

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 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.

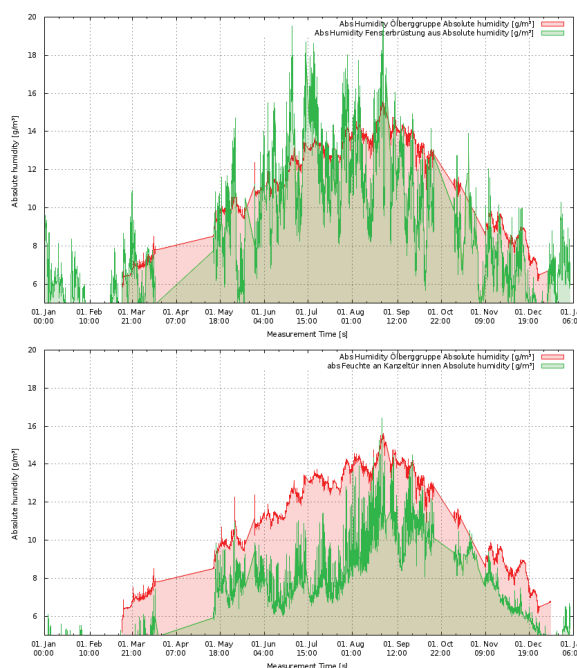


Bild 2 Absolute Feuchte an verschiedenen Messstellen 2012 (Außenklima sowie Nahfeldklima an Ölberggruppe und Kanzeltürwand)

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.

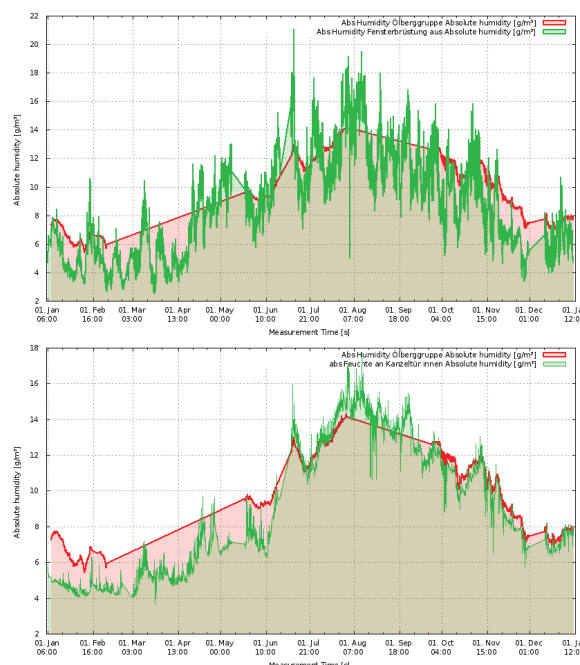


Bild 3 Absolute Feuchte an verschiedenen Messstellen 2013 (Außenklima sowie Nahfeldklima an Ölberggruppe und Kanzeltürwand)

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).

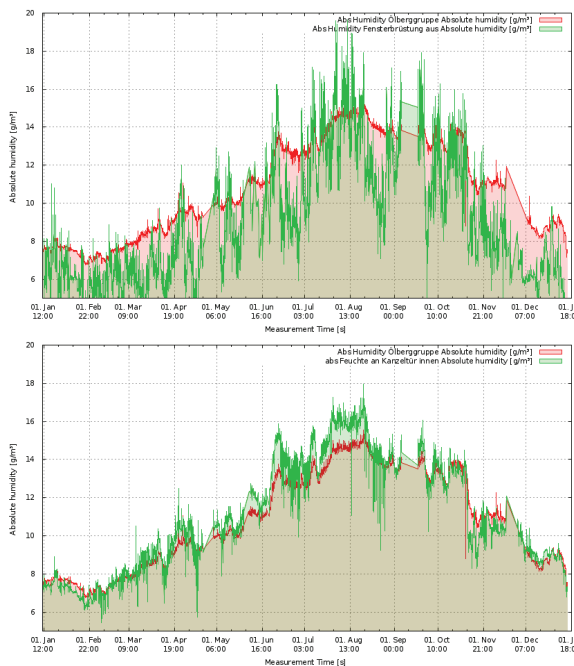


Bild 4 Absolute Feuchte an verschiedenen Messstellen 2014 (Außenklima sowie Nahfeldklima an Ölberggruppe und Kanzeltürwand)

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 Staubbablagerungen 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.

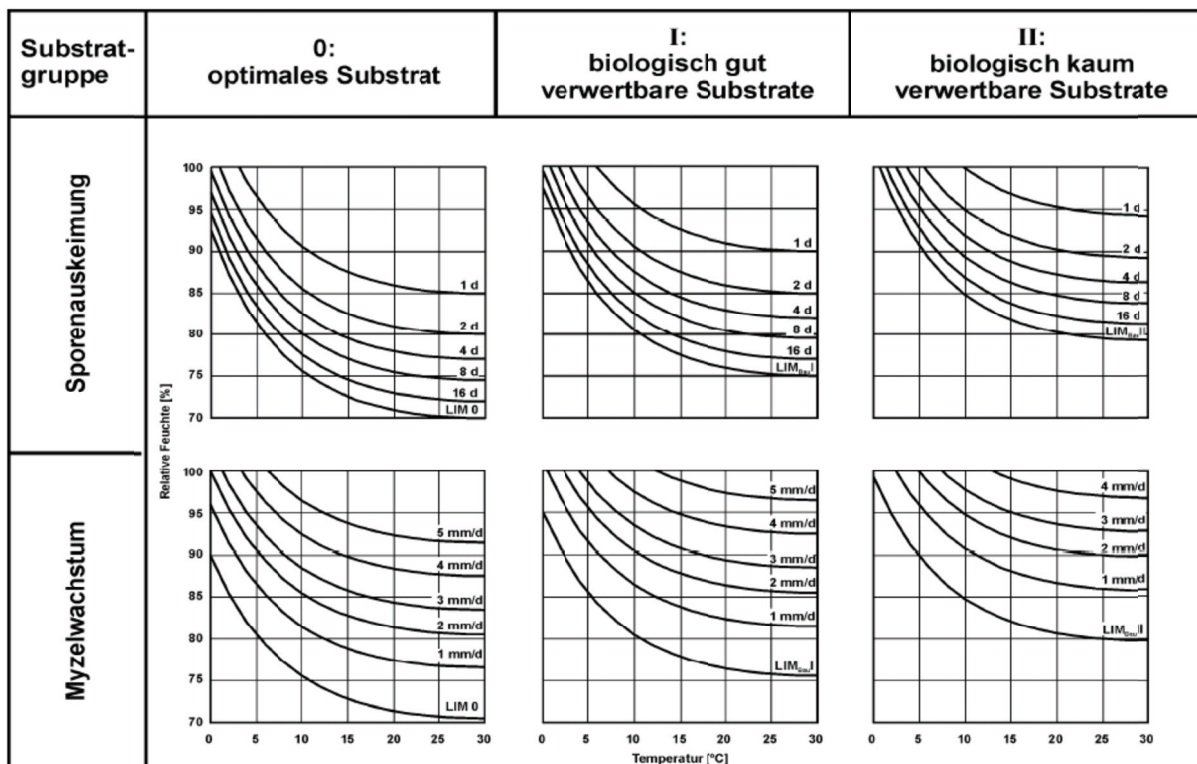


Bild 5 Verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung bzw. Myzelwachstum für übliche am Bau auftretende Pilze (aus: WTA Merkblatt 6-3-08/D: Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos).

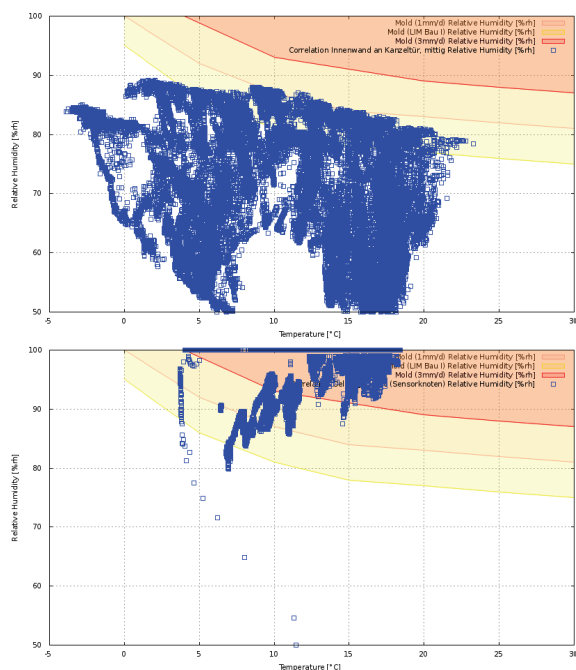


Bild 6 RF/T-Diagramm Nahfeldklima für den Bereich Kanzeltürwand innen (oben) und Ölberggruppe (unten) im Jahr 2012

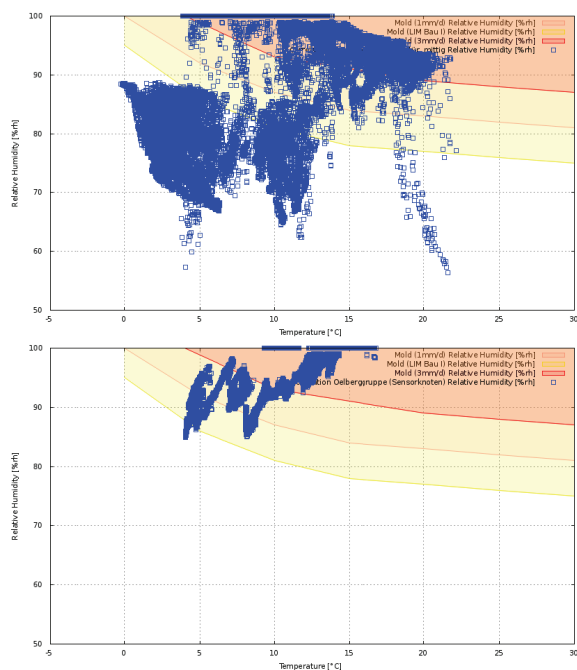


Bild 7 RF/T-Diagramm Nahfeldklima für den Bereich Kanzeltürwand innen (oben) und Ölberggruppe (unten) im Jahr 2013

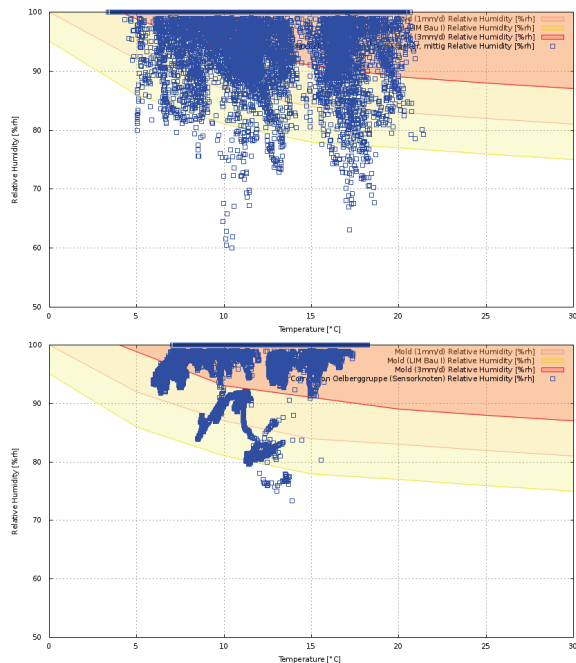


Bild 8 RF/T-Diagramm Nahfeldklima für den Bereich Kanzeltürwand innen (oben) und Ölberggruppe (unten) im Jahr 2014

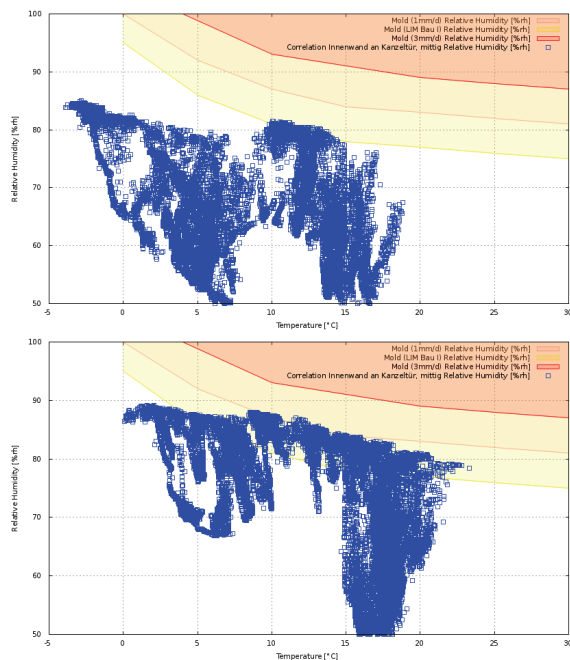


Bild 9 RF/T-Diagramm Nahfeldklima für den Bereich Kanzeltürwand innen (oben 1. Jahreshälfte 2012, unten 2. Jahreshälfte 2012)

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).

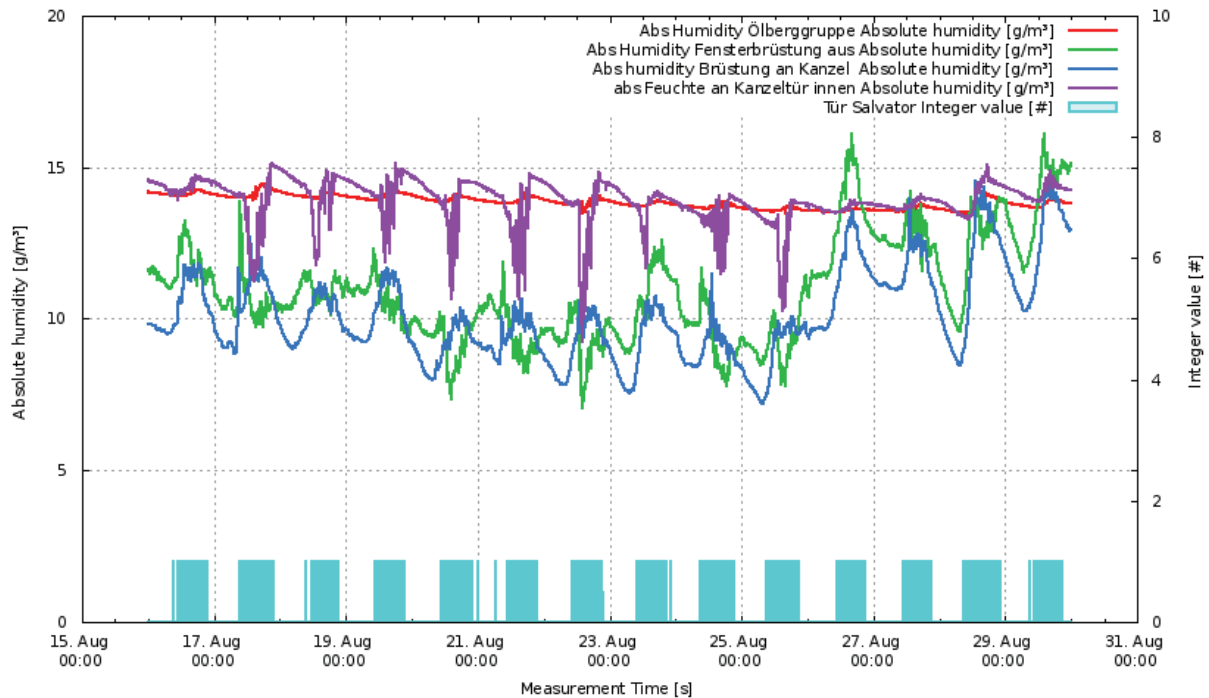


Bild 10 Absolute Luftfeuchtegehalte verschiedener Sensoren und Zeiten der Türöffnung (16.08.2014 bis 30.08.2014)

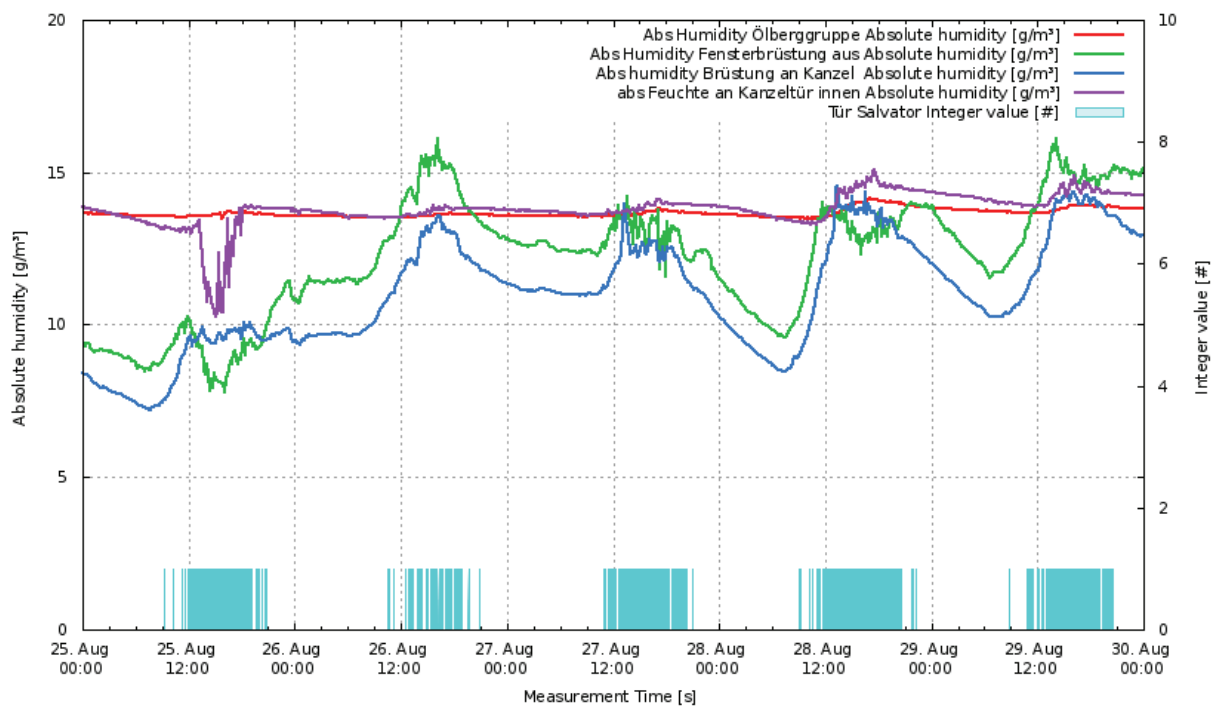


Bild 11 Absolute Luftfeuchtegehalte verschiedener Sensoren und Zeiten der Türöffnung (25.08.2014 bis 30.08.2014)

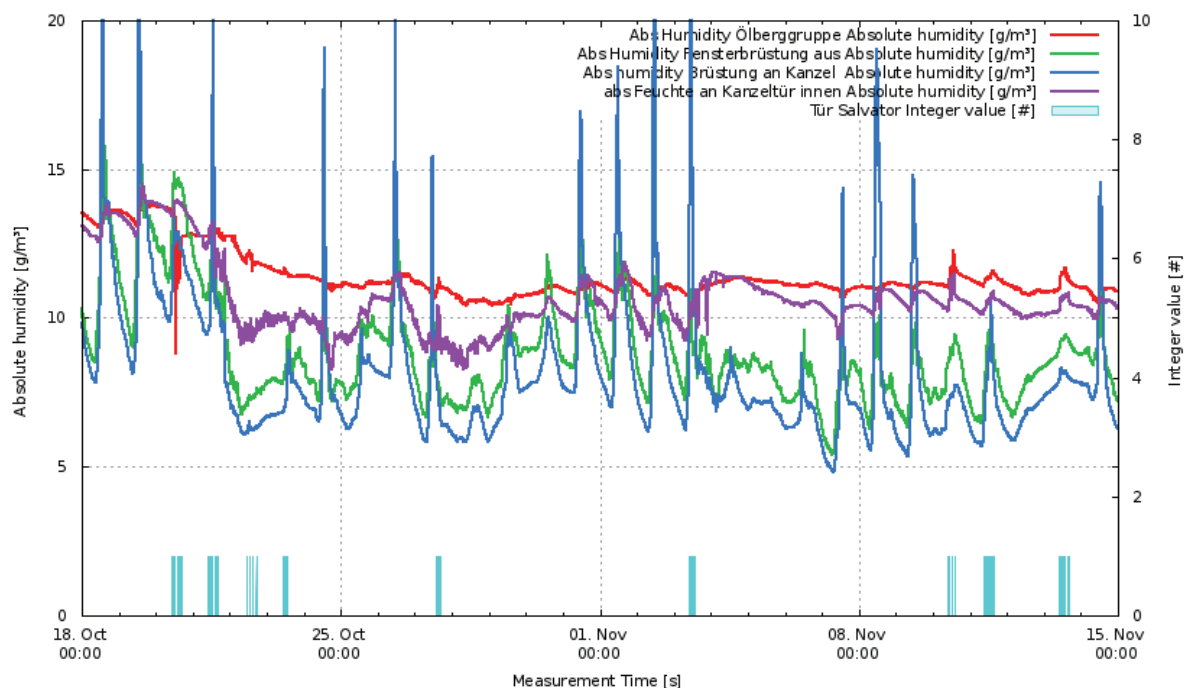


Bild 12 Absolute Luftfeuchtegehalte verschiedener Sensoren und Zeiten der Türöffnung (18.10.2014 bis 15.11.2014)

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 Schimmelbildung. Eine einvernehmliche Lösung zur Minimierung beider Probleme bzw. Risiken gibt es vor diesem Hintergrund nicht.

In Anbetracht der Schimmelbildung 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 Schimmelbildung 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 verwerten. 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.

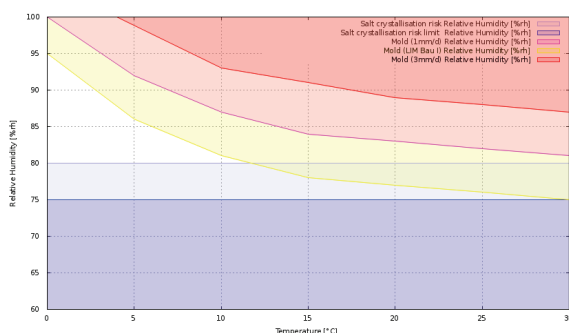


Bild 13 Risikozonen und präferierter Zielbereiche für das Innenraumklima.

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 Salzzakkumulation in den oberflächennahen Steinbereichen. Daher ist mit weiterem Materialverlust zu rechnen, wenn nicht der Salzzakkumulation 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 Salzzakkumulation 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.

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 Stubsandstein 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

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,