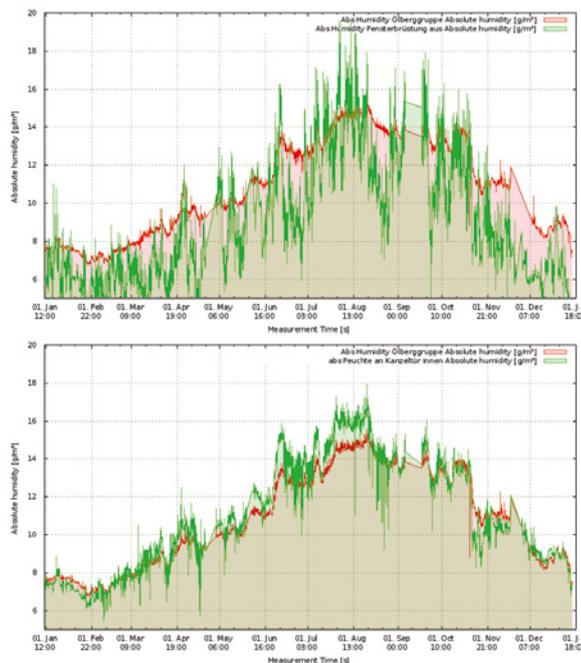


Bild 4 Absolute Feuchte an verschiedenen Messstellen 2014 (Außenklima sowie Nahfeldklima an Ölberggruppe und Kanzeltürwand)

Die Minimierung der Verdunstung durch Erhöhung der Nahfeldfeuchte führt dabei zu folgenden wesentlichen Effekten an der Ölberggruppe:

- Verdünnung der Porenlösung, d.h. Abnahme der Salzkonzentrationen im Bereich der Steinoberflächen bzw. oberflächennahen Steinbereichen. Dies ist vorwiegend der geringeren Verdunstung an der Steinoberfläche zuzuordnen. Dabei ist die Lösungsverdünnung Folge des Konzentrationsausgleichs durch Salzdifffusion in der Porenlösung zurück in die tieferen Steinschichten hinein.
- Bei Unterschreiten der für die Salze bzw. Salzkombinationen maßgeblichen Deliqueszenzfeuchten ist eine Auskristallisation von Salzen möglich. Ist die Nahfeldfeuchte kontinuierlich an den Steinoberflächen hinreichend hoch, so liegt die maßgebliche Verdunstungszone an der Oberfläche, weswegen Salze vorwiegend in Form von Effloreszenzen an den Steinoberflä-

chen auskristallisieren. Eine Bildung von besonders steinschädigenden Subfloreszenzen wird für die meisten der vorliegenden Salze bei hoher Nahfeldfeuchte vermieden. Eine Ausnahme bildet hier Gips, da dieser auch bei Feuchten über 99,9% RF auskristallisiert, wenn die Lösung allein durch Aufkonzentration übersättigt ist (hierzu der Hinweis, dass Gipskrustenbildung im Bereich der Ölberggruppe vorliegt; vgl. [DBU 2015]).

Eine mögliche Salzkristallisation findet bei hinreichend hoher Nahfeldfeuchte demnach vorwiegend nur in den oberflächennahen Bereichen statt. Dies auch nur zeitweise, wenn die Nahfeldfeuchte der Raumluft unter die Deliqueszenzfeuchte der vorhandenen Salze abfällt. Dieser Zustand liegt vorwiegend nur in den kälteren Jahreszeiten vor, wenn sowohl die Außentemperaturen sinken als auch gleichzeitig die relative Feuchte der Außenluft abnimmt. Die Wände im Bereich des anstehenden Felsens weisen insgesamt eine höhere Wärmespeicherefähigkeit als die Außenwände auf. Zudem ist eine kontinuierliche Feuchtezufuhr aus dem Fels gegeben. Von Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die jahreszeitbedingten Wechselwirkungen bezüglich der innenklimatischen Verhältnisse und des Feuchtehaushalts an den Steinoberflächen insbesondere der Ölberggruppe. Während der warmen Jahreszeit bedingen die niedrigen Oberflächentemperaturen an der Wandoberfläche der Ölberggruppe hohe relative Feuchten in Nahfeldbereich. Kondensation an den Wandoberflächen ist bei gewissen klimatischen Bedingungen ebenso möglich wie eine Verdunstung, wobei Zeiten der Verdunstung überwiegen. Eventuell vorhandene lösliche Salze könnten unter diesen Witterungsbedingungen komplett gelöst und eine Salzmigration in Richtung des anstehenden Felsens stattfinden. Eine Kristallisation aller vorhandenen und nachweisbaren Salzarten im Zeitraum der kurzen Verdunstungsperioden ist allerdings nicht zu erwarten, da die Deliqueszenzfeuchten mancher Salzarten (z.B. von Natriumchlorid) am Ölberg in der Regel nicht unterschritten wird.

Diese klimatischen Bedingungen verschlechtern sich jedoch häufig in den Wintermonaten. Die Temperaturen im Nahfeld um die Ölberggruppe sowie in der Wand selbst liegen in der kalten Jahreszeit teilweise über den Temperaturen der Außenwände und auch der Außenlufttemperaturen. Gleichzeitig nimmt im Allgemeinen die durchschnittliche absolute Luftfeuchte der Außenluft ab. Die Temperatur- und

Feuchtedifferenzen führen in der Folge zu einer erhöhten Verdunstung an den Steinoberflächen der Ölberggruppe wie insgesamt an allen dem massiven Fels zuzuordnenden Wandabschnitten. Die Messungen zeigen, dass im Nahfeldbereich relative Luftfeuchten bis herunter zu etwa 80 % rel. Feuchte wie auch in den Steintiefen von 2 cm bis herunter zu 95 % rel. Feuchte über längere Zeiträume messbar sind, wenngleich eine kontinuierliche Feuchtezufuhr aus dem Fels vorhanden sein dürfte. Während Natriumchlorid bei diesen relativ hohen relativen Luftfeuchten noch nicht kristallisiert, besteht ein gewisses Schädigungsrisiko, wenn z.B. Magnesiumsulfat oder Natriumsulfat vorliegt. Dabei zeigt sich ein besonders hohes Risiko insbesondere bei den exponierten Skulpturen und filigranen Steinelementen aufgrund der durch die größere Oberfläche bedingten erhöhten Verdunstungsrate und damit der höheren Salzkonzentrationen, was sich in den vorhandenen Schadensbildern widerspiegelt. Eine Salzzakkumulation im oberflächennahen Bereich des Steines ist daher dort besonders wahrscheinlich, wobei beachtet werden muss, dass eine unterschiedliche Fraktionierung der Salze innerhalb der verschiedenen Verdunstungszonen bzw. Expositionen konstatiert werden kann. Gerade die filigranen Elemente der Skulpturen, die einerseits eine große zum Innenraum gerichtete Oberfläche aufweisen und aufgrund ihrer geringen Masse auch eine geringere Wärmespeicherkapazität aufweisen, sind besonders bei kurzzeitigen Klimaschwankungen in der Kapelle gefährdet. Die Faktoren „*hohe dem Innenraum zugewandte Steinoberfläche*“, „*geringe Wärmespeicherkapazität*“ wie auch der Umstand der „*geringeren Feuchtezufuhr aus dem massiven Fels*“ können dazu führen, dass im oberflächennahen Bereich des Steins die Deliqueszenzfeuchte der Salze bzw. der Salzgemische wiederholt überschritten werden könnten und eine weitere Steinschädigung durch Bildung von Subfloreszenzen auch bei kurzzeitigen Klimaschwankungen im Innenraum wahrscheinlich ist.

2.2 Risiko der Schimmelbildung

Als Grundlage für die Bewertung des Schimmelrisikos kann für den vorliegenden Fall das WTA Merkblatt 6-3-08/D herangezogen werden, auch wenn die im Merkblatt angegebenen Konzepte eher für beheizte Räume entwickelt wurden und die Besonderheiten des St. Salvators nicht vollumfänglich berücksichtigt werden [WTA 2007]. Im Merkblatt

werden für übliche am Bau auftretende Schimmelpilze Isoplethensysteme für die Risikoeinschätzung bezüglich der Schimmelpilzbildung zugrunde gelegt (siehe Bild 5). Unter Verwendung dieser Isoplethensysteme kann für die Risikobewertung für den St. Salvator ungeachtet der Kontamination durch Staubablagerungen die Substratgruppe I für alle organischen Materialien (z.B. Holzskulpturen, Bänke) und Substratgruppe II für die Skulpturen und die Konstruktionselemente aus mineralisch gebundenen Material zugrunde gelegt werden. Aus Bild 5 wird ersichtlich, dass in Abhängigkeit von der Temperatur bei Feuchten ab ca. 75 bis 80% RF mit einer Sporenauskeimung bzw. einem Schimmelpilzwachstum zu rechnen ist.

Betrachtet man die Messdaten zum Nahfeldklima im Bereich der Ölberggruppe für die Jahre 2012 bis 2014 (vgl. Bild 6, Bild 7 und Bild 8 jeweils untere Abbildung), so ist festzustellen, dass mit einem erhöhten Schimmelpilzwachstum im Bereich der Ölberggruppe in allen Jahren zu rechnen wäre, da in der Regel Nahfeldfeuchten von über 80% RF vorliegen. Tatsächlich wurde aber keine erhöhte Schimmelpilzbildung im Bereich des Ölbergs beobachtet. Eine mögliche Erklärung für diesen Umstand könnte der für das Schimmelpilzwachstum fehlende Nährboden in Verbindung mit den vorhandenen Salzen sein, die sich eventuell hemmend auf Sporenauskeimung bzw. Schimmelpilzwachstum auswirken.

Schimmelpilzbildung in der oberen Kapelle des St. Salvators ist aber kein grundsätzlich neues, sondern vielmehr ein lokal differenziert zu betrachtendes Problem. Schimmelpilzbildung lag und liegt in mehreren Bereichen der Kapelle sowohl auf den Steinoberflächen als auch auf den Holzoberflächen (Bänke, Skulpturen) vor. Es sind allerdings in den vergangenen drei Jahren Verschiebungen des Schimmelpilzrisikos zu verzeichnen. Dies wird beispielsweise aus den jeweils linken Abbildungen in Bild 6, Bild 7 und Bild 8 ersichtlich. Dargestellt ist hier das Nahfeldklima gemessen an der Innenwand hinter der Kanzeltür. Im Jahr 2012 deuten die gemessenen Innenklimata nur auf ein geringes Schimmelpilzwachstum hin, wobei leichte klimatische Unterschiede je nach vorliegender Jahreszeit vorhanden sind. So sind z.B. in der ersten Jahreshälfte die gemessenen Feuchtwerte um etwa 10% geringer als in der zweiten Jahreshälfte (vgl. Bild 9). Demnach ist auch das Risiko der Schimmelpilzbildung in der zweiten Jahreshälfte im Bereich der Außenwand höher.

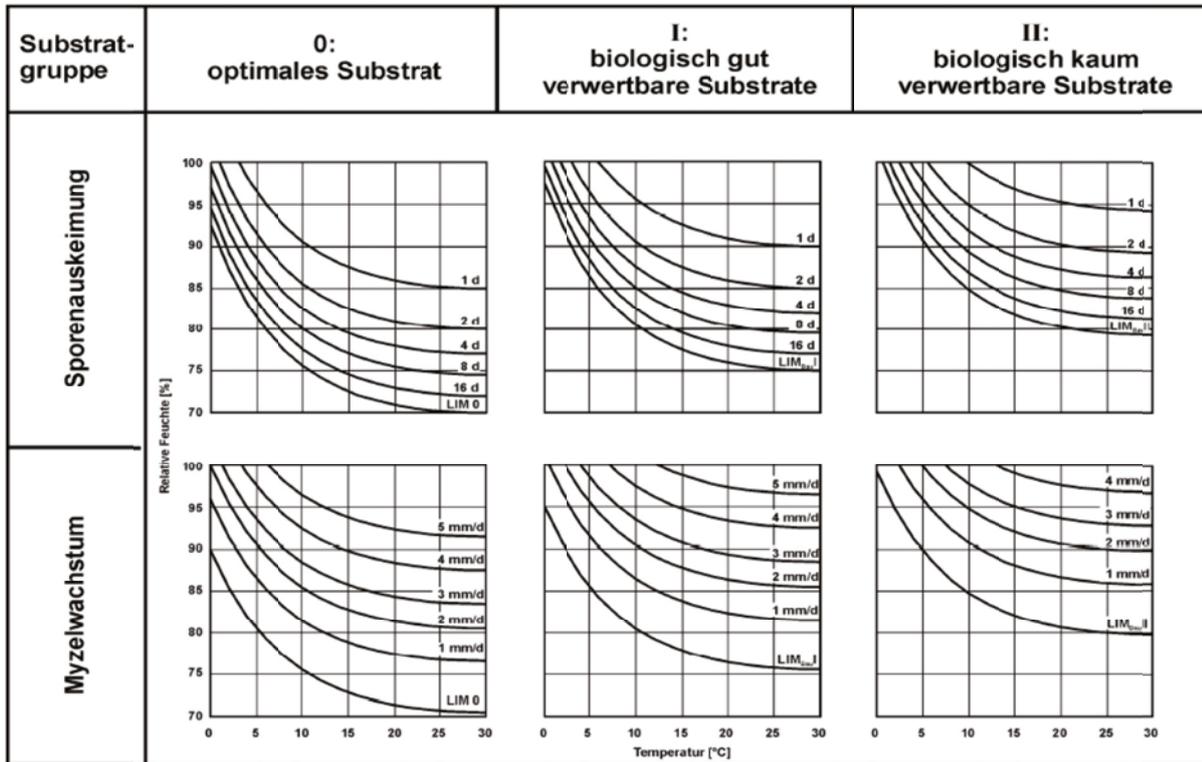


Bild 5 Verallgemeinertes Isolethensystem für Sporenauskeimung bzw. Myzelwachstum für übliche am Bau auftretende Pilze (aus: WTA Merkblatt 6-3-08/D: Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos).

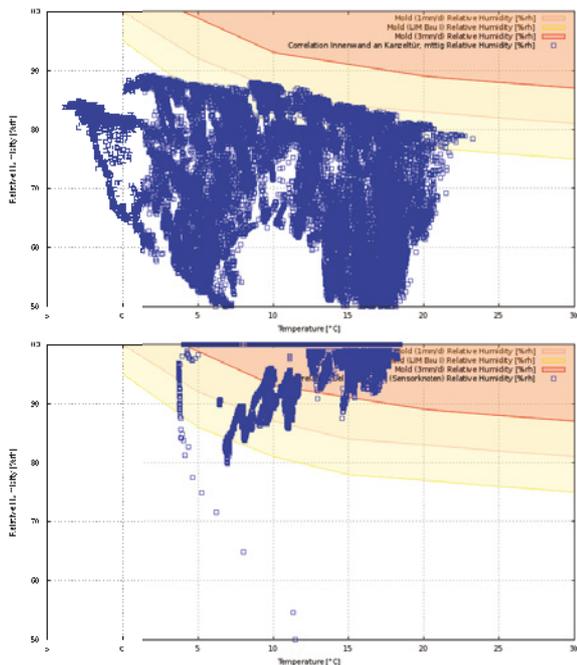


Bild 6 RF/T-Diagramm Nahfeldklima für den Bereich Kanzeltürwand innen (oben) und Ölberggruppe (unten) im Jahr 2012

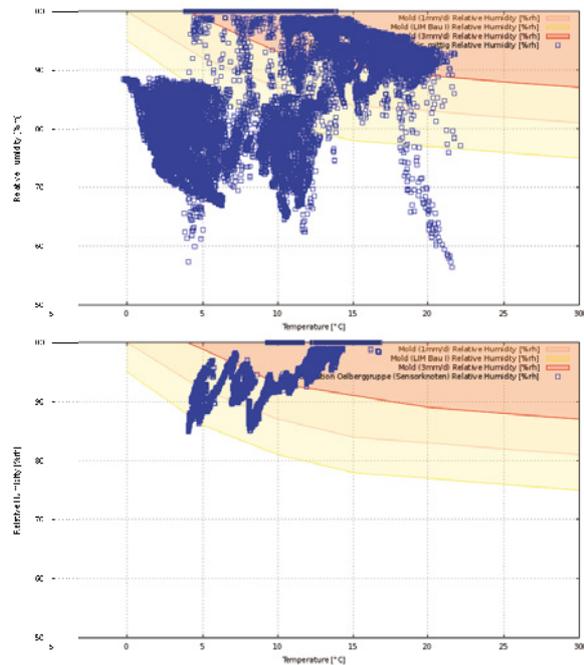


Bild 7 RF/T-Diagramm Nahfeldklima für den Bereich Kanzeltürwand innen (oben) und Ölberggruppe (unten) im Jahr 2013

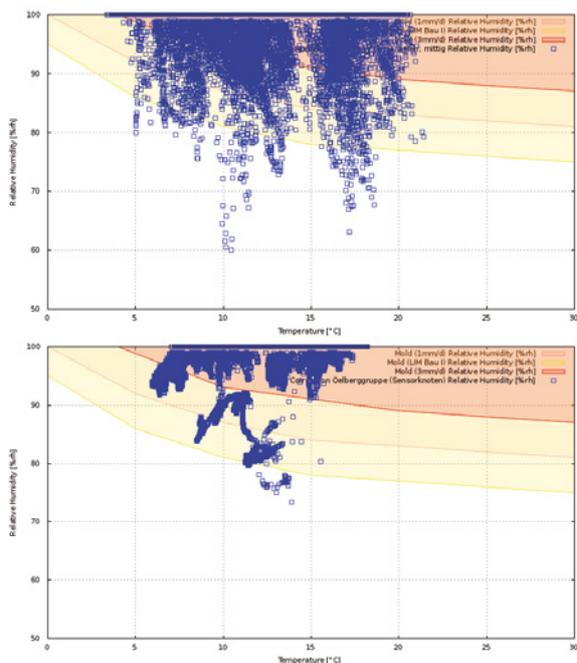


Bild 8 RF/T-Diagramm Nahfeldklima für den Bereich Kanzeltürwand innen (oben) und Ölberggruppe (unten) im Jahr 2014

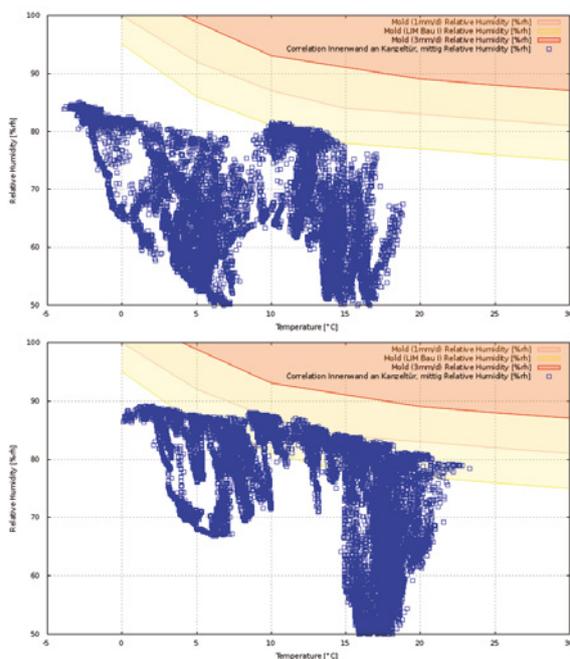


Bild 9 RF/T-Diagramm Nahfeldklima für den Bereich Kanzeltürwand innen (oben 1. Jahreshälfte 2012, unten 2. Jahreshälfte 2012)

Aus Bild 6 und Bild 7 wird ersichtlich, dass die Maßnahme der im Laufe des Jahres 2013 initiierten automatischen Türschließung signifikanten Einfluss auf das Innenraumklima im Bereich der Außenwand hat, mit der Folge, dass sehr hohe Luftfeuchten

vorhanden sind und mit Schimmelpilzwachstum innen an der Außenwand zu rechnen ist. Tatsächlich wurde auch eine vermehrte Schimmelpilzbildung in der oberen Kapelle beobachtet. Das Jahr 2014 zeichnete sich darüber hinaus durch ungewöhnlich hohe relative Luftfeuchten aus, so dass allgemein durch das vorherrschende Außenklima die Schimmelpilzgefährdung vieler Objekte erhöht war.

3 Innenraumklimabeeinflussende Faktoren

3.1 Außenklimatische Einflüsse

Aus den durchgeführten Klimamessungen am St. Salvator ist ersichtlich, dass sich die Innenraumtemperaturen in der oberen Kapelle stark nach der durchschnittlichen 30-Tage-Außentemperatur richten. Dies gilt im Übrigen auch für die Steintemperaturen im Bereich des Ölbergs, welche auf kurzfristige Veränderungen des Außenklimas nicht wesentlich reagieren. Die Luftfeuchte innerhalb der oberen Kapelle reagiert gegenüber Veränderungen im Außenklima hingegen sensibler. Auch bei geschlossener Tür bewirken starke Feuchteänderungen im Außenklima Veränderungen der Raumfeuchte (siehe hierzu auch Bild 10), wobei die Feuchteschwankungen im Nahfeld der Ölberggruppe deutlich geringer ausfallen als in den übrigen Bereichen der oberen Kapelle.

Eine Besonderheit gilt es bei direkter Sonneneinstrahlung zu berücksichtigen. Insbesondere in den Wintermonaten bzw. generell bei tiefstehender Sonne ist eine Erwärmung der durch die Fenster beschienenen Bereiche zu verzeichnen. Mit der Erwärmung geht, unabhängig von der jeweilig vorliegenden Lüftungssituation, eine Abminderung der relativen Feuchte einher. Ist die Sonneneinstrahlung so stark, dass nicht nur direkt beschienene Raumbereiche erwärmt werden, sondern auch die übrigen Raumbereiche indirekt, so können kurzzeitig hohe Klimaschwankungen im Innenraum und damit im Nahfeld der schützenswerten Kulturgüter auftreten.

3.2 Einfluss des Besuchereintritts/-austritts auf das Innenraumklima

Bild 10 zeigt absolute Luftfeuchtegehalte verschiedener Sensoren und Zeiten der Türöffnung. Zu erkennen ist, dass die Luftfeuchtegehalte durch Zeiten

der Türöffnung dann beeinflusst werden, wenn insbesondere außen gegenüber innen unterschiedliche Feuchtegehalte vorhanden sind (siehe diesbezüglich abs. Feuchte an Kanzeltürwand innen in Bild 10). Dabei wirkt sich die türöffnungsbedingte Feuchteveränderung allerdings nur geringfügig auf das Nahfeldklima im Bereich der Ölberggruppe aus.

Zudem ist eine Veränderung der Innenraumfeuchte nur signifikant bei längerer Türöffnung. Sind die absoluten Feuchtegehalte innen wie außen hingegen ungefähr gleich, so ist eine Beeinflussung der Innenraumfeuchte durch die Türöffnung in der Regel vernachlässigbar (vgl. hierzu exemplarisch Bild 11).

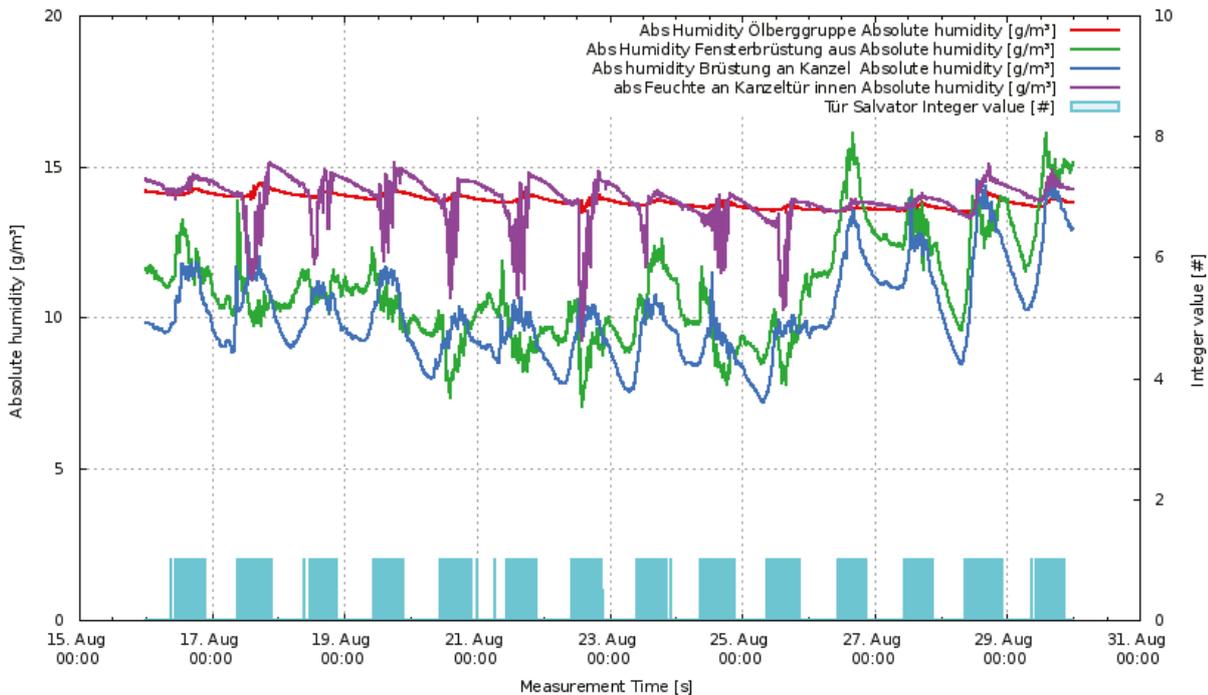


Bild 10 Absolute Luftfeuchtegehalte verschiedener Sensoren und Zeiten der Türöffnung (16.08.2014 bis 30.08.2014)

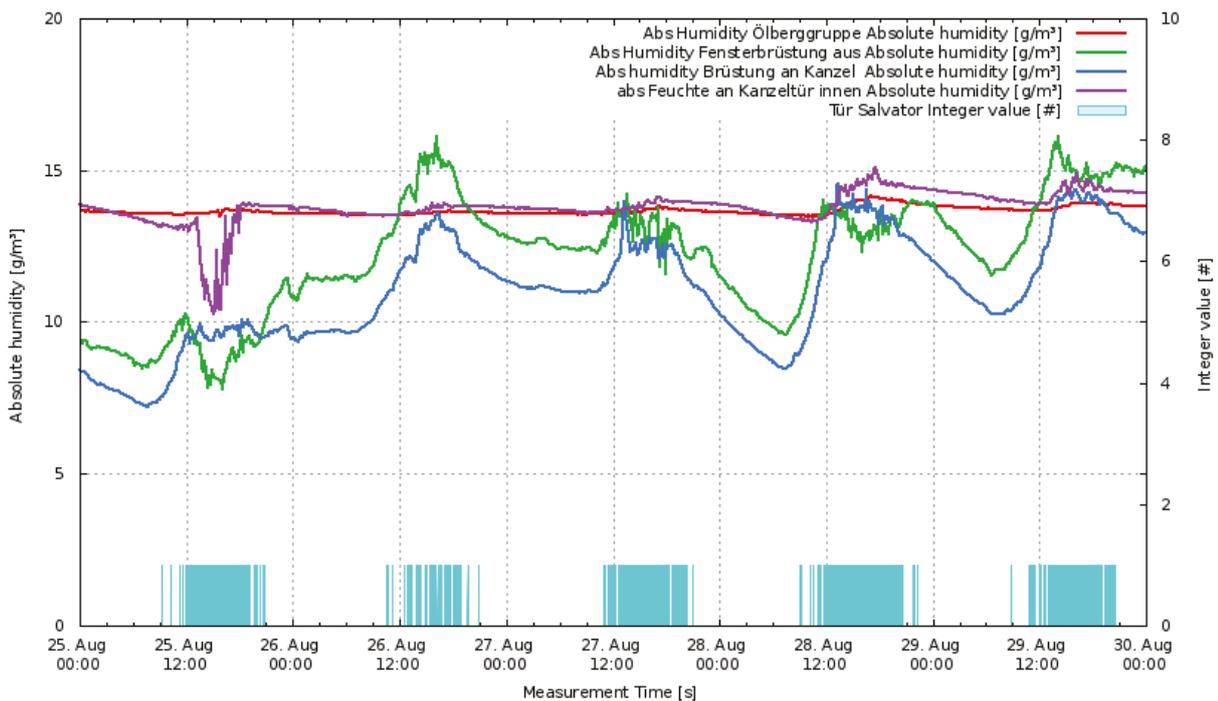


Bild 11 Absolute Luftfeuchtegehalte verschiedener Sensoren und Zeiten der Türöffnung (25.08.2014 bis 30.08.2014)

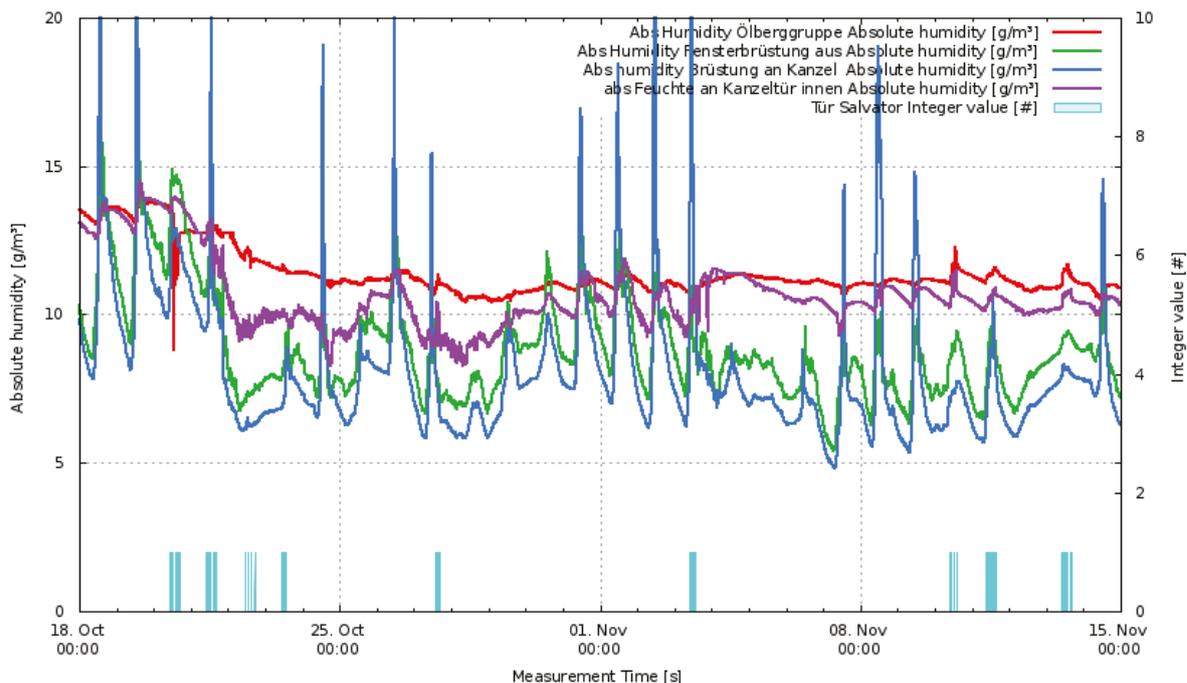


Bild 12 Absolute Luftfeuchtegehalte verschiedener Sensoren und Zeiten der Türöffnung (18.10.2014 bis 15.11.2014)

Aber auch wenn die Tür zur oberen Kapelle des St. Salvators durchgehend geschlossen ist, verändert sich die Innenraumfeuchte geringfügig in Abhängigkeit von der Außenfeuchte (siehe diesbezüglich z.B. Feuchtegehalte bei vorwiegendem Regenwetter in Bild 12).

4 Schlussfolgerungen und Innenraumklimakonzept

Aus den vorangegangenen Erläuterungen wie auch den weiteren Untersuchungen der mit der Konservierung des St. Salvators betrauten Experten ist ersichtlich, dass die Klimasituation in der Oberen Kapelle des St. Salvators vor dem Hintergrund der präventiven Konservierung und der Schadensminimierung von komplexer Natur ist. Einerseits gilt es die weitere Schädigung insbesondere der Ölberggruppe durch Salzkristallisation zu verhindern, andererseits ist eine kontinuierliche Schimmelpilzbildung nicht akzeptabel. Das Hauptproblem hierbei ist, dass mittels eines vorzugsweise einzustellenden Innenraumklimas entweder die Schädigung durch Salzkristallisation minimiert wird oder aber die Schimmelpilzbildung. Eine einvernehmliche Lösung zur Minimierung beider Probleme bzw. Risiken gibt es vor diesem Hintergrund nicht.

In Anbetracht der Schimmelpilzbildung ist es zukünftig empfehlenswert, die Innenraumfeuchte zu reduzieren. Gleichzeitig ist diese Feuchtereduktion auf ein Mindestmaß zu beschränken, um so das Schädigungsrisiko durch Salze im Bereich des Ölbergs gering zu halten. Zukünftig wird man vor diesem Hintergrund damit rechnen müssen, dass es trotz entsprechender Absenkung der Luftfeuchte im Raum zur Schimmelpilzbildung im Bereich des Ölbergs bzw. im näheren Umfeld zum Ölberg wie auch im Bereich der Beichtstuhlnische kommen kann.

In den letzten drei Jahren lag die Temperatur in der oberen Kapelle im Bereich zwischen etwa 0°C und 20°C. Wird von einer aktiven Beheizung bei Innenraumtemperaturen oberhalb von +5°C abgesehen, was empfehlenswert ist, wird sich zukünftig das Innenraumklima in einem vergleichbaren Temperaturbereich bewegen. Als zentraler Steuerparameter bleibt damit die Kontrolle der Luftfeuchte übrig. Wie die Ergebnisse aus dem Klimamonitoring als auch die vorhandenen Schäden durch Salzkristallisation zeigen, konnte mittels passiver Maßnahmen (z.B. die manuelle Belüftung durch Öffnung der Eingangstür oder aber die permanente Schließung), das Innenraumklima beeinflusst, nicht aber für alle Schadensrisiken zufriedenstellend kontrolliert bzw. stabilisiert werden. Ziel muss daher sein, neben dem Erreichen eines Zielfeuchteniveaus kurzzeitige Schwankungen sowohl der Temperatur als auch der

relativen Feuchte zu minimieren und für eine entsprechende Klimastabilität zu sorgen. Vor diesem Hintergrund erscheint der permanente Einsatz eines geregelten Luftentfeuchters unabdingbar. Als Zielgröße für die Obergrenze der Feuchte können die weiter oben genannten Empfehlungen gemäß WTA Merkblatt 6-3-08/D angesehen werden (siehe auch Bild 13). Danach liegen die Grenzwerte für die Substratgruppe II je nach aktueller Temperatur bei etwa 77% bis 85% RF. Werden diese Grenzwerte im Nahfeld um die betroffenen Bereiche eingehalten, ist mit keiner weiteren wesentlichen Schimmelbildung mehr zu rechnen. Um jedoch auch das Risiko der weiteren Salzverwitterung zu minimieren, sollten die angesprochenen Obergrenzen auch nicht zu weit unterschritten werden, denn jegliche weitere Feuchteabsenkung führt zu einer erhöhten Verdunstung über die Steinoberflächen. In Anbetracht der vorliegenden Salzbelastung sind im Nahfeld um die Ölberggruppe möglichst Luftfeuchten von 80% langfristig und weiterhin auch Werte unterhalb von 75% RF kurzfristig nicht zu unterschreiten (siehe auch Bild 13). In der Folge ergibt sich hieraus ein sehr eng begrenzter anzustrebender Feuchtekorridor, der mittels eines geeigneten Luftentfeuchters eingeregelt werden sollte. Die Regelung sollte dabei über eine Kombination von mehreren, an verschiedenen Stellen innerhalb der Kapelle angebrachten Sensoren geschehen und nicht nur einen Messwert als Referenz verwenden. Die ordnungsgemäße Funktion und Wirksamkeit der Luftentfeuchtung sollte zudem permanent überwacht werden, was den Weiterbetrieb des Monitoringsystems und die zusätzliche Installation von Sensoren unabdingbar macht.

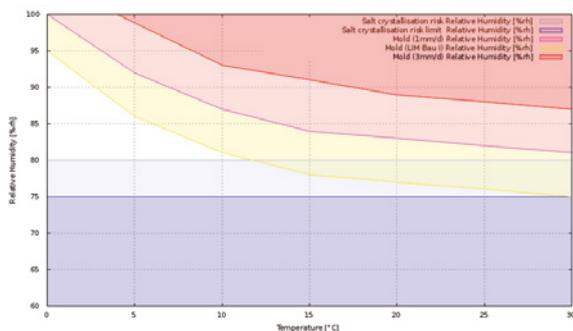


Bild 13 Risikozonen und präferierter Zielbereiche für das Innenraumklima.

4.1 Weitere Maßnahmen

Das vorgeschlagene Klimakonzept ist ein Kompromiss, d.h. es kann zukünftig weder eine weitere

Schimmelbildung noch eine Schädigung durch Salzkristallisation gleichermaßen ausgeschlossen werden. Da der oben genannte Vorschlag eine Verminderung der relativen Luftfeuchte beinhaltet, ist zukünftig mit einer kontinuierlichen Verdunstung von Feuchtigkeit aus dem anstehenden Fels zu rechnen. Dies führt zwangsläufig zu einer weiteren Salzakkumulation in den oberflächennahen Steinbereichen. Daher ist mit weiterem Materialverlust zu rechnen, wenn nicht der Salzakkumulation mittels einer geeigneten Entsalzung entgegen gewirkt wird.

In vorangegangenen Überlegungen wurde die Abtrennung des Vorraums durch eine Schleuse diskutiert und auch getestet. Grundsätzlich dürfte sich die Schaffung einer Schleusenlösung positiv auf die Klimasituation in der oberen Kapelle auswirken, da kurzfristige Klimaschwankungen, wie sie durch das Öffnen der Eingangstür entstehen, minimiert werden. In Anbetracht der angedachten Inbetriebnahme einer einzigen Luftentfeuchtungsanlage, die auch den Vorraum mit berücksichtigt, erscheint die Notwendigkeit zur Installation einer Schleuse momentan aber nicht gegeben. Nach bisherigen Erkenntnissen ist auch ohne eine gesonderte Abtrennung des Vorraums bereits eine ausreichende Pufferzone durch den Vorraum für den Fall der Türöffnung gegeben. Allerdings muss zunächst die Klimasituation nach Inbetriebnahme und Einregelung der Luftentfeuchtungsanlage im Detail noch einmal analysiert werden. Es ist aber wahrscheinlich, dass durch die Gesamtbetrachtung bereits für Vorraum und Altarraum akzeptable Raumluftfeuchten erreicht werden können, wobei prinzipiell mit etwas höheren Klimaschwankungen im Vorraum gegenüber dem Altarraum zu rechnen ist.

Neben der Installation und der Inbetriebnahme eines permanent tätigen Luftentfeuchters wurden zusammenfassend folgende weitere Maßnahmen diskutiert bzw. empfohlen:

- Evaluation einer Entsalzung der gefestigten Bereiche des Ölbergs; da insbesondere ein hohes Schädigungspotenzial und auch eine Salzakkumulation bei den filigranen Elementen vorliegen dürften, sind diesen Bereichen besondere Aufmerksamkeit zu schenken.
- Es sind Maßnahmen zu ergreifen, die für eine Klimastabilisierung innerhalb der oberen Kapelle sorgen. Kurzfristige Klimaschwankungen sind möglichst zu vermeiden. D.h. eine unkontrollierte Be- und Entlüftung der oberen Kapelle ist zu vermeiden (möglichst Geschlossenhalten von Türen und Fenstern); gegebenenfalls kann eine

Schleuse zwischen Altarraum und Vorraum sinnvoll sein, falls die maschinelle Klimatisierung allein nicht den gewünschten Erfolg bringt (Klärung erst nach Einregelung der Luftentfeuchtungsanlage).

- Jegliche Form der Beheizung sollte auf ein Minimum reduziert bzw. ausgeschlossen werden, da eine zusätzliche Beheizung die Verdunstungsrate am Ölberg erhöht. Die Installationen eines Frostwächters zur Vermeidung von Innenraumtemperaturen von unter +5°C kann vor dem Hintergrund der Frostgefahr als eine sinnvolle Maßnahme angedacht werden.
- Fortlaufende Beobachtung von Veränderungen durch die zuständigen Restauratoren insbesondere der folgenden Punkte:
 - Visuelles Monitoring der Steinoberflächen im Hinblick auf Effloreszenzen
 - Visuelles Monitoring der Steinoberflächen auf Absandungen/Subfloreszenzen
 - Gegebenenfalls Probenahme bei der Feststellung von Auffälligkeiten und Salzanalyse
 - Visuelles Monitoring im Hinblick auf Schimmelbildung
 - Entfernung des Schimmelbefalls bei Entdeckung
 - Fortlaufendes instrumentiertes Monitoring und Archivierung der Messdaten

Fazit: eine weitere Schädigung ist nicht auszuschließen, lediglich eine Minimierung der Schädigungsrate ist möglich.

5 Literaturreferenzen

- [DBU 2015] Frick, J et al: Abschlussbericht zum DBU-Projekt "Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator (Schwäbisch Gmünd)", unpubl. 2015.
- [Krüger 2015] Krüger, M, Price, E.: Monitoring des St. Salvators mit drahtlosen Sensornetzen. In: J. Frick, J. Zöldföldi (Hrsg.) DBU-Projekt: „Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd. Fraunhofer IRB Verlag, 2015, S. 83-92
- [Martin-Sanchez 2014] Martin-Sanchez P.M., Jurado V., Porca E., Bastian F., Lacanette D., Alabouvette C. and Saiz-Jimenez C., 2014. Airborne microorganisms in Lascaux Cave (France). *International Journal of Speleology*,

43 (3), 295-303. Tampa, FL (USA), ISSN 0392-6672 <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.43.3.6>

- [WTA 2007] Krus, M. et al: WTA Merkblatt 6-3-05/D: Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos. Fraunhofer IRB Verlag, 2007, 28 S.
- [Zöldföldi, 2015] Zöldföldi, J. et al.: St. Salvator - Materialtechnische Analysen am Stubensandstein der Ölberggruppe. In: J. Frick, J. Zöldföldi, J. (Hrsg.) DBU-Projekt: „Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd. Fraunhofer IRB Verlag, 2015, S. 93-103

Autor

Krüger, Markus
 TTI GmbH - TGU Smartmote
 Pfaffenwaldring 2b
 70569 Stuttgart
krueger@smartmote.de

Detektion von klimabedingten Schädigungspotentialen mittels Glassensoren im Rahmen des EU Projekts "Climate for Culture"

Vergleich der Exposition in St. Salvator mit anderen Standorten

Johanna Leissner, Gabriele Maas-Diegeler

Abstract: Im europäischen Forschungsprojekt »Climate for Culture« (2009-2014), sind erstmals Simulationsmodelle entwickelt und eingesetzt worden, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Innenräume historischer Gebäude und ihre Sammlungen abschätzen zu können. Hier ist es erstmals gelungen, ein hochauflösendes regionales Klimamodell (REMO) basierend auf zwei Emissionszenarien (A1B, RCP4.5) mit thermohygrischen Gebäudesimulationsmodellen (WUFI Plus, Hambase) zu koppeln. Diese neuartige Methode ermöglicht Aussagen, wie sich bis zum Jahre 2100 die klimatischen Innenraumbedingungen in Gebäuden verändern werden und welche Schädigungsrisiken dadurch entstehen. Detaillierte Untersuchungen der klimatischen Bedingungen und ihres Schädigungspotentials wurden an ausgewählten Fallbeispielen mit Hilfe von Glassensoren durchgeführt. Diese Methode wurde im EU Projekt AMECP (1993-1996) im Fraunhofer Institut für Silicatforschung in Würzburg entwickelt: Hochsensitive Gläser reagieren auf Temperatur und Feuchtigkeit und deren Fluktuationen, aber auch Schadgase und Befall durch Mikroorganismen werden synergistisch registriert. Damit kann innerhalb weniger Wochen festgestellt werden, ob sich die klimatischen Innenraumbedingungen gut oder schlecht auf den Erhaltungszustand der Kunstobjekte auswirken. Im Folgenden werden die Messergebnisse von Glassensorstudien in Würzburg, London und Batalha im Vergleich zu St. Salvator in Schwäbisch Gmünd diskutiert.

Keywords: Klimawandel, Modellierung, Schädigungspotential, Korrosivität, Umweltwirkungen, Glassensoren

1 Das Messprinzip der Glassensoren

Das Prinzip der Glassensoren beruht auf der Erkenntnis, dass spezielle Glaszusammensetzungen auf kombinierte korrosive Einflüsse sehr empfindlich reagieren und damit können sie Auskunft geben über das kumulative Schadenspotential einer Aufstellungssituation [1, 2]. Wie der Name bereits impliziert bestehen die Glassensoren aus Glas, und zwar aus einem Kali-Kalkglas, welches aufgrund seiner bewusst gewählten Zusammensetzung chemisch instabil ist und daher sehr sensibel auf Umgebungsparameter reagiert. Dazu gehören vor al

lem die Temperatur und Luftfeuchtigkeit, aber auch Schadgase wie Essigsäure- und Formaldehyd oder SO_2 Belastungen. Bei der Exposition der Glassensoren adsorbieren sich zunächst Wassermoleküle auf der Glasoberfläche und es kommt zu einer Ionenaustauschreaktion mit dem Glas. Die im Glaskörper befindlichen Calcium- und Kaliumatome wandern aus dem Glasnetzwerk an die Oberfläche, Wasser und insbesondere protoniertes Wasser (H_3O^+ -Ionen) diffundieren hingegen ein; es bildet sich eine so genannte Gelschicht. Diese Effekte summieren sich über den Messzeitraum auf. Im Sinne eines Dosimeters kann ort- und zeitbezogen anhand solcher Standardmaterialien das korrosive Schädigungspo-

tential ermittelt werden. Die strukturellen Veränderungen lassen sich exakt im IR Spektrum quantifizieren. Sowohl vor als auch nach der Exposition – die, je nach Anwendungsfall zwischen drei und zwölf Monate beträgt – werden die Glassensoren mittels Fouriertransform-Infrarotspektrometrie (FT-IR) auf ihren Wasseranteil gemessen. Aus der Differenz der OH-Absorptionsbande vor und nach der Exposition wird der sog. Delta-E Wert ermittelt. Je größer der Delta-E Wert, desto korrosiver ist Umgebungsbedingung. Die Parameter Temperatur, relative Luftfeuchte und die vorhandenen Schadgase und Schadstoffe führen im Expositionszeitraum auf der Oberfläche der Glassensoren zu einer quantitativ erfassbaren Reaktion, die direkt mit der Korrosivität der Umgebungsbedingung korreliert.

Nachgewiesen werden können:

- Luftfeuchte (auch bereits ab niedrigen Konzentrationen)
- Direkte Feuchte (z.B. durch Kondensationseffekte)
- Feuchteschwankungen (mit resultierenden Folgeschäden durch Austrocknungsvorgänge)
- Temperaturwechseleffekte (die zu mechanischen Belastungen führen können)
- Saure Schadgase, anorganisch oder organisch (z. B. SO₂, NO₂, Essigsäure)
- Oxidierende Luftbestandteile (z.B. NO_x, Ozon)
- Sekundäreffekte bei erhöhter Wärmeeinstrahlung (Beleuchtungsproblematik)
- Zusammenwirken der genannten Einzelparameter

Die Einflussgrößen am Glassensormaterial und die modellhaft daraus resultierenden Schadensmechanismen sind werkstoffwissenschaftlich über viele Jahre untersucht worden. Die Einsatzmöglichkeiten als Risikodosimeter überprüften Fachgremien, die das Verfahren als VDI Richtlinie standardisierten und auch für Problemstellungen des Innenraum-Monitorings empfahlen [1].

Ein wesentlicher Aspekt der Glassensor-Idee ist die Übertragbarkeit der erfassten Risikopotentiale (also mittels IR Spektroskopie nachgewiesener Korrosionseffekte) auf ein breites Spektrum an Materialien und an Objekten. Die Methode benutzt zwar ein spezielles, empfindliches Glas als Dosimeter, die Messergebnisse jedoch treffen auch beispielsweise auf Metall, Keramik, oder organisches Material zu.

Es werden keine absoluten Werte, sondern Vergleichswerte festgelegt.

2 Einsatzgebiete

Die Glassensoren haben geringe Abmessungen (Briefmarken bis Diarahmengröße), sind ortsunabhängig (keine Kabel, keine Stromversorgung erforderlich) und wartungsfrei. Sie eignen sich daher für zur Erfassung der korrosiven Umgebungsbedingungen sowohl für Außenanwendungen an Gebäuden/Denkmalen als auch für historische Innenräume und Wanddekorationen, für Depotschränke, Vitrinen, Transport- und Lagerbehältnisse [3]. Bei durchschnittlichen Umgebungsbedingungen und bei einer Expositionsdauer zwischen einem Monat und einem Jahr, ist eine kontinuierliche Überwachung ohne zu häufigen Probenwechsel möglich.

Somit ergibt sich eine:

- Periodische Überwachung des Mikroklimas und der Schadstoffbelastung
- Ein Vergleich bezüglich der konservierenden Funktion von Vitrinen unterschiedlicher Bauart
- Eine Effizienzkontrolle von Filtersystemen z.B. von Klimaanlage
- Eine Erfassung möglicher negativer Einflüsse bei unterschiedlicher Raumnutzung (Freigabe historischer Räume für Veranstaltungen, stark variierende Besucherzahlen)
- Eine Lokalisierung von Bereichen mit erhöhten Belastungswerten
- Eine Langzeit-Belastungsdokumentation bei Einlagerung z.B. in Depots und Archiven
- Eine Qualitätssicherung der Transport-, lager- und Expositionsbedingungen bei Leihgaben oder Wanderausstellungen
- Ein Qualitätsnachweis (als Annahmekriterium) bei Neuinstallation oder Lieferung von Spezialvitrinen und Hochleistungsbehältnissen z.B. bei Panzerschränken mit Klimaregelung.

3 Anwendungsbeispiele der Glassensoren

Aufgrund seiner chemischen Instabilität dienen die Glassensoren als zeitbeschleunigtes Frühwarnsystem und eignen sich daher besonders gut zur Evaluierung der Innen- und/oder Außenbedingungen von

denkmalgeschützter Architektur sowie zur Überwachung der Aufstellungssituation von Kunst- und Kulturgütern, sei es im Depot oder in einer Schauvitrine im Museum.

Temperatur- und Luftfeuchtezyklen, im Zusammenspiel mit Schadgasen (SO₂, NO_xe, Ozon usw.) schädigen die Außenhülle von Denkmalen nachhaltig. Dies trifft vor allem auf eine

schadstoffreiche Umgebung zu, wie beispielsweise in der Nähe von Industrieanlagen oder in Gegenden in denen heute noch schwefelreiche Braunkohle z.B. im Hausbrand verfeuert wird. Glassensoren sind auch geeignet um die Wirkungsweise von architektonischen Maßnahmen zu überprüfen. So werden neu installierte oder baulich veränderte Außenschutzverglasungen zur Sicherung (bedeutender) Glasmalerei häufig mittels Glassensoren verifiziert. Hierzu werden außen, im Spalt zwischen Außenschutz- und historischer Verglasung sowie im Gebäudeinneren jeweils Glassensoren zur Überwachung exponiert. Anhand des Vergleichs der Ergebnisse kann auf die Wirkungsweise der Außenschutzverglasung, insbesondere auf die einwandfreie Funktion der Be- und Entlüftungsklappen, geschlossen werden [4].

Glassensoren reagieren auf die Anwesenheit von organischen Säuren. Daher ist diese Methode auch zur Überwachung von (historischen) Innenräumen geeignet. Essigsäure, Ameisensäure, Formaldehyd und TVOCs (total volatile organic compounds), die häufig aus verwendeten Baumaterialien oder aus Möbeln stammen, akkumulieren in Innenräumen und können dort zur Schädigung der Bausubstanz und der Ausstattung führen. Die Glassensoren geben als Frühwarnsystem Aussagen darüber, ob ein mögliches Gefährdungspotential für die im Raum ausgestellten oder gelagerten Objekte oder für die Raumhülle besteht.

4 Ergebnisse aus dem Monitoring Programm in Würzburg (Residenz), London (Victoria & Albert Museum) und Batalha (Kloster Mosteiro de Santa Maria da Vitória)

Innerhalb des EU Projekts "Assessment and Monitoring the Environment of Cultural Property" (EV5V-CT92-0144 AMECP) wurde die Glassensormethode für Außen- und Innenräume weiterentwickelt [3]. An drei Standorten Würzburg, London und Batalha (Portugal) wurde ein kontinuierlichen Messprogramm für SO₂, NO₂ und VOCs (volatile organic compounds = flüchtige organische Verbindungen mittels aktiver und passiver Sammlung), Formaldehyd und Essigsäure, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit an jeweils fünf Stellen zusammen mit Glassensorexpositionen durchgeführt.

Tabelle 1: Messorte in Portugal, Deutschland und England

Kloster Batalha	Würzburg Residenz	Victoria & Albert Museum London
Site II, Außen	Balkon, Außen	Dach, Außen
Site III, Sakristei	Blaues Vorzimmer	Tsui Galerie
Site V, Raum	Kaisersaal	Glasgalerie
Site VI, Büro	Spiegelkabinett	Vitrine 7
Site VII, Studio	Weißer Saal	Vitrine 24

4.1 Außenklimaergebnisse

Die Überwachung der Außenraumbedingungen wurde durchgeführt, um den Einfluss des Außenklimas auf die Binnenklimata zu erfassen.

Die niedrigsten Werte für Schwefeldioxid und Stickoxid finden sich in Batalha in Portugal, während das Victoria & Albert Museum in London die höchsten Werte aufweist, und Würzburg sich dazwischen befindet. Die Glassensorenwerte folgen im Großen und Ganzen diesem Trend. Das Außenklima in London ist wesentlich korrosiver als das in Würzburg

und Batalha. Der Unterschied der Glassensorwerte zwischen Würzburg und Batalha ist aber sehr viel geringer, was man von den Schadstoffkonzentrationen her nicht erwarten würde.

Dies kann auf die synergistischen Einflüsse von Temperatur und Feuchtigkeit mit den Schadstoffen zurückgeführt werden, denn Batalha hat höhere durchschnittliche Temperaturen und Feuchtigkeiten, die nach der Arrhenius Gleichung zu einer Erhöhung der Korrosionsrate führen und damit auch zu einem höheren Schadenspotential.

Tabelle 2: Glassensorwerte (Delta E) und korrespondierende durchschnittliche Außenschadstoffkonzentrationen [$\mu\text{g}/\text{cm}^3$]

Messort	NO ₂	SO ₂	VOC	T in °C	r. F. in %	Delta E
London	39,8	19,8	38	14,7	72	0,22
Batalha	12,5	4,7	10	21	89	0,10
Würzburg	26,1	8,3	22	16,6	66	0,12

4.2 Innenraumergebnisse

Die durchschnittlich niedrigsten Werte für die Innenraumerfassung durch Glassensoren zeigen die 4 Messstellen in der Würzburger Residenz, aber im Spiegelkabinett sind die Werte höher als im Blauen Vorzimmer, welches nicht auf der Besuchertour liegt, d.h. hier gibt es keine Beeinflussung durch die Besucher. Das Spiegelkabinett ist der berühmteste und meistbesuchte Raum in der Residenz und wurde erst lange nach dem 2. Weltkrieg Ende der 1980iger Jahre wieder komplett restauriert. Hier finden sich sehr hohe Werte an flüchtigen organischen Verbindungen, die wahrscheinlich noch aus den verwendeten Materialien ausdünsten (Kleber, Farbbeschichtungen, etc.) und die für die etwas höheren Glassensorergebnisse von 0,05 bis 0,06 verantwortlich sind. Die Gesamtkonzentration an flüchtigen organischen Verbindungen beträgt $1177 \mu\text{g}/\text{cm}^3$ im Spiegelkabinett und ist damit wesentlich höher als im Blauen Vorzimmer ($137 \mu\text{g}/\text{cm}^3$) oder Kaisersaal ($543 \mu\text{g}/\text{cm}^3$). Der Einfluss der flüchtigen organischen Verbindungen (ohne Säurefunktionen) auf die Schädigung von Kunstobjekten und Materialien ist jedoch noch nicht klar. Im Außenraum und in weiten Räumen kommen sie in geringen Mengen vor und man nimmt an, dass sie keinen Einfluss auf die Korrosion von Gläsern haben. Die Glassensorergebnisse der Innenräume in Batalha zeigen ein höheres korrosives Potential als die der Messorte in Würzburg und London. Obwohl London hohe Außenschadstoffkonzentrationen und entsprechend hohe Delta E Werte der Glassensoren hat, zeigten

die Messungen in den Innenräumen der Tsui- und Glasgalerie niedrige Schadgaskonzentrationen und auch niedrige Delta E Werte. Diese Werte belegen, dass die Gebäude sowohl des Victoria & Albert Museum als auch die Würzburger Residenz eine gute Filterwirkung für Außenschadgase haben. In Batalha dagegen haben wir eine gänzlich andere Situation: Im Raum V haben wir gleich eine gleich hohe Konzentration an NO₂ wie im Außenraum, das geht auf die relativ offene Struktur des Raums zurück, auch der Delta E wert ist höher als in den anderen Räumen. Eine ganz besondere Situation konnte anhand der Glassensorwerte im Raum III aufgedeckt werden: Hier folgen die Glassensorwerte nicht den Schadgaskonzentrationen. Die Delta E Werte (die Messungen wurden in mehrerer Zeitperioden durchgeführt) zeigten stetes extrem hohe Werte im Raum III, die sogar noch um ein Vielfaches höher waren als die Außenwerte sogar höher als die Außenwerte die im verkehrsreichen London gemessen wurden. Der Raum III besitzt die niedrigsten Schadgaskonzentrationen im Vergleich mit den Räumen V, VI und VII. Die hohen Delta E Werte lassen auf ein sehr hohes korrosives Potential der Umgebungsbedingung im Raum III schließen, doch es rührte nicht von den Schadgasen oder der Temperatur oder Feuchtigkeit her: Auf der Glassensoroberfläche konnte mittels Konfokaler Laser Scanning Mikroskopie und Scanning Elektronenmikroskopie ein Biofilm mit einer Dicke von $150\text{--}220 \mu\text{m}$ detektiert werden, was einer ungewöhnlich hohen Bioaktivität entspricht und auf die Anwesenheit von Mikroorganismen schließen lässt. Röntgenbeugungsuntersuchungen zeigten die Anwesenheit von

Aragonit und Kalzitkristallen sowie verschiedene Modifikationen von Kalziumcarbonaten auf der Glasoberfläche, die durch Umwandlung des in der Luft befindlichen CO₂ entstanden sind. Aragonit zum Beispiel ist eine Kalziumcarbonatmodifikation, die nur von biologischen Spezies gebildet werden kann. Die Mikroorganismen, die auf der Glasoberfläche gefunden wurden, sind Pilze und Bakterien, die organische Säuren als Stoffwechselprodukte herstellen. Diese organischen Säuren wiederum führen zu einer verstärkten Glaskorrosion und sind daher für die hohen Delta-E Werte verantwortlich. Das Schadenspotential der Umgebungsbedingung in Raum III, welcher hohe Konzentrationen an Mikroorganismen enthält, ist extrem erhöht. Die im Raum befindlichen Kunstobjekte - Holzschnitzereien, Ölgemälde und historische Seidentextilien - sind für Angriffe von Pilzen und Bakterien sehr empfindlich, denn alle organischen Materialien sind eine ideale Nahrung für Mikroorganismen.

Die Messungen und Befunde aus Batalha zeigen in sehr anschaulicher Weise die Eignung und das Potential der Glassensormethode. Die Kontrolle und Messung der Schadgase, der Temperatur und Feuchtigkeit durch Einzelparametermessung hätte nicht dazu geführt eine erhöhte Korrosivität der Umgebungsbedingungen in Batalha zu identifizieren, die durch die Mikroorganismen verursacht wurde.

Diese Befunde bestätigen, dass die Glassensormethode als Frühwarnsystem nicht nur für Schadgase, sondern auch für luftgetragene Mikroorganismen geeignet ist. Mit diesen Ergebnissen bekommt der verantwortliche Konservator die notwendigen Informationen, mit welchen man die verschiedenen Messorte hinsichtlich ihres Korrosionspotential vergleichen kann und welche Schutzmaßnahmen wann ergriffen werden müssen.

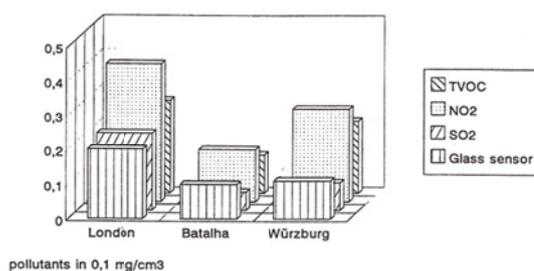


Bild 1 Grafische Darstellung der Messwerte aus London, Würzburg und Batalha

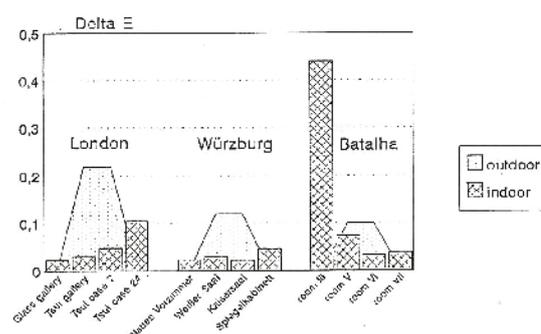


Bild 2 Glassensorwerte für Außen/Innenraum im Vergleich

Tabelle 3: Ergebnisse für London, Batalha und Würzburg (Innenräume)

Messort	NO ₂ [µg/cm ³]	SO ₂ [µg/cm ³]	VOC [µg/cm ³]	Delta E
London, Tsui Vitrine 7	4,9	1,0	2764	0,05
London, Tsui Vitrine 24	6,4	1,8	479	0,10
London, Tsui Galerie	40,7	4,8	195	0,03
London, Tsui Galerie	39,6	5,2	163	0,02

Messort	NO ₂ [µg/cm ³]	SO ₂ [µg/cm ³]	VOC [µg/cm ³]	Delta E
Batalha, Raum III	6,2	4,2	81	0,4
Batalha, Raum V	12,7	4,7	14	0,07
Batalha, Raum VI	6,0	8,0	298	0,03
Batalha, Raum VII	10,2	1,4	341	0,04
Würzburg, Blaues Vorz.	22,9	2,6	132	0,02
Würzburg, Kaisersaal	18,4	7,8	543	0,03
Würzburg, Spiegelkabinett	16,3	4,5	1177	0,05
Würzburg, Weißer Saal	20,9	1,3	848	0,03

5 Messergebnisse St. Salvator in Schwäbisch Gmünd

Im Rahmen des EU Projekts "Climate for Culture" zur Erfassung und Beurteilung von Klimaauswirkungen, wurde besonderer Fokus auf den Einfluss von Feuchtigkeit und Temperatur als Schädigungspotential für Kulturgüter gelegt. Deshalb wurden Glassensoren verstärkt in historischen Gebäuden und Objekten eingesetzt, wo die Temperatur- und Feuchtigkeitsproblematik im Vordergrund stand wie zum Beispiel in St. Salvator in Schwäbisch Gmünd. Die natürliche Felsenkirche oberhalb von Schwäbisch Gmünd ist in eine obere und untere Kapelle ausgebaut. Diese in Deutschland einzigartige Darstellung ist direkt aus dem Felshang herausgearbeitet. Verwitterungsvorgänge, die überwiegend durch das natürliche, dauerfeuchte Milieu des Felsens bestimmt werden, haben zu starken Schäden geführt. Aufgrund der natürlichen, hohen Bergfeuchte, die jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt, war die Ausbringung von Glassensoren eine geeignete Methode, um das korrosive Schädigungspotential dieser Umgebungsbedingungen und ihrer synergistischen Wirkung zu erfassen. Angesiedelt war diese Untersuchung im Arbeitspaket 1: Zustandserfassung, Erfassung von Schadenspotentialen (Klima, Nutzung, Material- und Bergfeuchte, Mikrobiologie).

5.1 Messstandorte für die Glassensoren in St. Salvator, Schwäbisch Gmünd

Im Rahmen der EU-Projektes „Climate for Culture“ wurden sieben Glassensoren M1.0 am Standort St. Salvator in Schwäbisch Gmünd in der Unteren und Oberen Kapelle exponiert (Tabelle 4).

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Die infrarotspektroskopische Auswertung der Glassensoren ergab an allen sieben Standorten ΔE -Werte von > 1 , siehe Tabelle 4 und Abbildung 2. Dies sind so überdurchschnittlich hohe Werte, die bereits im Bereich der Auswertungsgrenze liegen. Weder an den Außenstandorten wie im schadstoffbelasteten London noch an Innenstandorten wurden jemals derart hohe ΔE -Werte ermittelt. Die Resultate lassen auf extrem hohe korrosive Umgebungsbedingungen schließen – und bekräftigen, dass die vorhandene natürliche hohe Luftfeuchte der Haupttreiber für die Schädigungen ist.

Der Sensor N130071 weist mit einem ΔE -Wert von knapp 1,5 den höchsten Korrosionsgrad auf. Er wurde flach liegend auf einem Steinsockel in der „unteren Kapelle“ positioniert und erfuhr durch den engen Kontakt zum möglicherweise feuchten Stein, die stärkste Schädigung. Aufgrund seiner Lagerung kann dieser Sensor nicht direkt mit den anderen sechs Sensoren, welche aufrecht stehend exponiert wurden, verglichen werden.

Die jeweils drei Sensoren der Standorte „untere Kapelle“ und „obere Kapelle“ zeigen vergleichbare hohe Korrosionsraten. Welche der beiden Kapellen einer höheren Belastung ausgesetzt ist, kann mit diesen Ergebnissen nicht eindeutig dargestellt werden. Die Sensoren sind so stark korrodiert, dass ihre Auswertung mittels IR-Spektroskopie grenzwertig ist, und sich aufgrund von Streueffekten Messfehler ergeben können. Deshalb wird zur genaueren Klärung eine weitere Sensorstudie mit verkürztem Messzeitraum empfohlen.

Ein biogener Befall durch luftgetragene Mikroorganismen konnte mittels lichtmikroskopischer Untersuchung der Sensoroberflächen nicht nachgewiesen werden.

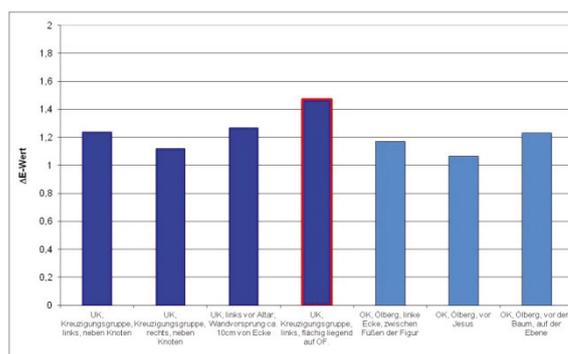


Bild 3 Grafische Darstellung der Glassensorergebnisse St. Salvator

Tabelle 4: Standorte der Glassensoren in St. Salvator, Schwäbisch Gmünd

Standort	Sensor-Nr.	ΔE Wert*
Untere Kapelle, Kreuzigungsgruppe links	N130051	1,24
Untere Kapelle, Kreuzigungsgruppe rechts	N130061	1,12
Untere Kapelle, Kreuzigungsgruppe links vor dem Altar (Wandvorsprung)	N130101	1,27
Untere Kapelle, Kreuzigungsgruppe links, flächig liegend auf der Oberfläche	N130071	1,47
Obere Kapelle, Ölberg linke Ecke	N130081	1,17
Obere Kapelle, Ölberg vor Jesusfigur	N130091	1,07
Obere Kapelle Ölberg, auf der Ebene vor dem Baum	N130111	1,23

*Expositionszeitraum: 22. April – 26. Juli 2013 (3 Monate)

Referenzen

- [1] VDI Richtlinie 3955, Blatt 2 (1993), VDI Handbuch zur Reinhaltung der Luft, Band 1 (Beuth Verlag Berlin)
- [2] D.R. Fuchs: "Glassensoren - Wirkungsdosimeter für die Umweltforschung", in: LaborPraxis, Sonderheft Labor 2000 (1994) S. 84-89
- [3] J. Leissner, S. Beuschlein, M. Pilz, G. Martin, N. Blades and P. Redol: "AMECP - Assessment and Monitoring the Environment of Cultural Property" in: European Cultural Heritage Newsletter on Research, Special Issue, Volume 10 (1997)
- [4] J. Leissner, D.R. Fuchs: "Investigations by glass sensors on the corrosive environmental conditions at stained glass windows with protective glazings in Europe", in: Pamela B. Van diver, James Druzik, George S. Wheeler

(Hrsg.) Material Issues in Art and Archaeology, Material Research Society Symposium Proceedings, Band 185(1991) S. 239-251.

[5] www.climateforculture.eu, [letzter Zugriff 12.03.2015]

Danksagung

Diese Glassensorstudie St. Salvator in Schwäbisch Gmünd konnte im Rahmen des EU Projekts "Climate for Culture" von der europäischen Kommission unter Grant Agreement 226973 gefördert werden.

Autorinnen

- Leissner, Johanna
Koordinatorin EU-Projekt Climate for Culture
Fraunhofer-EU-Büro Brüssel
Rue Royale 94
1000 Brüssel, Belgien
johanna.leissner@zv.fraunhofer.de
- Mass-Diegeler, Gabriele
Fraunhofer-Institut für Silicatforschung
ISC, Außenstelle Bronnbach
gabriele.maas@isc.fraunhofer.de

Untersuchung der Salzverwitterung an Felsmonumenten in Petra / Jordanien unter Einsatz eines Funksensornetzwerkes

Kurt Heinrichs

Abstract: Historische Steinbauwerke stellen einen bedeutenden Teil des kulturellen Welterbes dar. Weltweit entstehen beträchtliche Schäden an den Steinbauten durch die verwitterungsbedingte Zerstörung von Bausubstanz. Langjährige Erfahrungen aus der Forschung haben das zerstörerische Potential der Salzverwitterung und deren beträchtlichen Anteil an der Entstehung von Bauwerksschäden belegt. Dennoch sind Prozesse und Schadenswirksamkeit der Salzverwitterung bis heute nicht vollständig verstanden. Im Rahmen des DFG-Forschungsprojektes "PetraSalt" wurden umfassende Untersuchungen zu den Salzverwitterungsvorgängen an den berühmten Felsmonumenten in der Nabatäerstadt Petra in Jordanien durchgeführt. Hierbei wurden Laboruntersuchungen an repräsentativen Gesteinen und Verwitterungsprofilen, Untersuchungen der charakteristischen Bauwerksexpositionsregime und der verwitterungsbedingten Schadensphänomene und hochauflösendes Klimamonitoring mittels eines modernsten Funksensornetzwerkes kombiniert. Ein wesentliches Forschungsziel war die erstmalige numerische Bilanzierung von Salzkristallisations- / Salzlösungsvorgängen an den Felsmonumenten als Grundlage für eine fundierte Bewertung von Aggressivität und Schädigungspotential unterschiedlicher Salzbelastungsregime in den Bauwerksgesteinen. Methodische Vorgehensweise und Ergebnisbeispiele werden vorgestellt.

Keywords: Steinbauwerke, Salzverwitterung, Funksensornetzwerk, Umweltmonitoring, Salzkristallisationsmodelle

1 Einleitung

Die Salzverwitterung ist als eine Hauptschadensursache an einer großen Vielzahl von Steinbauten weltweit bekannt. Die Salzverwitterung tritt hierbei als Problem unter einer großen Bandbreite von Umweltbedingungen auf. Trotz vieler Jahre intensiver Forschung sind die Prozesse der Salzverwitterung immer noch nicht zufriedenstellend erklärbar. Als Gründe für dieses Kenntnisdefizit sind die Heterogenität der Systeme "Gestein", "Salz" und "Umwelteinflüsse" sowie die Komplexität ihrer dynamischen Wechselwirkungen anzusehen. Weitere systematische Untersuchungen salzgeschädigter Bauwerke sind für ein besseres Verständnis der Salzverwitterungsvorgänge und der sie kontrollierenden Einflussfaktoren unbedingt notwendig.

Das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Forschungsprojekt "Petra Salt" (2010 - 2013) folgte dem Ansatz von Untersuchungen zur Salzverwitterung unter zeitlich und räumlich realmaßstäblichen Bedingungen. Um eine methodische Vorgehensweise und Erkenntnisse von hoher Übertragbarkeit zu erzielen, wurden mit den Felsmonumenten der Nabatäerstadt Petra in Jordanien Untersuchungsobjekte ausgewählt, deren Spektrum von Ausgangs- und Einflussituationen als repräsentativ für eine Vielzahl von Steinbauwerken weltweit angesehen werden kann. Das Forschungsprojekt wurde in enger Kooperation mit den zuständigen jordanischen Behörden durchgeführt:

- Department of Antiquities of Jordan (Amman)
- Petra Development & Tourism Region Authority, Petra Archaeological Park & Cultural Heritage Office (Petra).

1.1 Felsmonumente in Petra

Die antike Stadt Petra in Südwestjordanien gehört zu den bedeutendsten Kulturstätten der Erde. Berühmt wurde sie durch ihre vielen Hundert Felsmonumente, die um die Zeitwende von den Nabatäern aus klastischen Sedimentgesteinen kambro-ordovizischen Alters herausgemeißelt wurden (Bilder 1, 2). Für die Gestaltung der Felsmonumente wurden teilweise enorme Mengen von Gesteinsmaterial abgetragen. Die Dimensionierung der Bauwerksfassaden beträgt maximal etwa 2.000 Quadratmeter.

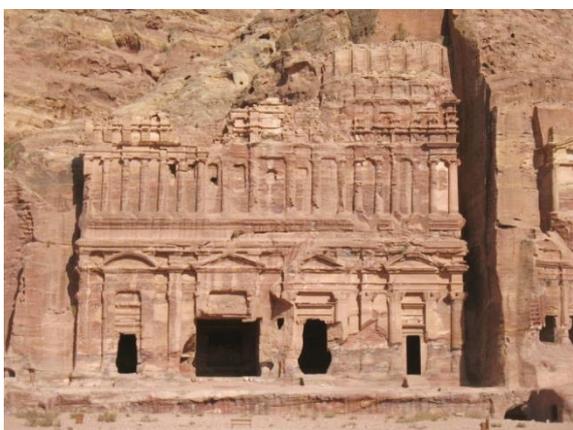


Bild 1: Felsmonument Nr. 765 ("Palastgrab")

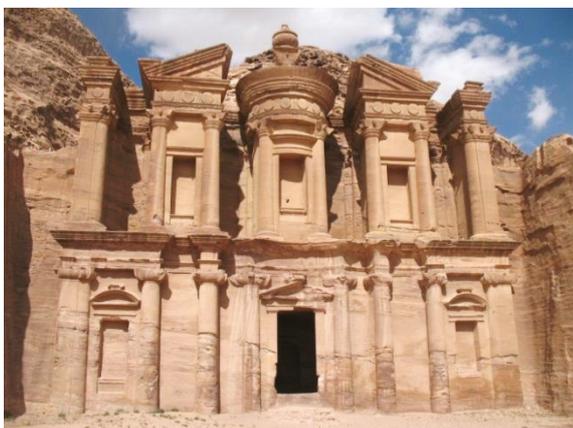


Bild 2: Felsmonument Nr. 462

1.2 Verwitterungsschäden

An allen Felsmonumenten sind Verwitterungsschäden sichtbar. Sie zeigen sich in Form verschiedenster Arten von Gesteinsverlusten, Anlagerungen auf der Gesteinsoberfläche, aktueller Gesteinsablösungen und Rissen. Die Verwitterungsschäden sind teilweise bereits von sehr hohem Ausmaß.

Als Ergebnis der eigenen langjährigen Verwitterungsforschung in Petra konnte die Salzverwitterung als Form der physikalischen Verwitterung als eine maßgebliche Schadensursache identifiziert werden. Ferner deuteten die Untersuchungsergebnisse auf einen sich beschleunigenden Verwitterungsfortschritt hin [1, 2, 3]. Mit dem Projekt "Petra Salt" wurden die Forschungsarbeiten an den Felsmonumenten Petras konsequent und systematisch auf die Salzverwitterung fokussiert.

2 Methodische Vorgehensweise

Gemeinsam mit den jordanischen Partnern wurden fünf repräsentative Felsmonumente für die im Rahmen des Projektes „PetraSalt“ geplanten Untersuchungen ausgewählt. Mithilfe eines hochauflösenden 3D-Laserscanners wurden die fünf Monumente vermessen. Aus den Scan-Daten wurden 3D-Modelle der Bauwerke erstellt [4]. An den Bauwerken wurden mittels Infrarotthermographie das Aufheiz- und Abkühlungsverhalten der Gesteinsoberflächen unter Berücksichtigung tages- und jahreszeitlicher Variation untersucht. Ferner wurden die Beregnungs- und Wasserablaufverhältnisse an den Fassaden während der überwiegend winterlichen Niederschlagsperioden dokumentiert [5, 6]. Die Charakterisierung und Bewertung der an den Felsmonumenten auftretenden Verwitterungsschäden erfolgte mittels Kartierung und Auswertung der auftretenden Verwitterungsformen nach Art und Intensität. Hierfür wurde eigens für die peträischen Felsmonumente ein detailliertes Klassifikationssystem der Verwitterungsformen entwickelt. Zur Erreichung der Projektziele war ein zeitlich wie räumlich hochauflösendes Monitoring der komplexen Klimabedingungen an den Felsmonumenten erforderlich. Mit einem autonom operierenden Funksensor-Netzwerk wurde eine innovative, ökonomische und anwenderfreundliche Technologie erstmals für Zwecke der Salzverwitterungsforschung eingesetzt [7]. Das Funksensor-Messsystem wurde in Kooperation mit der TTI GmbH – TGU Smartmote / Stuttgart entwickelt. Das Messsystem bestand im Grundprinzip aus Sensorknoten, die über Funk die Messdaten an Basisstationen übermittelten. Die Basisstationen übertrugen per GSM-Modem die Messdaten über das Internet in eine MySQL-Datenbank. Die Sensorknoten bestanden aus einer Sensorbox mit angekoppelter Sensorsäule (Bild 3).



Bild 3: Sensorknoten mit Sensorsäule

Die Sensorbox beinhaltet Mikroprozessor mit angepasster Rechen- und Speicherkapazität, Funkmodul, geeignete Signalkonditionierungsmodule und Analog-Digital-Wandler, leistungsstarke und langlebige Batterien sowie folgende Sensoren: Luftfeuchte- und Lufttemperatursensor, Gesteinsoberflächentemperatursensor, Regensensor, Windsensor, Lichtsensor. Eine besondere Neuentwicklung stellte die im Bohrloch einzubringende Sensorsäule dar, die eine tiefengestaffelte Messung von Temperatur, relativer Feuchte und Impedanz im Gesteinsinneren in sechs verschiedenen Tiefen ermöglichte (1 cm, 3 cm, 6 cm, 9 cm, 13 cm und 18 cm). Die maßangefertigte Sensorsäule besaß eine schaumstoffummantelte Aufspreizvorrichtung zwecks Anpressung an die Bohrlochwand und gleichzeitiger Abdichtung der Messkammern gegeneinander. Die der Datenfernübertragung dienenden drei Basisstationen waren mit leistungsstarken Solareinheiten ausgestattet. Insgesamt wurden 21 Sensorknoten und drei Basisstationen in Petra installiert (Bilder 4, 5).

Die Ergebnisse aus den vorausgegangenen Bauwerksuntersuchungen (3D-Laserscanning, klimatische Referenzuntersuchungen der Bauwerksflächen, Untersuchung von Beregnungs- und Wasserablaufverhältnissen, Untersuchung der sichtbaren Verwitterungsschäden) gewährleisteten die Auswahl repräsentativer Installationsbereiche. Die Installation der Sensorknoten umfasste Einrüstung der Untersuchungsgebiete, Anlage von Bohrlöchern (trockene Kernbohrung) mit Gewinnung von Bohrkernen, Einbringen der Sensorsäule, Anpressen der Sensorsäule an die Bohrlochwand mittels Spreizdübel, Aufschrauben der Sensorbox und abschließend die Beschichtung der Sensorbox mit Sand in der Farbe der umgebenden Gesteinsoberfläche (optische Anpassung). Das Funksensor-Messsystem wurde darauf programmiert, Messwerte an jedem Sensor im Zeitintervall von 15 Minuten zu registrieren.

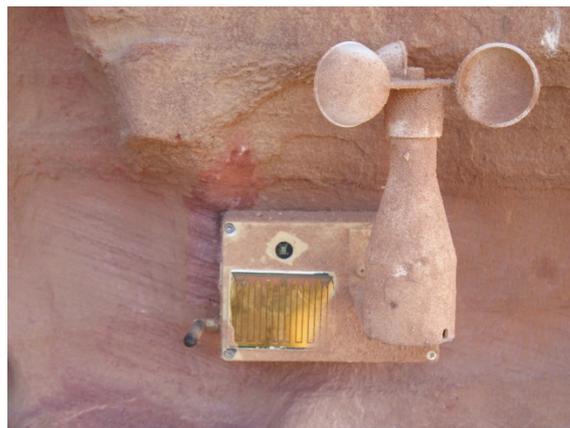


Bild 4: Installierter Sensorknoten



Bild 5: Solarbetriebene Basisstation

Seit seiner Installation im September 2012 registrierte und übertrug das Sensornetzwerk bis Juni 2013 (Deinstallation gemäß zeitlicher Vorgabe seitens der jordanischen Verantwortlichen) nahezu permanent Messdaten. Somit lagen Messdaten aus zehn Monaten vor, die - wie im Projekt angestrebt - Informationen zu den vier Jahreszeiten in der Petra-Region lieferten (Winter, Frühsommer, Hochsommer, Spätsommer). Datenlücken waren zumeist auf vorübergehende Störungen des Funknetzes in Petra zurück zu führen. Das Messsystem hat Daten in einem bisher nicht möglichen Umfang zur Dynamik der auf Steinbauwerke einwirkenden Klimaeinflüsse geliefert (mehrere Millionen Messdaten), unter Berücksichtigung tageszeitlicher, jahreszeitlicher und gesteinstiefenabhängiger Schwankungen. Durch die registrierten Klimamessdaten wurden die thermodynamischen Randbedingungen für Salzverwitterungsvorgänge differenziert und hochauflösend erfasst. Die Messdaten wurden kontinuierlich aus der Datenbank exportiert zwecks weiterer Aufbereitung und Auswertung.

Die im Zuge mit der Einbringung der Sensorsäulen in Bohrlöchern gewonnenen Bohrkern wurden für die segmentweise Ionenanalyse der löslichen Salze und deren Verteilung im Tiefenprofil genutzt (Analysen im Abstand von 1 cm). Anhand der Untersuchungsergebnisse zu den Ionengehalten wurden ausgeglichene Ionenbilanzen ermittelt. Diese stellen die Grundlage für die rechnerische Modellierung des Salzkristallisationsverhaltens in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte dar. Hierbei wurde das in der Salzverwitterungsforschung etablierte Programm „ECOS“ (Environmental Control of Salt Damage – thermodynamic model for the prediction of the crystallization behaviour of salt mixtures under changing climate conditions) mittels „RUNSALT“ (Benutzeroberfläche für das ECOS-Programm) genutzt [8]. So wurden für alle Bohrkern tiefengestaffelte Salzkristallisationsmodelle über die jeweils relevanten Gesamtspannen von Temperatur und relativer Feuchte ermittelt.

Für die Zusammenführung von Salzkristallisationsmodellen und Klimadaten zwecks zuverlässiger Charakterisierung und Quantifizierung von Salzkristallisations- / Salzlösungsvorgängen wurde mit hohem Zeitaufwand ein neues, sehr umfassendes Auswertekonzept entwickelt, das sich als sehr aussagekräftig erwiesen hat. Die Vorgehensweise zielte grundsätzlich auf eine Quantifizierung von Salzkristallisations- / Salzlösungsvorgängen im Tiefenprofil analog zur Segmentierung der Bohrkern [9]. Dies erfordert die Interpolation von Mikroklimadaten für bestimmte Tiefenbereiche. Ein entsprechendes Interpolationsmodell wurde entwickelt.

3 Fallbeispiele

Nachfolgend werden die Ergebnisse von zwei sehr unterschiedlichen Fallbeispielen gegenübergestellt. Das Fallbeispiel 770-10 (Monument Nr. 770 - Buntes Grab, Sensor-knoten 10) adressiert den buntgebänderten, feinkörnigen und matrixreichen Sandstein im mittleren Teil der kambrischen Umm Ishrin Sandstein Formation (Bild 6). Der Sensor-knoten 10 wurde in einer Höhe von 3,4 m an einem nordexponierten, überwiegend beschatteten Bauwerksbereich am Rand einer Wasserablaufzone installiert. Als Verwitterungsform zeigte sich in diesem Bereich intensives Absanden. Das Fallbeispiel 34-20 (Monument Nr. 34 - Barocktriklinium, Sensor-knoten 20) bezieht sich auf den weißen, mittelkörnigen, fast reinen Quarzsandstein der ordovizischen Disi Sandstein Formation (Bild 7).

Der Sensor-knoten 20 befand sich in einer Höhe von 5,5 m an einem nordnordostexponierten, ebenfalls überwiegend beschatteten Bauwerksbereich. Die Gesteinsoberfläche erschien mit Ausnahme einer bräunlichen Kruste nahezu unverwittert.



Bild 6: Bohrkern, Fallbeispiel 770-10



Bild 7: Bohrkern, Fallbeispiel 34-20

4 Ergebnisse

Nach der segmentweise an den Bohrkernen durchgeführten Ionenanalyse der löslichen Salze und anschließender Ermittlung ausgeglichener Ionenbilanzen ergaben sich aus der rechnerischen Modellierung des Salzkristallisationsverhaltens mittels ECOS - RUNSALT für den Fall vollständiger Salzkristallisation die in Bildern 8 und 9 dargestellten Salzverteilungen im Tiefenprofil.

Das Fallbeispiel 770-10 zeigt eine klare Dominanz der Chloridsalze (Halit - NaCl, Sylvin - KCl, Carnallit - $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Daneben treten in allen Bohrkernsegmenten Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und Calciumnitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), zusätzlich im gesteinsoberflächennahen Bereich des Profils Kaliumnitrat (KNO_3) auf. Insgesamt zeigt sich eine recht hohe und tiefgründige Salzbelastung. Die höchste Salzbelastung liegt hierbei gesteinsoberflächennah (0 - 3,5 cm Tiefe). Sie korrespondiert mit einem durch die Salze erzeugten Porenfüllungsgrad von etwa 8 - 11 %.

Im Fallbeispiel 34-20 ist die Salzbelastung zwar tiefgründiger, insgesamt jedoch im Vergleich zu Fallbeispiel 770-10 signifikant geringer. Im Fall vollständiger Kristallisation treten die Salze Halit, Carnallit, Calciumnitrat und Gips in allen Segmenten des Tiefenprofils auf, Sylvin und Kaliumnitrat zusätzlich im gesteinsoberflächennahen Bereich. Das Verhältnis des schwerer löslichen Gipses zu den leicht löslichen Chlorid- und Nitratsalzen ist im Vergleich zu Fallbeispiel 770-10 deutlich höher. Die maximale Salzbelastung liegt in der Tiefe zwischen 5,5 und 10,5 cm. Sie entspricht aber nur einem Porenfüllungsgrad von weniger als 1 %.

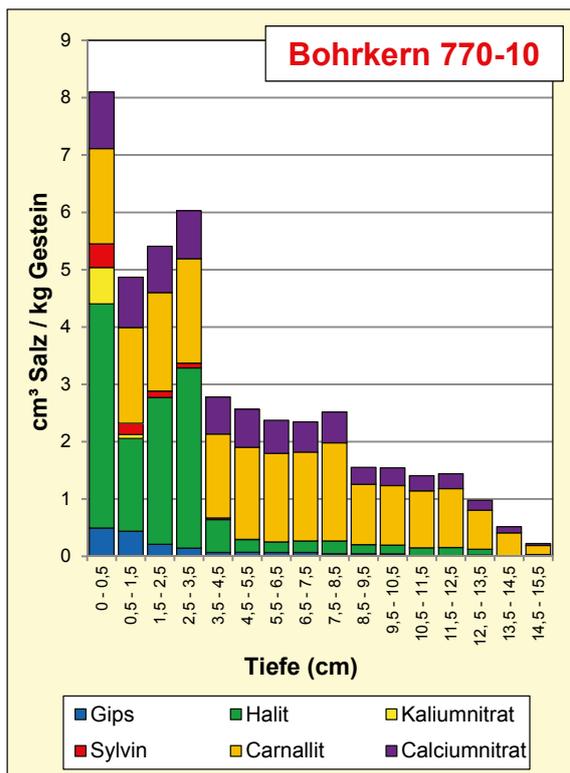


Bild 8: Bohrkerne 770-10, Buntgrab, Salzverteilung im Tiefenprofil im Fall vollständiger Kristallisation gemäß ECOS - RUNSALT

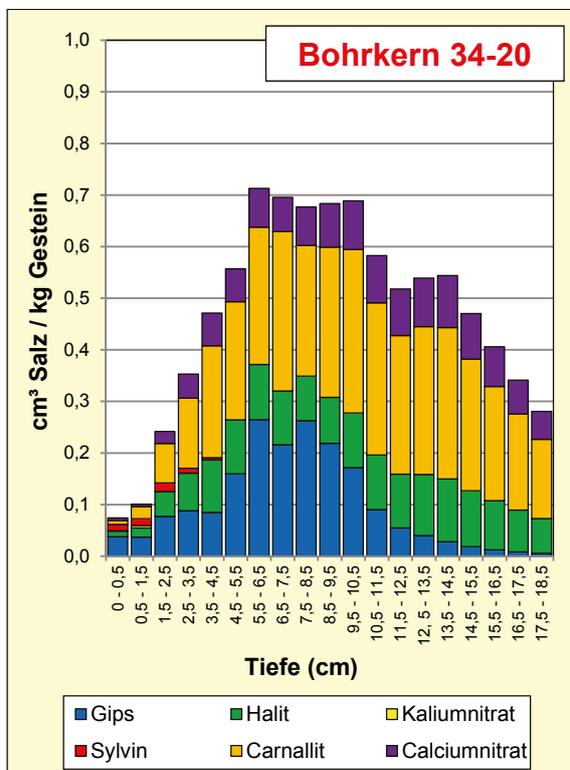


Bild 9: Bohrkerne 34-20, Buntgrab, Salzverteilung im Tiefenprofil im Fall vollständiger Kristallisation gemäß ECOS - RUNSALT

Die Bilder 10-13 zeigen im Vergleich der Fallbeispiele 770-10 und 34-20 gestreift gestaffelte Gänge von Temperatur und relativer Feuchte (Ergebnisbeispiele aus einer Messperiode im Oktober 2012 nach Aufbereitung der Messdaten). Die Bilder 14-17 illustrieren für die beiden Fallbeispiele die Schwankungsbreite von Temperatur und relativer Feuchte im Tiefenprofil unter Berücksichtigung des gesamten Messzeitraums von September 2012 bis Juni 2013 (ca. 300.000 Temperatur- und Feuchtedaten je Fallbeispiel). Charakteristisch für beide Fallbeispiele und den gesamten Messzeitraum war die Abnahme der Schwankungsbreite von Temperatur und relativer Feuchte von der Gesteinsoberfläche zur Tiefe hin. Maximumtemperaturen waren in beiden Fällen ähnlich, Minimumtemperaturen und damit auch die Durchschnittstemperaturen waren im Fallbeispiel 770-10 im Vergleich zu Fallbeispiel 34-20 jedoch höher. In beiden Fällen nahmen die Minimumtemperaturen mit zunehmender Gesteinstiefe zu, die Maximumtemperaturen hingegen ab. Deutliche Unterschiede zeigten sich in den Schwankungen der relativen Feuchte im Tiefenprofil. Im Fallbeispiel 770-10 stieg mit zunehmender Gesteinstiefe das Minimum der relativen Feuchte. Das Maximum der relativen Feuchte nahm von der Gesteinsoberfläche bis in eine Tiefe von 3 cm ab und stieg dann deutlich mit zunehmender Gesteinstiefe. Der Durchschnittswert der relativen Feuchte stieg deutlich mit zunehmender Gesteinstiefe. Selbst im Hochsommer war die relative Feuchte in tieferen Gesteinsbereichen auffallend hoch. Im Fallbeispiel 34-20 stieg mit zunehmender Gesteinstiefe das Minimum und sank das Maximum der relativen Feuchte. Der Durchschnittswert der relativen Feuchte - bezogen auf den gesamten Messzeitraum - blieb im Tiefenprofil annähernd gleich bei etwa 50 %.

Im Zwischenergebnis zeigten sich somit für die Fallbeispiele zwei sehr unterschiedliche Salzbelastungsszenarien und ebenso sehr verschiedene, darauf einwirkende Mikroklimaregime. Bild 18 zeigt ein Beispiel der Salzkristallisationsmodelle, die mithilfe von ECOS-RUNSALT jeweils für alle Tiefenprofilsegmente ermittelt wurden. Bild 19 zeigt ein Beispiel für die tageweise Zuordnung der Klimadaten zu den tiefengestaffelten Salzkristallisationsmodellen, hier für Gesamtsalz und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Salzkristallisationsgrade. Analoge Auswertungen erfolgten auch für alle Einzelsalze. Diese Zuordnungen stellten die Grundlage für die numerische Bilanzierung der Salzkristallisations- / Salzlösungsvorgänge nach Häufigkeit und Intensität dar.

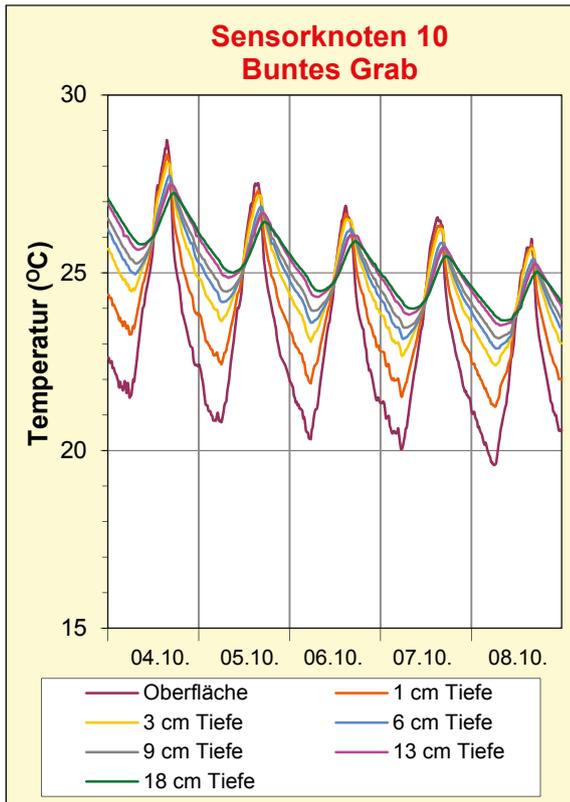


Bild 10: Gang der Temperatur, gesteinstiefengestaffelt; Sensorknoten 10, Buntgrab, 4.- 8.10.2012

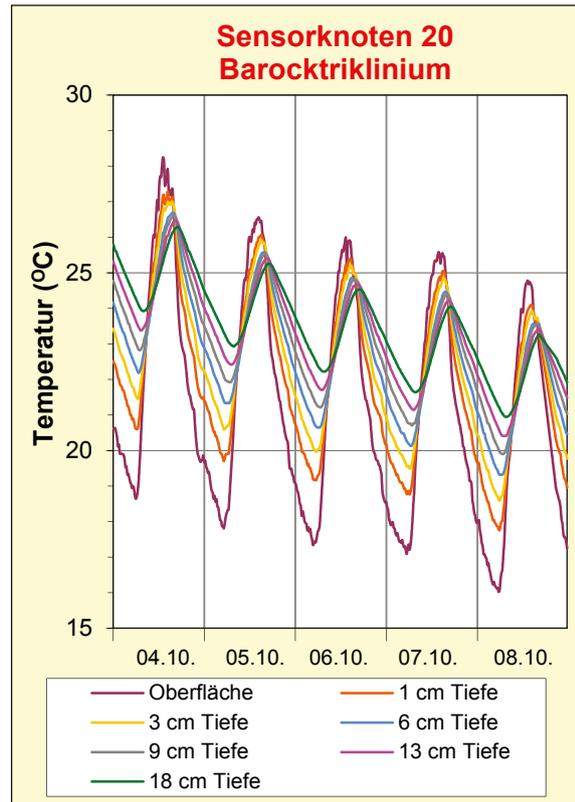


Bild 12: Gang der Temperatur, gesteinstiefengestaffelt; Sensorknoten 20, Barocktriklinium, 4.- 8.10.2012

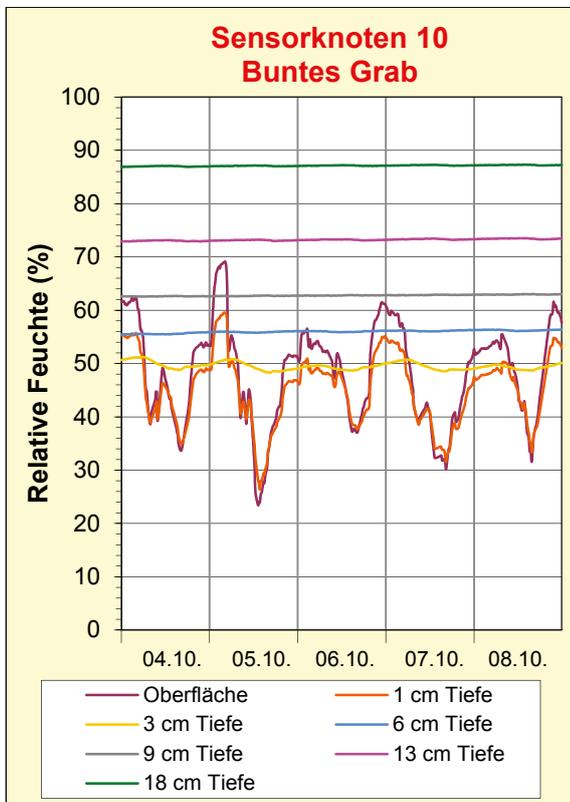


Bild 11: Gang der rel. Feuchte, gesteinstiefengestaffelt; Sensorknoten 10, Buntgrab, 4.- 8.10.2012

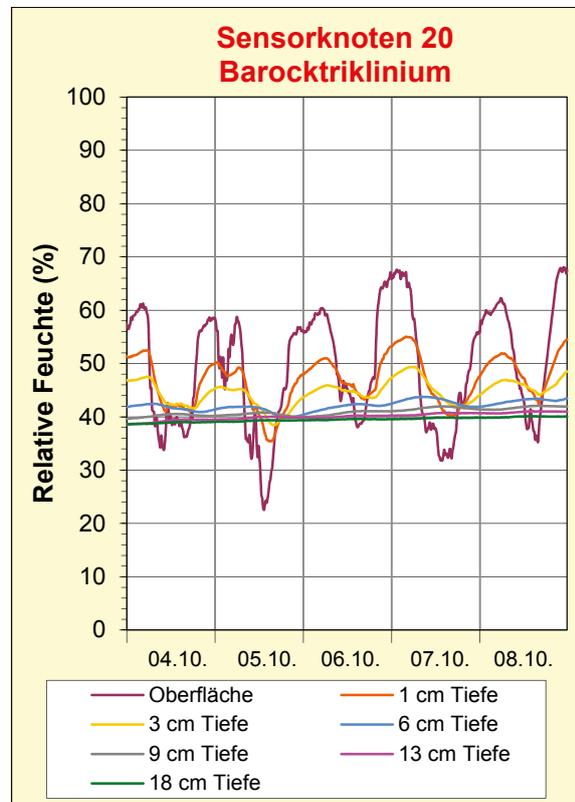


Bild 13: Gang der rel. Feuchte, gesteinstiefengestaffelt; Sensorknoten 20, Barocktriklinium, 4.- 8.10.2012

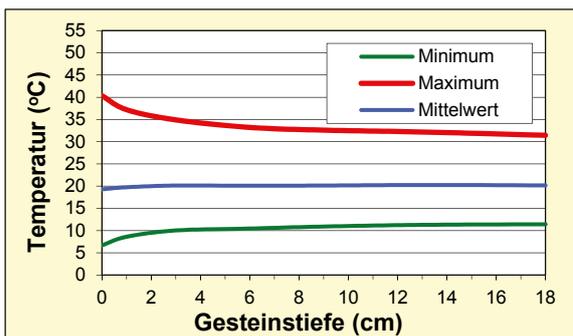


Bild 14: Gesamtschwankungsbreite der Temperatur, Sensorknoten 10, September 2012 - Juni 2013

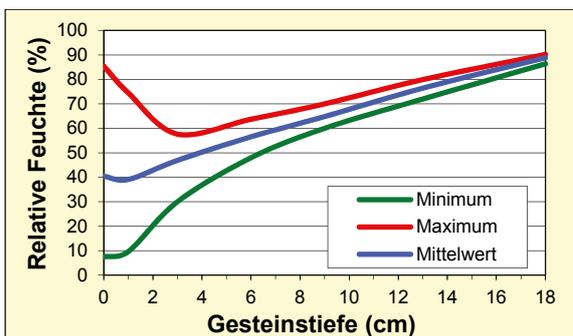


Bild 15: Gesamtschwankungsbreite der relativen Feuchte, Sensorknoten 10, September 2012 - Juni 2013

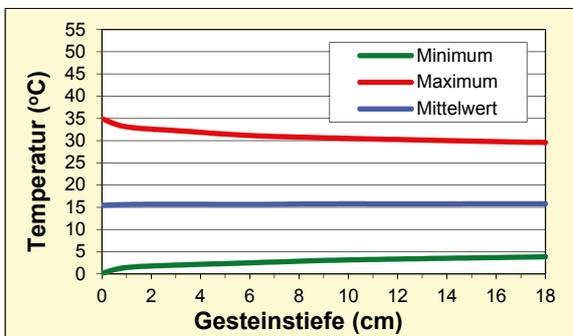


Bild 16: Gesamtschwankungsbreite der Temperatur, Sensorknoten 20, September 2012 - Juni 2013

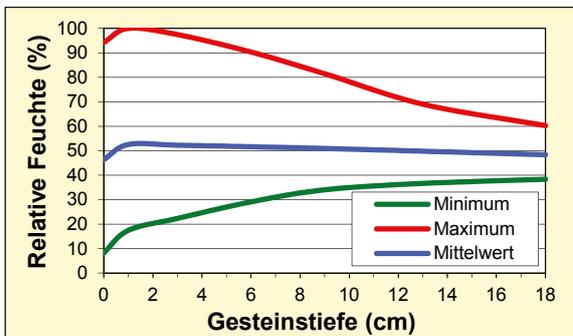


Bild 17: Gesamtschwankungsbreite der relativen Feuchte, Sensorknoten 20, September 2012 - Juni 2013

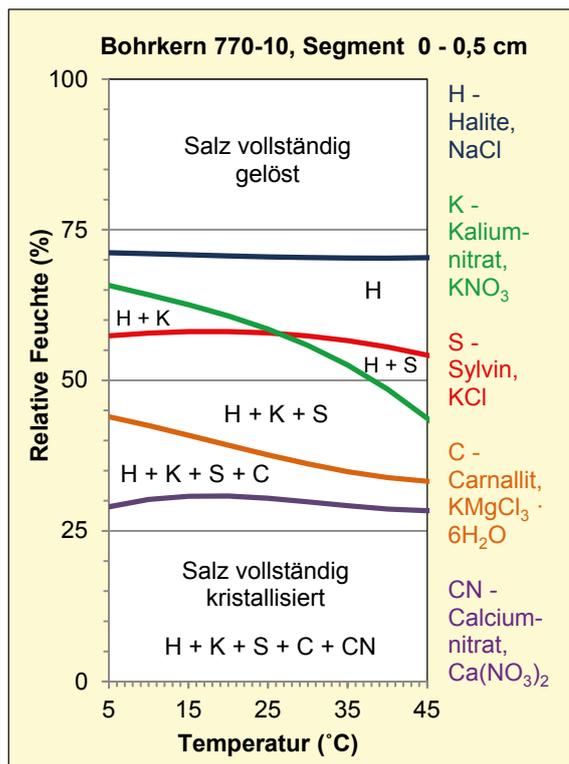


Bild 18: Profil 770-10, 0 - 0,5 cm, Salzphasenbildung in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte gemäß ECOS - RUNSALT

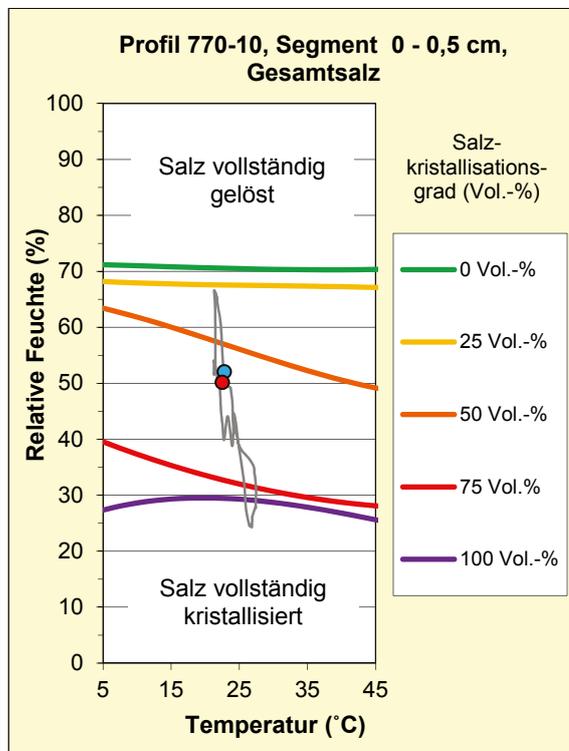


Bild 19: Profil 770-10, 0 - 0,5 cm, Kristallisationsmodell für Gesamtsalz mit Tagesgang (grau) von Temperatur und relativer Feuchte am 5. Oktober 2012 (blauer Punkt: Tagesbeginn; roter Punkt: Tagesende)

Für das Fallbeispiel 770-10 können die Ergebnisse wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Salzkristallisations- / Salzlösungsprozesse beschränkten sich im Messzeitraum (September 2012 – Juni 2013) nur auf die äußeren 8,5 cm des Tiefenprofils. In den tieferen Bereichen war das Salz (ausgenommen Gips) immer vollständig gelöst aufgrund der hohen, immer über den Gleichgewichtsfeuchten der Salzgemische liegenden relativen Feuchten. Im Messzeitraum lag Gips im gesamten Tiefenprofil immer vollständig kristallisiert vor.
- Die äußeren 4,5 cm des Tiefenprofils - und damit genau der Bereich der höchsten Salzbelastung - unterlagen nahezu tagtäglich im Messzeitraum Salzkristallisations- / Salzlösungsprozessen (Bild 20). An den wenigen restlichen Tagen lag das Salz ganztägig vollständig auskristallisiert vor. Zur Tiefe hin nahm die Häufigkeit von Salzkristallisations- / Salzlösungsvorgängen deutlich ab.
- Die Tiefgründigkeit von Salzkristallisations- / Salzlösungsprozessen nahm vom Spätsommer (September – November 2012) zum Winter (Dezember 2012 – Februar 2013) hin ab, stieg dann wieder im Frühsommer (März – Mai 2013) und weiter im Hochsommer (hier nur Juni 2013). Die maximale Tiefe aktiver Salzkristallisations- / Salzlösungsprozesse wurde im Hochsommer erreicht.
- Vollständige Auskristallisation des Gesamtsalzes wurde nur in den äußeren 3,5 cm des Tiefenprofils erreicht, in den äußeren 1,5 cm insgesamt an etwa 50 % aller Messtage, besonders im Früh- und Hochsommer. Vollständige Lösung des Gesamtsalzes wurde in den äußeren 4,5 cm des Tiefenprofils nur sehr selten erreicht (November 2012 - Januar 2013), in größerer Tiefe hingegen sehr häufig.
- Halit stellte insgesamt die aktivste Salzphase dar, gefolgt von Sylvin, Kaliumnitrat, Carnallit und Calciumnitrat. Dies betraf Häufigkeit und Tiefgründigkeit der Kristallisations- / Lösungsprozesse gleichermaßen (Bild 21). Nur in den äußeren 1,5 cm des Tiefenprofils erwiesen sich alle fünf Einzelsalze als sehr aktiv.
- Die Ergebnisse zeigten insgesamt, dass ein sehr hoher durch Salzkristallisations- / Salzlösungsprozesse erzeugter Stress im gesteinsoberflächennahen Bereich des Tiefenprofils auftritt. Die entsprechend hohe Schadenswirksamkeit dieser Stressbelastung zeigt sich im intensiven Absanden des Gesteins.

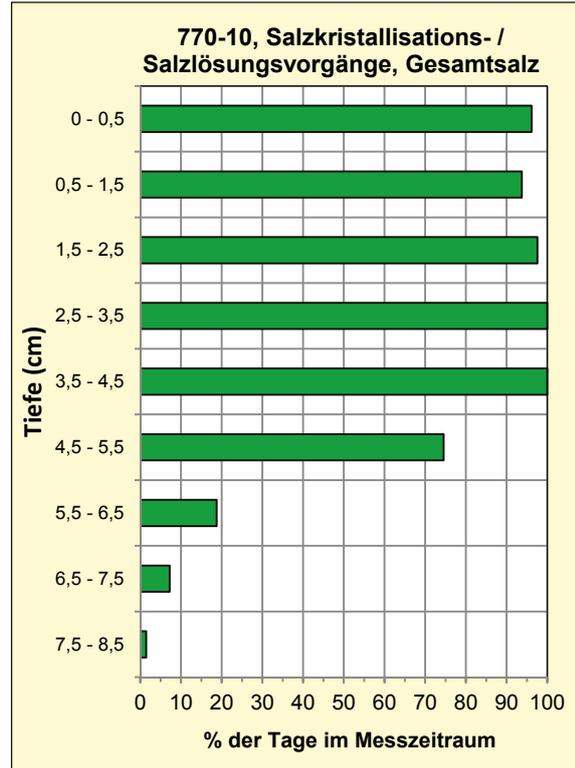


Bild 20: Häufigkeit von Salzkristallisations- / Salzlösungsvorgängen im Tiefenprofil, Gesamtsalz, Fallbeispiel 770-10, September 2012 - Juni 2013

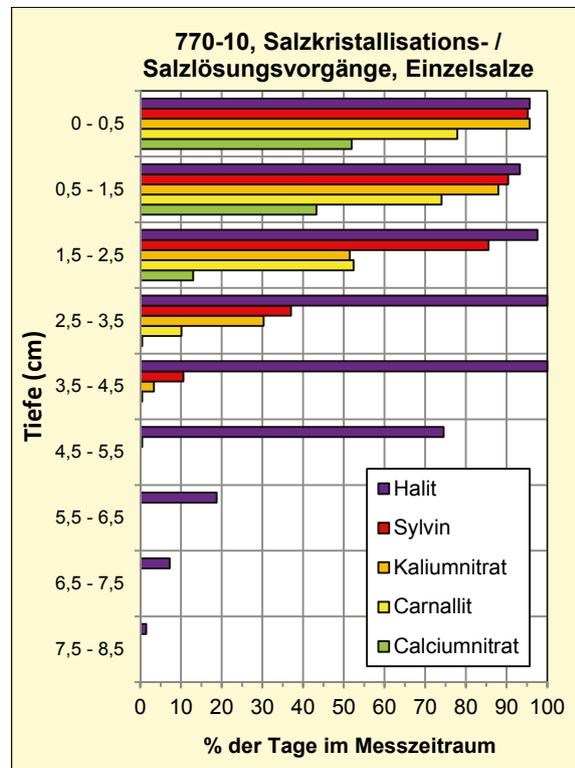


Bild 21: Häufigkeit von Salzkristallisations- / Salzlösungsvorgängen an den Einzelsalzen im Tiefenprofil, Fallbeispiel 770-10, September 2012 - Juni 2013

Folgende Ergebnisse ergaben sich für das Fallbeispiel 34-20:

- Salzkristallisations- / Salzlösungsprozesse traten im Messzeitraum (September 2012 – Juni 2013) über das gesamte Tiefenprofil hinweg auf. Im Messzeitraum lag Gips - außer selten im gesteinsoberflächennahen Bereich während der Wintermonate - im Tiefenprofil immer vollständig kristallisiert vor.
- Über das gesamte Tiefenprofil hinweg fanden im Messzeitraum nahezu tagtäglich Salzkristallisations- / Salzlösungsprozesse statt (Bild 22). In den verbleibenden Tagen lag das Salz gantztägig entweder vollständig auskristallisiert vor (0 - 5,5 cm Tiefe, überwiegend in den Früh- bis Hochsommermonaten) oder vollständig gelöst (0 - 14,5 cm Tiefe, während der Wintermonate).

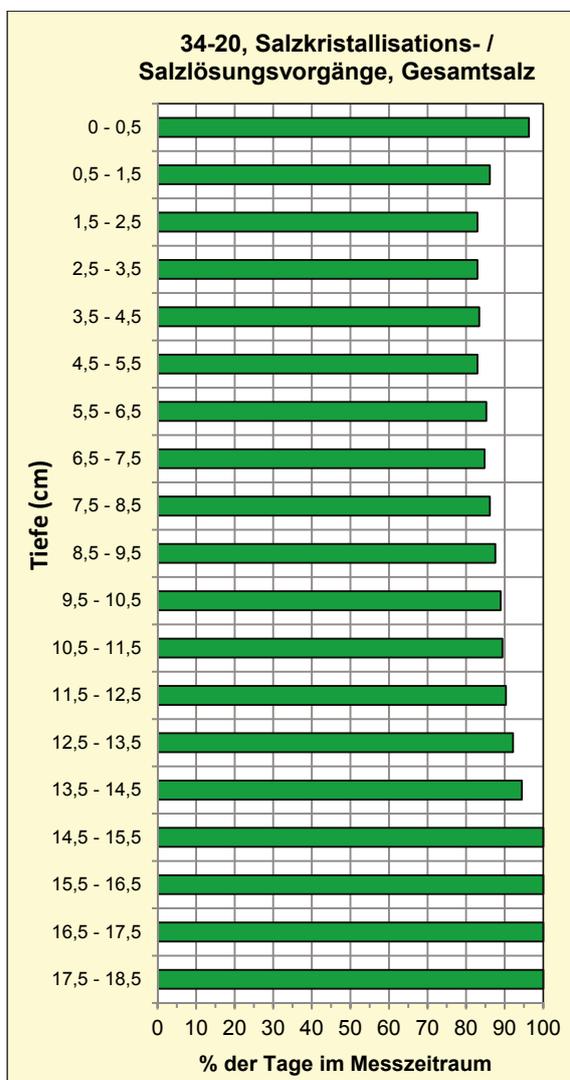


Bild 22: Häufigkeit von Salzkristallisations- / Salzlösungsvorgängen im Tiefenprofil, Gesamtsalz, Fallbeispiel 34-20, September 2012 - Juni 2013

- Vollständige Auskristallisation des Gesamtsalzes wurde nur in den äußeren 6,5 cm erreicht, jedoch recht selten. Vollständige Lösung des Salzes (ohne Gips) trat bis zu einer Tiefe von 15,5 cm auf, beschränkt auf die Wintermonate.
- Die höchsten Salzkristallisationsgrade wurden in der gesteinsoberflächennahe Zone erreicht.
- Halit war die aktivste Salzphase dar, gefolgt von Sylvin, Kaliumnitrat und Carnallit. Dies betraf Häufigkeit und Tiefgründigkeit der Kristallisations- / Lösungsprozesse gleichermaßen (Bild 23).

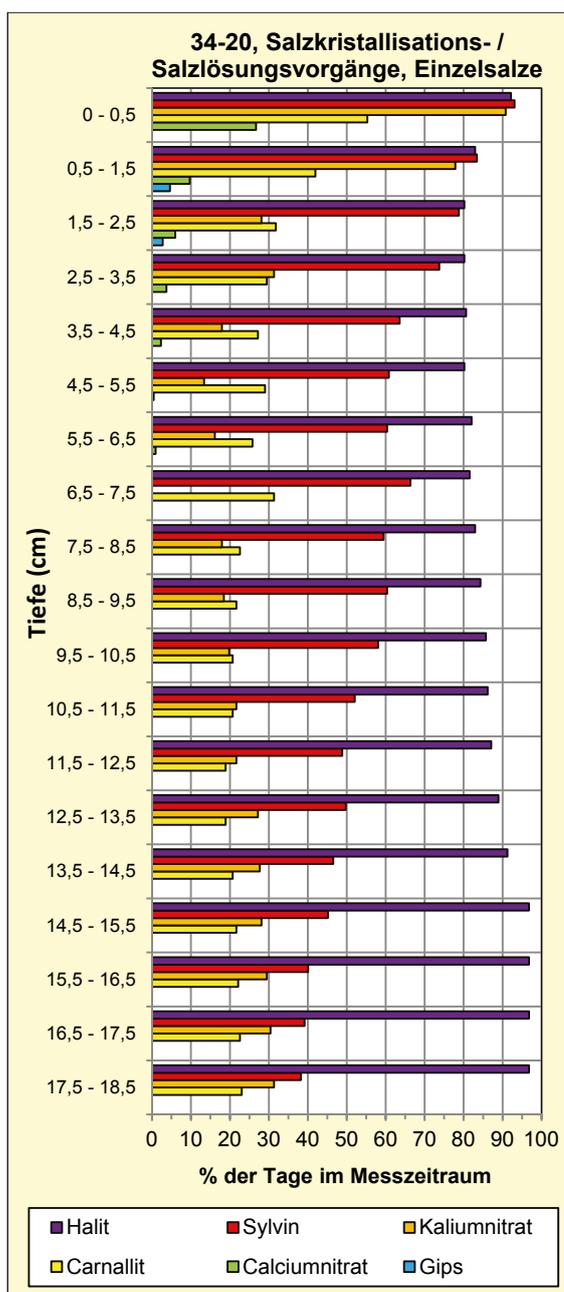


Bild 23: Häufigkeit von Salzkristallisations- / Salzlösungsvorgängen an den Einzelsalzen im Tiefenprofil, Fallbeispiel 34-20, September 2012 - Juni 2013

- Die Ergebnisse zeigten insgesamt, dass die intensivsten Kristallisations- / Lösungsprozesse gesteinsoberflächennah auftreten. Insgesamt wirken sie aber auf eine sehr geringe Salzfracht ein, im gesteinsoberflächennahen Bereich auf die geringste Salzlast im Tiefenprofil. Dies erklärt die Tatsache, dass sich das Salzregime bisher nicht sichtbar als schadenswirksam erwiesen hat.

Die Bauwerksgesteine sind also fähig, einer Salzbelastung bis zu einem bestimmten Grad zu widerstehen, bevor es zur Gesteinsablösung kommt. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zur Verwitterungsprogression deuten darauf hin, dass diese Verträglichkeitsphase vergleichsweise lang ist.

5 Literaturreferenzen

- [1] Heinrichs, Kurt: Diagnose der Verwitterungsschäden an den Felsmonumenten der antiken Stadt Petra / Jordanien. Dissertation - RWTH Aachen, Aachener Geowissenschaftliche Beiträge, Band 41, Aachen: Verlag Mainz, 2005
- [2] Heinrichs, Kurt: Diagnosis of weathering damage on rock-cut monuments in Petra / Jordan. *Environmental Geology*, Vol. 56 (2008), No. 3-4, S. 643-675
- [3] Heinrichs, Kurt: Steinalt, aber nicht steinhart - Verwitterungsforschung in der Nabatäerstadt Petra in Jordanien. *Naturstein in der Kulturlandschaft*, Halle: Mitteldeutscher Verlag, 2013, S. 260-270
- [4] Heinrichs, Kurt & Nguyen, Hieu Trung: 3D terrestrial laser scanning of rock-cut monuments in Petra / Jordan. *Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie*, Heft 104, Aachen: Verlag Mainz, 2011, S. 27-37
- [5] Heinrichs, Kurt & Azzam, Rafiq: Investigation of salt weathering on stone monuments by use of a modern wireless sensor network exemplified for the rock-cut monuments in Petra / Jordan - a research project. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, Issue 2, 2012, S. 191-216
- [6] Heinrichs, Kurt & Azzam, Rafiq: Investigation of salt weathering on stone monuments - the "petraSalt" research project. *Proceedings of the 19th Conference on Engineering Geology and of the Forum for young Engineering Geologists* (March 13-15, 2013), Munich, 2013, S. 347-352
- [7] Heinrichs, Kurt et al.: The use of a wireless sensor network for high-resolution environmental monitoring of stone monuments in context with investigation of salt weathering - exemplified for rock-cut monuments in Petra / Jordan. *Proceedings of the 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone* (October 22-26, 2012), New York, in Druck
- [8] Price, Clifford A.: An expert chemical model for determining the environmental conditions needed to prevent salt damage in porous materials. *Protection and Conservation of the European Cultural Heritage*, Research Report No. 11, London: Archetype, 2000
- [9] Heinrichs, Kurt & Azzam, Rafiq: Quantitative analysis of salt crystallization - dissolution processes on rock-cut monuments in Petra / Jordan. *Engineering Geology for Society and Territory*, Vol. 8, Part IX (2015), S. 507-510

Autor

- Heinrichs, Kurt
Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie / RWTH Aachen,
Lochnerstraße 4-20, 52064 Aachen
Tel.: 0241-8096776
Email: heinrichs@lih.rwth-aachen.de
- Studium der Geologie an der RWTH Aachen (Diplom)
- Promotion an der RWTH Aachen
- langjähriger Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe "Natursteine und Verwitterung" am Geologischen Institut der RWTH Aachen
- seit 2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH Aachen



Das Steinerne Album in Großjena – Barockes Kleinod unter dem Einfluss der Umwelt

Jeannine Meinhardt

Abstract: Die 12 Bildfelder des barocken Steinernen Festbuchs sind direkt in das anstehende Gestein geschlagen. Damit verbinden sich starke Belastungen des Sandsteines durch Feuchte und Salze. Durch die freie Exposition führte weiterhin die Deposition von Luftschadstoffen, insbesondere während der DDR, zu massiven Schäden an den Reliefs. In Folge einer grundhaften Instandsetzung im Rahmen eines Förderprojekts der Deutschen Bundestiftung Umwelt in den 1990er Jahren, bei der umfassende KSE-Tränkungen der Reliefs mit Hilfe der Infusionstechnik erfolgten und in vielen Bereichen Steinerergänzungsmörtel zum Einsatz kamen, sind trotz eines etablierten Monitoring- und Pflegeplans wieder erhebliche Schäden zu beobachten. Dazu gehören Absanden sowie Schuppen- und Schalenbildung. Diese Schadensbilder gehen im Wesentlichen einher mit z.T. massiven Salzbelastungen, wodurch in gefährdeten Bereichen auch die Antragsmörtel hohl liegen. Die Ablesbarkeit der Details und insgesamt auch der Fortbestand der Reliefs ist in Gefahr, wenn nicht eine neuerliche umfassende Restaurierung erfolgt. Diese sollte erstmals auf der Grundlage von Salzreduktionsmaßnahmen vorgenommen werden. Um den Belastungszustand und die Dynamik der Salze und der Feuchte in Abhängigkeit von der Umgebung richtig einschätzen zu können, ist in dem Zusammenhang ein Untersuchungsprogramm geplant, bei dem u.a. drahtlose, minimal invasive Sensoren zum Monitoring dieser Parameter im Tiefenprofil zum Einsatz kommen sollen. Seit kurzer Zeit wird der Weinberg, an dessen Fuß die Reliefs stehen, wieder genutzt. Auch der Einfluss der Bewirtschaftung auf die Schadensdynamik im Gestein muss geklärt werden.

Keywords: anstehendes Gestein, KSE, Monitoring, Pflegeplan, Salzbelastung, Salzreduktion, Sensoren

1 Einleitung

Das Festbuch wurde 1722 anlässlich des 10jährigen Regentendaseins von Herzog Christian durch verschiedene Steinmetzen im Auftrag des Hofjuweliers Johann Christian Steinauer auf seinem Weinberg geschaffen. Es besteht aus 12 Reliefs mit biblischen Motiven, die im Zusammenhang mit dem Weinbau stehen. Als Schmuckreliefs für den Weinberg angelegt, sind sie bis heute einzigartiges Zeugnis damaliger Lebenskultur und phantasievoller Gestaltung des Lebensraumes. Sie sind direkt in den anstehenden Fels der geologischen Formation Buntsandstein gearbeitet und stellen in der Gesamtheit die größten Bildreliefs im europäischen Kulturraum dar. Dieses einzigartige barocke Kulturdenkmal ist unter dem Namen Steinernes Festbuch in die Kunstgeschichte eingegangen. Über die Zeit geriet das Steinerne Festbuch in Vergessenheit und war Mitte des

20. Jahrhunderts nur noch in Fachkreisen bekannt (Bild 1).

2 Geologische Gegebenheiten

Die Bildfelder sind in das anstehende Gestein gearbeitet und repräsentieren verschiedene Gesteinsvarietäten, die stratigraphisch übereinander in dem Felsen aufgeschlossen sind. Es handelt sich um den Übergangsbereich von der Hardeggen- zur Sollingen Folge. Makroskopisch sind grob drei Varietäten zu unterscheiden - grau-feinkörnig, rot-feinkörnig und gelb-grobkörnig. Petrographisch können dick- bis mittelbankige, fein- bis mittelkörnig, hauptsächlich kieselig gebundene Sandsteine mit wechselnder Festigkeit beschrieben werden. Stellenweise liegen auch tonige und karbonatische Bereiche vor. So sind an dem Aufschluss stellenweise Tongallen und Ton-

linsen zu beobachten. Die Art der Bindung bzw. der Tonanteil und auch die Porosität der Gesteine, die zwischen den aufgeschlossenen Varietäten schwanken, haben wesentlichen Einfluss auf die Verwitterungsbeständigkeit des Materials. Des Weiteren können wasserführende Bereiche in dem Aufschluss beobachtet werden.

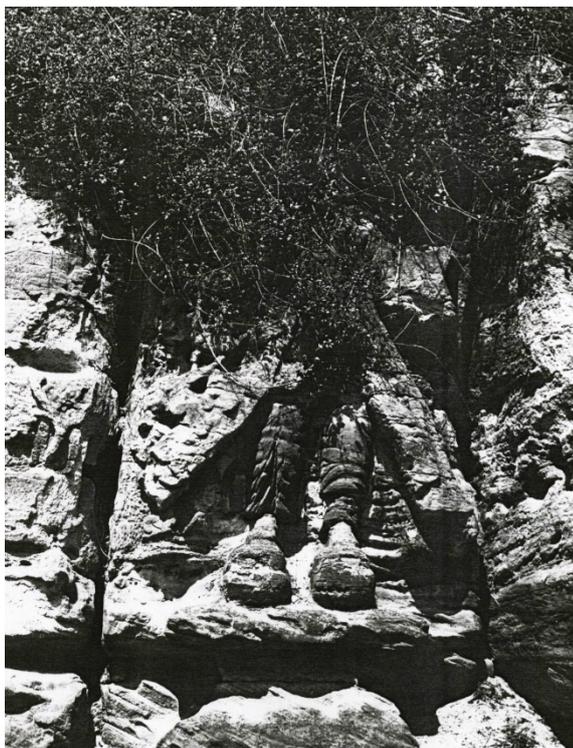


Bild 1: In Vergessenheit geraten – völlig zugewachsenes Bildfeld 10, Noah als erster Weinbauer [1]

3 Bisherige restauratorische und konservatorische Bemühungen

In Folge schädlicher Umwelteinflüsse, insbesondere in DDR-zeitlicher Vergangenheit, sind durch schwefelsaure Emissionen und damit einhergehenden sauren Niederschlägen massive Schädigungsprozesse in den Reliefs angestoßen worden. Die dolomitschen Bindemittelanteile reagierten in dem schwefelsauren Feuchtigkeitsmilieu u.a. zu Magnesiumsulfat. Dabei handelt es sich um ein sehr bauschädliches Salz, da es bereits im Luftfeuchtewechsel im Porenraum häufigen Kristallisations- bzw. Lösungs-

prozessen unterliegt, die ihrerseits zu einer Auflockerung des Gesteinsgefüges führen.

Die stark in Mitleidenschaft gezogenen Felsreliefs wurden zwischen 1995 und 1999 in einem Modellprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) restauriert. Der Schwerpunkt lag dabei in der Sicherung und dem Erhalt der Substanz. Die zwölf Reliefs wurden weitestgehend flächendeckend mit Kieselsäureestern u.a. über die Infusionsmethode gefestigt (Bild 2). Mit speziell entwickelten Steinerfüllmörteln (SEM) konnten anschließend Sicherungen an absturzgefährdeten Teilen des Reliefs vorgenommen werden. Auch ein Salzspeichermörtel kam zum Einsatz. Die Erhaltungsarbeiten wurden 1998 mit dem Peter Parler-Preis ausgezeichnet.



Bild 2: Festigung mittels Infusionstechnik am Bildfeld 3, Herzog Christian [2]

Nach Beendigung der Restaurierungsarbeiten hatte man einen Pflegeplan erstellt. Die Pflegearbeiten finanzieren sich seit dem Jahr 2000 aus zwei Stiftungen, die von der Deutschen Stiftung Denkmalschutz verwaltet werden. Hauptaufgaben dieses Monitorings sind die fortwährende Eindämmung der angrenzenden Vegetation, Reinigung der Reliefs, Kontrolle und Reparatur der Mörtelantragungen, Prüfen der Festigkeit und gegebenenfalls Nachfestigungen und Farbreuschen. Trotz der Verbesserung der Umweltbedingungen sind die Reliefs weiterhin ständig Umwelteinflüssen ausgesetzt, die einerseits aus der exponierten Lage an der Wetterseite des Weinberges, aber auch durch Feuchteströme im Hang hervorgerufen werden.

4 Aktueller Zustand

Das Steinerne Album war im Zeitraum 2008-2010 Bestandteil des bundesweiten Forschungsprojektes der DBU: Steindenkmäler im Einfluss anthropogener Umweltverschmutzung - Entwicklung von Methoden und Kriterien zur Langzeitkontrolle von Verwitterung und Konservierung. In dem Zusammenhang wurden der Zustand der Reliefs sowie insbesondere die Nachhaltigkeit der durchgeführten Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen in diesem natürlichen Umfeld mit einer standardisierten Methodik des Natursteinmonitorings überprüft. [3]

Neben den fachkundigen optisch-haptischen Bewertungen (Kartierung), die über die Jahre des Monitorings durch den Restaurator Peter Fiedler zur Verfügung gestellt worden sind, konnte im Rahmen dieses Projektes mittels verschiedener naturwissenschaftlicher Methoden die Wirksamkeit der Maßnahmen und der Erhaltungszustand der Oberflächen objektiv festgestellt werden.

Zum Zeitpunkt dieser Betrachtung konnten insbesondere in den unteren Bereichen der gefährdeten Reliefs stärkeres Absanden in Kombination mit einer massiven Salzbelastung sowie eine Schuppen- und untergeordnet Schalenbildungen beobachtet werden. In diesen gefährdeten Bereichen stehen Antragsmörtel immer wieder hohl (Bild 3). Die Salzspeichermörtel weisen auf den Oberflächen häufig deutliche Ausblühungen auf, ein Umstand, der auf die Erschöpfung des zur Verfügung stehenden Porenraums rückschließen lässt.

Durch den glücklichen Umstand, dass die Reliefs einem regelmäßigen Monitoring unterliegen, konnte vermieden werden, dass der Schadensverlauf und damit der Verlust an originaler Bildinformation nach der Restaurierung wieder extrem fortschreiten. Allerdings sind die jährlichen finanziellen Mittel so begrenzt, dass im Wesentlichen der Grünschnitt und die Begutachtung ausgewählter Reliefs erfolgen können. Für Nachfestigungen oder weitreichende Mörtelausbesserungen sind die zur Verfügung stehenden Gelder tatsächlich nicht ausreichend. Aufgrund der natürlichen Umgebung des Kunstwerkes ist erfahrungsgemäß der Schadensverlauf nur äußerst schwer zu verlangsamen. Aufgrund der besonderen Situation der Reliefs im anstehenden Gestein hat sich mittlerweile ein erheblicher neuerlicher Restaurierungsbedarf ergeben, der mit den jährlich zur Verfügung stehenden treuhänderischen

Stiftungsmitteln keinesfalls zu realisieren ist. Daher werden dringend Fördermittel benötigt, um einen nachhaltigen Fortbestand der Bildfelder realisieren zu können.



Bild 3: Aktuelle Schäden wie hohl liegende Antragsmörtel (oben) und Salzpustel auf absandenden Flächen (unten)

5 Ausblick

Im Zusammenhang mit den umfangreichen Restaurierungsarbeiten in den 1990er Jahren und auch im Rahmen des jährlich ausgeführten Monitorings wurden keine Salzreduktionsmaßnahmen vollzogen. Hauptgrund für die damalige Entscheidung gegen eine Minimierung der Salzfracht im Porenraum war vor allem der postulierte Nachtransport von löslichen Bestandteilen aus dem Hintergrund der Reliefs, die eine Salzreduktion fragwürdig erscheinen ließen. Mittlerweile sind die Erfahrungen auf dem Gebiet der Salzreduktion von Natursteinen jedoch deutlich voran geschritten, so dass eine erneute umfassende Restaurierung und Konservierung auf

der Basis eines oder mehrerer Salzreduktionszyklen hinsichtlich der Nachhaltigkeit der Maßnahmen vielversprechend ist. In Vorbereitung dessen sollten mit Hilfe drahtloser, minimal invasiver Sensoren das tatsächliche Reservoir an löslichen Bestandteilen in der Tiefe des anstehenden Gesteins und deren Bewegung in Abhängigkeit der Durchfeuchtung des Felsens und des Außenklimas geklärt werden.

Abgesehen von der Tatsache, dass zur Erhaltung aller Reliefs eine Optimierung der Herangehensweise bei der Restaurierung notwendig ist, gelten die Bildfelder Herzog Christian, Hochzeit zu Kana, Lots Berausung und das brennende Sodom, Christus in der Kelter und Noah als erster Weinbauer als besonders gefährdet. In Folge einer Salzreduktion im zumindest oberflächennahen Bereich, sind erneute Festigungen der betroffenen Bereiche mit KSE-Produkten und Mörtel hinterfüllungen unbedingt notwendig. Auch die Wiederherstellung von Bildetails durch einen geeigneten Steinerfüllmörtel zur Verbesserung der Erkennbarkeit steht weiterhin als erforderliche Maßnahme an.

Seit kurzer Zeit wird der Weinberg, an dessen Fuß die Reliefs stehen, wieder genutzt. Der Einfluss der Bewirtschaftung auf die Schadensdynamik im Gestein, insbesondere mit Hinblick auf den Einsatz von Düngemitteln, muss geklärt werden. Im Zusammenhang mit der Wiederaufreibung sind allerdings auch alle Trockenmauern auf dem Weinberg instandgesetzt worden, so dass eine Verschmutzung der Bildreliefs durch herablaufende Erde eingedämmt werden konnte.

6 Literaturreferenzen

- [1] Quelle des Photos: Peter Fiedler
- [2] Quelle des Photos: Peter Fiedler
- [3] Auras, M., Meinhardt, J. Snethlage, R.: Leitfaden Naturstein-Monitoring, Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2010

Autorin

Meinhardt, Jeannine

Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK), Domplatz 3, 06108 Halle/Saale, Tel. 0345-47225722, meinhardt@idk-denkmal.de, www.idk-denkmal.de

1995-2000 Studium der Geologie/Paläontologie an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

2001-2003 Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Zentrallabor des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege

2003-2004 Mitarbeit im Retreatability Project, Getty Conservation Institute, Los Angeles

03/2004 - 04/2004 Forschungsaufenthalt am Getty Conservation Institute, Los Angeles

2006 Promotion zum Thema Wiederbehandlung von Sandsteinen

seit 2005 wissenschaftliche Mitarbeiterin im IDK

DBU-Forschungsprojekt – Raumklimastabilität zum Erhalt der Wandmalereien in der Kirche St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau

Harald Garrecht, Simone Reeb

Abstract: Im Rahmen des DBU-Forschungsvorhabens wird die Wechselwirkung zwischen Raumklima und Wandmalerei unter Berücksichtigung der objektspezifischen Dynamik sich ändernder Raumklimate modellhaft untersucht. Hierbei sind die sich aus der Witterung, aus der Nutzung, aus dem Betrieb der haustechnischen Anlagen wie auch aus dem Tourismus ergebenden Beanspruchungen in Form experimenteller, theoretischer und numerischer Untersuchungen herauszuarbeiten, um so die Anforderungen an eine für die Schadensvermeidung präventive Raumklimastabilisierung zu erarbeiten.

Keywords: UNESCO Weltkulturerbe, anthropogene Umwelteinflüsse, Wandmalerei, Schimmel, Formänderung, Klimastabilität

1 Einleitung

Wandmalereien sind ohne Frage komplexe Verbundsysteme, deren Verfallserscheinungen sowohl systemimmanente Parametern als auch äußeren Einflüssen unterliegen. Für die Bewertung von Zerfallsprozessen reichen die Kenntnisse der komplexen Materialität von Mauerwerk, Putzen, Maltechnik sowie die der dynamischen Prozesse physikalischer, chemischer und mikrobieller Art aber nicht aus. Vielmehr bedarf es der Vernetzung der verschiedenen Daten und Mechanismen, um die komplexen Wechselwirkungen zu verstehen [1]. So liegt die Hauptursache der Schädigung von Wandmalereien in chemischen, klimatischen, bauphysikalischen und biologischen Mechanismen begründet, deren Schädigungspotenzial nur mit Kenntnis der zeitveränderlichen Materialfeuchteverteilung im betreffenden malereitragenden Bauteil und nur mit Kenntnis der sich im Nahfeld der Wandmalerei über den Tages- und Jahresverlauf einstellenden Klimaverhältnisse zutreffend einschätzen lassen. So wurden bereits vor etwa 25 Jahren im BMFT-Projekt "Wandmalerei-Schäden" [2] umfangreiche Untersuchungen zur Dynamik von Pilzwachstum und Schädigung durch Salzphasenwechsel vorgenommen, da

sowohl die Mikroorganismen wie auch lösliche Salze bei der Zerstörung von Wandmalereien eine entscheidende Rolle spielen. Seither widmen sich wissenschaftliche Untersuchungen der Frage, bei welchen Feuchte- und Temperaturverhältnissen sich eine schädigende Besiedelung oder Kristallisation einstellt und welche Bedeutung Frost-Tauwechsellvorgänge in den oberflächennahen Malschichten für den Schadensprozess haben. Nicht zuletzt wurden auch die Einflüsse der Wechselwirkung zwischen Klima und Besucher von historischen Räumen erkannt sowie der Belastung von Wandmalereien durch Immissionen und Schmutzeintrag nachgegangen.

In diesen Projektstudien zur Schädigung von Wandmalereien wurde recht schnell die Erkenntnis gewonnen, dass nachhaltige Konzepte in der Konservierung von Wandmalereien nur durch Klimastabilisierungen zu erreichen sind. 2004 wurde daher auf der Insel Reichenau eine erste Tagung von ICOMOS veranstaltet, die sich dem Thema der Klimastabilisierung widmete und Forschungen zu entsprechenden physikalischen Konzepten in den Fokus stellte [3, 4]. Themen waren raumklimatische Untersuchungen und klimatische Auswirkungen von Besucherströmen auf die Erhaltung von Kultur-

denkmalen, Möglichkeiten der Besucherlenkung und die damit einhergehenden Versuche, den klimatisch bedingten Schädigungsprozessen durch Klimatisierung, Einhausung, Klimaregulierung, Schutzverglasungen und vielen anderen Maßnahmen entgegen zu treten. In jüngeren, auch europäisch angelegten Forschungsinitiativen, wurden neben den bekannten grundlegenden Untersuchungen zur Wechselwirkung von Witterung und Raumklima mit dem Material und damit auch der Wandmalerei zunehmend auch Werkzeuge der numerischen Simulation zur Analyse des hygrothermischen Bauteilverhaltens mittels FEM (Finite Element Methode) sowie zur Analyse von Raumluftrömungen mittels CFD-Softwareprogrammen (Computational Fluid Dynamics) eingesetzt. Durch die Koppelung von experimentellen Studien mit numerischen Berechnungsverfahren, mit denen sich die realen Vorgänge unter Annahme diverser Vereinfachungen vergleichsweise gut abbilden lassen, gelingt es heute, die Risiken von Bauteilsituationen meist hinreichend genau einzuschätzen. Zudem lassen sich all jene Maßnahmen identifizieren, mit denen einer Schadensbildung vorgebeugt werden kann. Des Weiteren wurden in den zurückliegenden Jahren die Methoden des Bauteil- und Klimamonitorings immer weiter verbessert, so dass es heute mit modernen Sensorsystemen ohne Probleme möglich ist, die Klimaverhältnisse an der Wandmalerei wie auch die wärme- und feuchtetechnischen Zustände im jeweiligen Umfeld aufzuzeichnen. Allerdings wurden bislang nur vereinzelt Konzepte entwickelt und umgesetzt, mit denen durch eine direkte Beeinflussung der Raumklimate solche Randbedingungen im Umfeld der Wandmalerei sichergestellt werden, die eine weitere Schädigung ausschließen. Ferner wurden bislang Forschungen, in denen die Einflüsse der sich dynamisch ändernden Klimaverhältnisse auf das Formänderungsbestreben der oberflächennahen Materialschichten, also der Wandmalerei, nur vereinzelt vorgenommen. Doch stellen neben den Schadenspotenzialen durch Salze und Pilze auch die sorptionsbedingten Formänderungen der besonders feuchtesensitiven Materialien, wie diese für die meisten organischen Bindemittel der Malerei gegeben ist, ein erhebliches Gefährdungspotenzial für die Malerei dar.

2 Motivation

Sind Räume ständig einer hohen Feuchtelast unterworfen, können an historischen Wandmalereien

verschiedenartigste Schadensmechanismen ausgelöst werden, die vielfach anthropogen verursacht sind. Als anthropogene Ursachen lassen sich die nachfolgenden Aspekte benennen:

- **Material**
Bereits die Auswahl der Materialien bei Herstellung des Malgrundes und der Malschichten, d.h. deren feuchtetechnischen Eigenschaften und deren Kompatibilität, hat einen erheblichen Einfluss auf die Schädigungsprozesse infolge hoher Feuchtlasten.
- **Erhaltungs- oder Restaurierungsmaßnahmen**
Wurden an einer Wandmalerei bereits Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen vorgenommen, ist davon auszugehen, dass neue Materialien den Malschichten zugeführt wurden, die einen erheblichen Einfluss auf die feuchtetechnischen Eigenschaften des Materials haben können. Mögliche Unverträglichkeiten dieser Materialien mit den originalen Malschichten und der Einfluss hoher Raumluftheuchte können zu großen mechanischen Beanspruchungen der oberflächennahen Malschichten führen.
- **Feuchtelast im Mauerwerk**
Herrschen in Räumen fortwährend hohe relative Raumluftheuchten vor, so ist die Wandmalerei insbesondere dann stark beansprucht, wenn auch rückseitig im Malgrund eine hohe Feuchtelast vorherrscht. In erdberührtem Gründungsmauerwerk z.B. bestimmen Sicker-, Hang-, Stau- oder Grundwasser die Feuchteverhältnisse im Bauteil. In luftumspülten Mauerwerksbereichen dagegen sind es sowohl Witterung, Schlagregen, Spritz- und Oberflächenwässer als auch die raumklimatischen Verhältnisse, die Feuchtelast bzw. -verteilung in einer aufgehenden Wand bestimmen.
- **Biogene Besiedelung**
Enthalten die im Zuge von Erhaltungs- und Restaurierungsmaßnahmen eingesetzten Konservierungsmaterialien organische Komponenten, besteht die Möglichkeit, dass hohe Raumluftheuchten zu einer Auskeimung von Sporen und zum Wachstum von Pilzmyzelen führen, da die organischen Stoffe den Organismen als Nährstoff dienen. Dies gilt auch für Stäube, die sich an den konservierten oder originalen Malereien anlagern. Zudem bewirkt das biogene Wachstum an der Maleroberfläche eine Anreicherung stoffwechselbedingter Schadstoffe.

- **Salzbelastung**
Salze, die im Umfeld der Bauwerke häufig anthropogen dem Bauwerk zugeführt werden, haben einen erheblichen Einfluss auf den Feuchtezustand der Materialschichten, die abhängig der raumseitigen Feuchterandbedingungen in stetem Wechsel auskristallisieren und wieder in Lösung gehen. Infolge der mit dem Phasenwechsel verbundenen Volumenveränderungen geht eine hohe Beanspruchung der oberflächennahen Malschichten einher, die meist eine rasche Schädigung der Malerei zur Folge haben.
- **Nutzung**
Mit der Nutzung historischer Räume malereitragender Oberflächen geht vielfach eine Wärmeconditionierung der Räume einher, so dass sich kurzfristige sorptionsbedingte Materialfeuchtegehaltsänderungen an den Oberflächen einstellen. Diese führen zu Volumenänderungen in Form von Schwind- und Quellverformungen und somit häufig zu Spannungszuständen, die Abhängig von der Häufigkeit und Ausprägung der Formänderungen eine Schädigung der Malerei zur Folge haben können.

Für die Konservierung bzw. Restaurierung von Wandmalereien stellt sich folglich die Frage, inwieweit eine Beeinflussung der Raumklimaverhältnisse zu einer Verringerung des Stresses an bzw. in den oberflächennahen Materialschichten führt und ob sich mit derartigen Maßnahmen eine Schädigung vermeiden lässt. Bei all diesen Überlegungen ist es erforderlich, dass alle Einwirkungen auf die Malerei sorgfältig erfasst und bewertet werden. So sind die Einflüsse aus Witterung, Raumnutzung, Tourismus und Heizbetrieb ebenso zu berücksichtigen, wie die aus aufsteigender Feuchte und Schlagregen resultierenden hohen Feuchtelasten im Mauerwerksinneren. Nur mit Kenntnis aller Einwirkungen wie auch der Widerstandsfähigkeit der Wandmalereien ist es möglich, die Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit von Maßnahmen zur Konservierung bzw. Restaurierung zutreffend einzuschätzen, so dass deren Umsetzung auch zum gewünschten Erfolg führt.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es daher, die Wechselwirkung zwischen Raumklima und Wandmalerei unter Berücksichtigung der objektspezifischen Dynamik sich ändernder Raumklimate modellhaft zu untersuchen.

3 St. Georg in Oberzell

Die Kirche St. Georg auf der Bodenseeeinsel Reichenau verfügt über die bedeutendsten Wandmalereien des frühen Mittelalters nördlich der Alpen. So findet sich an den Hochschiffwänden des Langhauses ein einzigartiger Wandmalereizyklus aus der zweiten Hälfte des 10. Jahrhunderts, der als herausragendes Zeugnis einer ganzen Epoche gilt (Bild 1).

Die Wandmalereien blicken auf eine wechselvolle Geschichte zurück, bei der die erste Übermalung des Mittelschiffzykluses im 14. Jahrhundert erfolgte. Weitere Veränderungen folgten in jeder Epoche geschmacksorientiert, bis hin zu einer barocken Ausgestaltung der Kirche. Die wechselvolle Geschichte der Restaurierungen von St. Georg beginnt mit der Entdeckung und Freilegung der Wandmalereien ab 1879 [5, 6]. Bei der Freilegung kam es zu erheblichen Malschichtverlusten und vor allem zu Schichtvermischungen zwischen dem Bestand der Erstaussmalung, dem der gotischen Überarbeitung und nachfolgenden Fassungsresten.

1889 begannen die Vorbereitungen zu einer Restaurierung und Neukonzeption, die 1892 abgeschlossen war. Der Kunstmaler Carl Ph. Schilling erhielt den Auftrag zur Anfertigung von Kopien in Form von Bildtapeten, die man vor den Originalen anbrachte. Bei Bedarf ließen sich die Tapeten hochziehen und gaben den Blick auf den Malereibestand frei. Der mit den Kopien entstandene Kontrast zum Umfeld wurde durch eine komplette Übermalung ausgeglichen. Dies betraf die gesamte rahmende Ornamentik, die Mäander, die Obergadenzone, deren Apostel von Schilling völlig neu gestaltet wurden sowie den Vierungsbogen einschließlich der Laibung. Eine Neugestaltung erfuhren weiterhin die Arkadenbögen, die Kapitelle und die Fensterlaibungen des 18. Jahrhunderts.

Eine veränderte Denkmalauffassung führte zu einer Neukonzeption und zu einer "Restaurierung" in den Jahren 1921/22. Mit dem Entfernen der Bildtapeten sah man sich nun wiederum einem kontrastreichen Bestand konfrontiert, die Bildszenen im Zustand der Freilegung, übersät mit Tüncheresten und sichtbaren Mörtelergänzungen verschiedener Phasen sowie Freilegeschäden, das Umfeld in einem optisch völlig geschlossenen Zustand. Eine einfache Methode sollte die Einheit des Bestandes "wiederherstellen".



Bild 1: Blick aus dem Chor in das Kirchenschiff

Die in Leimfarbe ausgeführten Übermalungen von Schilling ließen sich soweit durch Abrieb reduzieren, dass sie einen gealterten Zustand vortäuschen konnten. Innerhalb der Bildbereiche kam das umgekehrte Verfahren zur Anwendung. Hier halfen Nachkonturierungen und farbliche Ergänzungen.

Das Wesentliche der Restaurierungskonzeption von 1921/22 lag in der großflächigen Rückführung auf einen angenommenen Originalzustand, dem die als geschmacklerisch empfundenen Kopien hatten weichen müssen. Die Überarbeitungen von Schilling, die vor den Eingriffen der Restaurierung von 1921/22 zweifelsfrei als Übermalungen erkennbar waren, vermischten sich durch ihre Abpatinierung mit dem Altbestand. "Original" und Ergänzungen waren zunehmend schwer zu unterscheiden. Zutaten wie die von Mezger vorgenommenen Nachkonturierungen und Lasuren haben zur weiteren Verunklärung des Bestandes beigetragen. Das gegenüber dem Konzept des 19. Jahrhunderts völlig andere Erscheinungsbild sollte vor allem dem Betrachter wieder das Gefühl für das eigentliche Alter der gesamten Ausstattung suggerieren.

In den Jahren 1982 bis 1990 erfolgte eine umfassende Bestandsaufnahme und Restaurierung. Zusätzlich begann zu dieser Zeit die systematische Erfassung des Raumklimas in der Kirche und der Krypta mittels Thermohygrographen. Seither werden regelmäßige Wartungen vorgenommen, um so frühzeitig einer erneuten Schädigung entgegen treten zu können. Bereits 2003 mussten, bedingt durch einen aufgetretenen Schimmelbefall, erneut

dringende Konservierungsmaßnahmen sowie die Reinigung der Oberflächen durchgeführt werden. Ab dem Jahr 2003 erfolgte dann auch eine Intensivierung der Klimamessungen mit Hilfe von 16 Datenloggern zur Erfassung des Raumklimas in verschiedenen Bereichen des Kirchenschiffs. Als Folge dieses erneuten Schimmelbefalls wurde im Jahr 2004 ein Be- und Entlüftungssystem installiert und zeitweise auch das Konzept der Besucherlenkung aufgegriffen. Im Zuge der letzten Wartung und Reinigung im Jahr 2011 erfolgte auch der Einbau eines noch umfangreicheren Klimamonitoringsystems. Mit diesem werden seither kontinuierlich die Raum- und Nahfeldklimaverhältnisse in allen Raumbereichen der Kirche aufgezeichnet, um in Verbindung mit den Statusinformationen zur Stellung von Fenstern, Türen wie auch zum Betrieb der in der Kirche installierten Sitzbankheizung die feuchtebedingte Beanspruchung des einzigartigen Wandmalereizyklus erfassen und bewerten zu können. Mit dem 2011 in Betrieb genommenen Monitoring können somit nicht nur die Feuchtelasten, wie sie durch die stets sehr hohe Raumluftfeuchte oder überlagernder Tauwasserereignisse, erfasst und bewertet werden, sondern die aktuell installierte Messeinrichtung erlaubt auch, die Folgen des direkten Sonneneintrags über die Obergadenfenster, wie auch die Einflüsse kirchlicher Veranstaltungen und des Tourismusbetriebes auf die Nahfeldbeanspruchung der Wandmalereien zu analysieren.

Auch wenn mit den zurückliegenden Maßnahmen der Konservierung und Restaurierung, denen umfangreiche restauratorische und naturwissenschaftliche Untersuchungen und Forschungen zugrunde liegen, der Zustand der ottonischen Wandmalereien zunächst gesichert werden konnte, wurde deutlich, dass der Schädigungsprozess auch künftig weiter voran schreitet. Zwar konnten im Zuge der bisherigen Untersuchungen zahlreiche Erkenntnisse gewonnen werden, die zur Klärung der für die Schädigung verantwortlichen Mechanismen beitragen, doch ist unstrittig die Sicherstellung stabiler Raumluftverhältnisse zwingend erforderlich, soll der weiteren Schädigung der Malereien wirksam entgegen getreten werden.

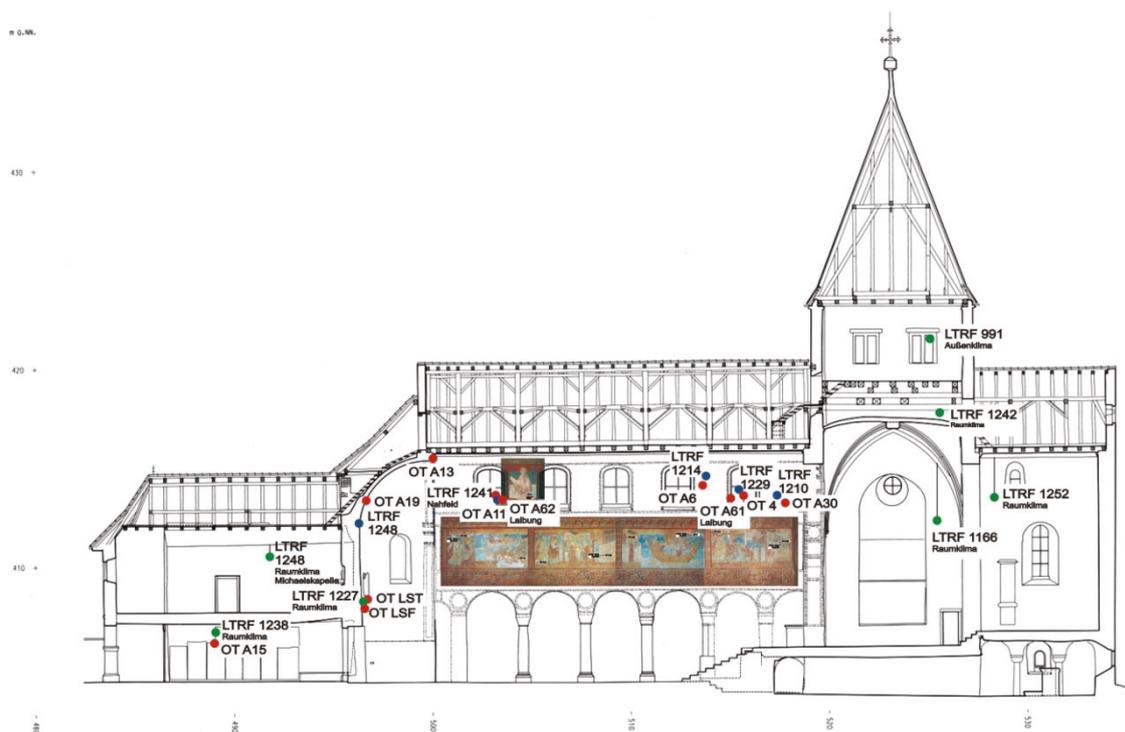


Bild 2: Sensorpositionen an der Nordwand

4 Untersuchungs- und Maßnahmenkonzept

Die Schaffung stabiler Raumklimaverhältnisse setzt voraus, dass zunächst ein Zielkorridor zu definieren ist, innerhalb dessen sich die Raumluftfeuchte und die Raumtemperatur im Nahfeld der Wandmalerei im Tages- und Jahresverlauf bewegen sollte.

Doch fehlen bisher Kenntnisse darüber, wie das feuchtebedingte Verhalten der in den Malschichten zu findenden Materialien zutreffend charakterisiert werden kann. Schließlich ist es unerlässlich, für die extrem feuchte Umgebung der Malerei das hygrometrische Verhalten der anorganischen und organischen Materialien zuverlässig einschätzen zu können, sollen Klimakorridore benannt werden, innerhalb deren eine weitere Gefährdung der Malschichten weitestgehend ausgeschlossen werden kann. Doch gerade die Vielfalt der in Malschichten und im Malgrund zu findenden organischen und anorganischen Materialien, die teils noch in ursprünglichem und teils im Zuge einer vorausgegangenen Konservierung hinzugekommen sind, erschweren die Festlegung geeigneter Klimakorridore. Schließlich ist dem Aktivitätspotenzial der Pilze, die bislang maßgeblich zur Schädigung des Wandmale-

reizzyklus in der Kirche wie auch der originalen Befunde in der Krypta beigetragen haben, wirksam zu entgegnen.

Andererseits sind chemische und physikalische Veränderungen im Vorfeld zu berücksichtigen, die sich mit einer deutlichen Verschiebung des heutigen Klimazustands einstellen würden. Infolge hoher Raumluftfeuchten und häufiger Tauwasserereignisse, wie sie mit den vorliegenden Klimamessdaten belegt werden können (Bild 3), haben zur Folge, dass sich in den oberflächennahen Materialschichten hohe sorptionsbedingte Feuchtezustände vorfinden, so dass davon auszugehen ist, dass eine große Menge gelöster Stoffe im feuchteangereicherten Porenraum der Materialien eingelagert ist.

Wird das Raumklima durch heute technisch leicht realisierbare Maßnahmen verschoben, können sich abhängig der neu auf der Raumseite geschaffenen Klimarandbedingungen die gelösten Anionen und Kationen in unterschiedlichster Form zusammenschließen und in Form komplexer Salzmischungen auskristallisieren. Abhängig der hiermit einhergehenden Volumenexpansion muss dann mit neuen Schadensformen gerechnet werden, die es zwingend zu unterbinden gilt. Dies gilt insbesondere für die feuchtebelastete Krypta und die unter Geländeneiveau liegenden Putzflächen.

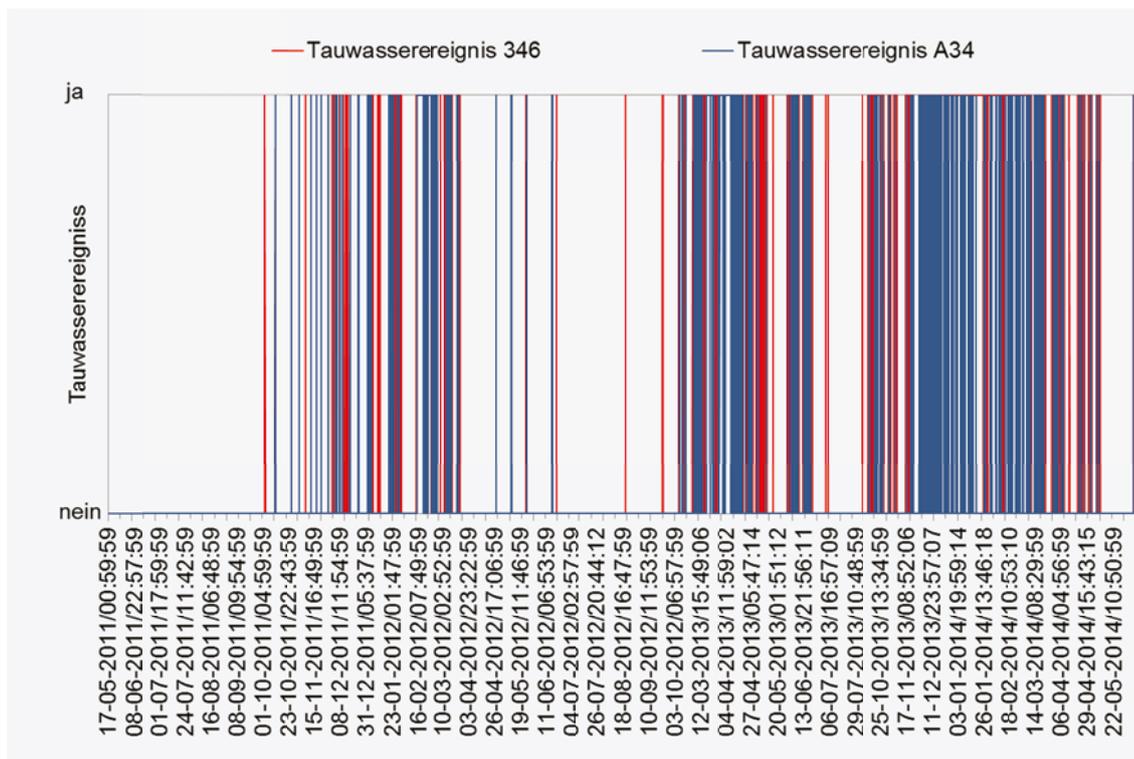


Bild 3: Tauwasserereignisse an der Nordwand

Unabhängig der Probleme gelöster Stoffe gehen bei einer Einflussnahme auf die raumseitigen Raumluftfeuchteverhältnisse sorptionsbedingte Feuchtezustandsänderungen in den organischen und anorganischen der Malschichten und des Malgrunds einher, die zwangsläufig physikalisch bedingt ein Formänderungsstreben des jeweiligen Materials zur Folge hat. So weist jedes Material abhängig seiner Bindungsart, abhängig seiner stofflichen Zusammensetzung und abhängig seiner Mikrostruktur ein spezifisches hygri-sches Formänderungsbestreben auf. Bekanntlich führt dies im Falle einer Feuchteabgabe zum Schwinden. Die Feuchtezunahme bewirkt demgegenüber ein Quellen. Das stoffspezifische Formänderungsbestreben, das sich bei den in den Malschichten und im Malgrund zu findenden organischen und anorganischen Materialien sehr stark unterscheidet, bewirkt somit ein verschiedenartiges, stoffspezifisches Formänderungsverhalten. Bereits auf Mikrostrukturebene werden so in der Wandmalerei Eigenspannungszustände erzeugt, die abhängig der Interaktion von Pigment und Bindemittel innerhalb der Malschicht, die abhängig der Kleb- und Verbundwirkung zwischen den einzeln aufgetragenen oder auch später ergänzten Malschichten und die auch abhängig des Verbunds zwischen Malerei und Malgrund komplexe Zwangsbeanspruchungen zur Folge haben können. Auf-

grund stetig wiederkehrender Klimaänderungen, wie sie abhängig von Witterung, Nutzung und Betrieb der Kirche bislang beobachtet werden konnten, ist somit zwangsläufig eine allmähliche Ermüdung der Malschichten die Folge, die damit neben der Schimmel- und Salzproblematik ursächlich für die Schädigung der Wandmalerei durch Ablösungen, Absandungen, Rissbildungen etc. ist.

Mit dem im Forschungsvorhaben angedachten Untersuchungsprogramm sollen exemplarisch für die komplexen Verhältnisse der Wandmalereien in der Kirche St. Georg all jene Maßnahmen erprobt und validiert werden, mit denen die Widerstandsfähigkeit der noch originalen bzw. der bereits konservierten Malschichten unter Berücksichtigung der am Bauwerk gegebenen Einwirkungen analysiert und bewertet werden kann. Hierzu wurden entsprechende Arbeitspakete konzipiert, deren Inhalt im Folgenden kurz erläutert wird:

Grundlagenermittlung:

Das Arbeitsprogramm für die Grundlagenermittlung ist in vier wesentliche Abschnitte untergliedert. Hierzu gehört im ersten Schritt die Analyse und Aufbereitung bereits vorhandener, aber noch nicht ausgewerteter Daten, wie sie im Rahmen der bisherigen Untersuchungen seit 1982 gewonnen wurden,

um die im Zusammenhang mit den anthropogenen Einflüssen verbundenen Beanspruchungen und Schadensformen zu erfassen und zu bewerten. Im zweiten Schritt sollen dann die Folgen dauerfeuchter Umgebungsverhältnisse bzw. die Folgen von Klimawechselverhältnissen auf die malereitragenden Oberflächen analysiert werden. Daran angegliedert werden Untersuchungen zum anthropogenen Einfluss durch Nutzung/Tourismus auf das Raumklima einschließlich der Analyse möglicher Schadstoffbelastungen auf den Verschmutzungsgrad der Wandmalereien. Die Überprüfung des Einflusses einer kontrollierten und bedarfsabhängigen Belüftung und Wärmebereitstellung in der Krypta und der Kirche zur Klimastabilisierung im Sinne einer präventiven Raumkonditionierung bilden den Abschluss der Grundlagenermittlung.

Präventive Klimastabilisierung:

Das Arbeitspaket der präventiven Klimastabilisierung umfasst die Optimierung der Raumluftzustände in der Krypta und der Kirche. Hierzu werden die geeigneten Klimaparameter aus bereits archivierten Daten, thermisch-hygrisch gekoppelten Simulationsberechnungen und mittels neuartiger innovativer Untersuchungsmethoden gewonnen Erkenntnisse herangezogen, so dass ein möglichst optimaler individuell auf die Problemstellung des jeweiligen Raumbereichs angepasster Klimakorridor für die Krypta und für die Kirche abgeleitet werden kann. Diesen Vorgaben folgend werden dann in einem weiteren Schritt all jene Maßnahmen identifiziert und umgesetzt, mit denen es auf denkmalgerechte, einfache und kostengünstige Weise möglich ist, das anzustrebende Raumklima herzustellen, um so einer weiteren Schädigung der Wandmalerei proaktiv und wirksam entgegen zu treten.

Validierung der installierten Maßnahmen und des problemangepassten Mess- und Regelkonzepts:

In diesem Arbeitspaket steht die interdisziplinäre Analyse der umgesetzten Maßnahmen im Fokus. Hierzu werden alle gemessenen Raum- und Nahfeldklimadaten über ein Web-Portal allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt und im Rahmen eines abschließenden Kontroll- und Wartungstermins vor Ort der Zustand der Wandmalereien bewertet und mit den zur Verfügung stehenden Daten und Untersuchungsergebnissen abgeglichen.

5 Ausblick

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf Untersuchungsmethoden, Monitoringsysteme, Maßnahmenkonzepte und präventive Raumkonditionierung könnte dann auch für viele vergleichbare Problemstellungen mit Wandmalereien in Krypten, Grotten und Katakomben in individuell abgewandelter Form adaptiert werden.

6 Literaturreferenzen

- [1] Dörthe Jakobs: Was bleibt? Was kommt? Heutige Konzepte und Desiderate der Forschung im Umgang mit feuchtebelasteten Räumen. In: Wandmalereien in Krypten, Grotten, Katakomben. Zur Konservierung gefasster Oberflächen in umweltgeschädigten Räumen (ICOMOS Hefte des Deutschen Nationalkomitees, Bd. LVI), Internat. Tagung des Deutschen Nationalkomitees von ICOMOS 2011, München 2013, S. S. 213-224.
- [2] Forschungsprojekt Wandmalerei-Schäden. Ein Förderprojekt des Bundesministeriums für Forschung und Technologie. Schlussbericht zu den interdisziplinären Befunden (= Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, 11), Hannover 1994.
- [3] Dörthe Jakobs / Matthias Exner (Hg.), Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte. Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pflege des Weltkulturerbes (ICOMOS Hefte des Deutschen Nationalkomitees, Bd. XLII), München 2005.
- [4] Harald Garrecht, Raumklimatische Untersuchungen und bauphysikalische Konzepte. Forschungsergebnisse zur Klimaproblematik im Kloster Maulbronn und im Dom zu Speyer. In: Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte. Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pflege des Weltkulturerbes (ICOMOS Hefte des Deutschen Nationalkomitees, Bd. XLII), München 2005, S. 9-18.
- [5] Dörthe Jakobs, Sankt Georg in Reichenau-Oberzell. Der Bau und seine Ausstattung, 3 Bände (Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalpflege in Baden-Württemberg 9), Stuttgart 1999.
- [6] Dörthe Jakobs, Restaurierungskonzepte für die Wandmalereien von St. Georg in Rei-

chenau-Oberzell. In: Die Restaurierung der Restaurierung? Zum Umgang mit Wandmalereien und Architekturfassungen des Mittelalters im 19. und 20. Jahrhundert; hg. von M. Exner und U. Schädler-Saub (ICOMOS Hefte des Deutschen Nationalkomitees XXXVII), München 2002, S. 39-48.

Autoren

- Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht
Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Pfaffenwaldring 4, 70569 Stuttgart, Tel. 0711/685-63323, harald.garrecht@iwb.uni-stuttgart.de, www.iwb.uni-stuttgart.de
 - 1985: Diplomabschluss Bauingenieurwesen an der Universität Karlsruhe
1985 – 1992: Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Karlsruhe am Institut für Massivbau u. Baustofftechnologie
1992: Promotion zum Wärme- und Feuchteverhalten poröser Bauteile mit und ohne Salzbefrachtung
1992 – 1998: Oberingenieur in der Abteilung Baustofftechnologie des o.g Instituts
1999 – 2004: Wissenschaftlicher Direktor des Instituts für Angewandte Forschung an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
2002 – 2006: Wissenschaftlicher Leiter der Öffentlichen Baustoffprüfstelle an der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
2006 – 2012: Professur an der Technische Universität Darmstadt; Leitung des Fachgebiets Werkstoffe im Bauwesen; Lehrgebiete Werkstoffe im Bauwesen, Bauphysik, Bauwerkserhaltung, Bauklimatik
seit 2012: Professur an der Universität Stuttgart am Institut Werkstoffe im Bauwesen
seit 2012: Geschäftsführender Direktor der MPA Stuttgart (Otto-Graf-Institut (FMPA))
- Dipl.-Ing. Simone Reeb MBA
Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Pfaffenwaldring 4, 70569 Stuttgart, Tel. 0711/685-62786 simone.reeb@iwb.uni-stuttgart.de, www.iwb.uni-stuttgart.de
 - 2006: Diplomabschluss Bauingenieurwesen an der Hochschule Karlsruhe
2007: Masterdegree Baumanagement an der Hochschule Karlsruhe
2006 – 2007: Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Hochschule Karlsruhe
2008 – 2012: Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Technischen Universität Darmstadt
seit 2012: Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Stuttgart

