Salze im historischen Natursteinmauerwerk

IFS-Tagung 2002

Bericht Nr. 14 - 2002

INSTITUT FÜR
STEINKONSERVIERUNG

Von den Autoren/innen und dem IFS autorisierte e-Publikation

Mainz, 29.05.2012

Institut für Steinkonservierung e. V.

www.ifs-mainz.de
info@ifs-mainz.de

INSTITUT FÜR STEINKONSERVIERUNG E.V.

Gemeinsame Einrichtung der staatlichen Denkmalpflege
Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen

Salze im historischen Natursteinmauerwerk

Aktuelles zu Herkunft, Schadenswirkung und Restaurierungsmaßnahmen

IFS-Tagung 2002

Bericht Nr. 14 - 2002

Große Langgasse 29 · 55116 Mainz · Tel.(06131)2016-500 · Fax(06131)2016-555 · eMail: ifs.mainz@t-online.de
Vorstand: Prof. Dr. Wolfgang Brönner · Dipl.-Ing. Johann-Peter Lüth · Dr. Werner von Trützschler · Dr. Gerd Weiß

Redaktion:
Karin Kraus, IFS

Herausgeber und Vertrieb:
INSTITUT FÜR STEINKONSERVIERUNG E.V. (IFS)
Große Langgasse 29
55116 Mainz
Telefon: (06131) 20 16 500
Telefax: (06131) 20 16 555
eMail: ifs.mainz@t-online.de

© IFS Mainz 2002

ISSN 0945-4748

Inhalt

Vorwort

Michael Steiger
Andreas Behlen
Utz Wiese
Immissionsbelastung durch salzbildende Stoffe und Wirkung auf mineralische Baustoffe 1

Karin Kraus
Lösliche Alkalisalze in neuen Mörteln (Bestimmung, Gehalte, Bewertung, Untersuchungsbedarf und erste Ergebnisse) 11

Steffen Laue
Verwitterung von Naturstein durch lösliche Salze an wechselfeuchter Luft 19

Hans Werner Zier
Untersuchungen zur Salzbelastung – Analysenmethoden, Bewertung, Grenzwerte 31

Michael Auras
Gabi Melisa
Kompressenentsalzung – Wirkungsweise, Materialien, Anwendung, Fallbeispiele 41

Horst Schuh
Putz- und Fugenmörtel für salzbelastetes Mauerwerk, ein Praxisbericht 53

Lothar Goretzki
Jan Wiedemann
Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Sanierputzen WTA am Beispiel der Schlossanlage Oberschleißheim (Wilhelmshof) 59

Petra Egloffstein
Verschiedene Putzsysteme für das salzbelastete Mauerwerk der evangelischen Kirche in Wommen 69

Uwe Kalisch
Der Einfluss von Raumklimaschwankungen auf Ausstattungs- und Raumoberflächen 75

Literaturliste zum Thema Salze im Natursteinmauerwerk (Auszug aus IFS-Bibliothek) 81

Autorinnen und Autoren

Dr. Michael Auras
Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz

Dr. Andreas Behlen
Institut für Allgemeine und Angewandte Chemie, Universität Hamburg

Dr. Lothar Goretzki
Fachbereich Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar

Dr. Petra Egloffstein
Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz

Dipl. Ing. Uwe Kalisch
Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Halle

Dr. Karin Kraus
Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz

Gabi Melisa
Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz

Dr. Steffen Laue
Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Dresden

Dr. Horst Schuh
Labor für Erforschung und Begutachtung umweltbedingter Gebäudeschäden, München

Dr. Michael Steiger
Institut für Allgemeine und Angewandte Chemie, Universität Hamburg

Jan Wiedemann
Fachbereich Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar

Dr. Utz Wiese
Institut für Allgemeine und Angewandte Chemie, Universität Hamburg

Dr. Hans-Werner Zier
Materialforschungs- und Prüfanstalt, Weimar

Vorwort

Salze sind keineswegs nur unerwünschte, weiße Ausblühungen, sondern eine der Hauptursachen für die Zerstörung der Naturstein- und Mörteloberflächen an unseren Baudenkmälern.

Die bauschädlichen Salze können unterschiedlicher Herkunft sein: Sie können aus dem Boden, aus der Luft, durch Streusalz, durch die Nutzung oder durch ungeeignete Restaurierungsmaterialien in die Baustoffe eingetragen werden, sie können durch Reaktionen von Luftschadstoffen oder biologischen Stoffwechselprodukten mit Baustoffbestandteilen gebildet werden oder sie können in den historischen Baustoffen selbst enthalten sein.

Salze im historischen Natursteinmauerwerk lautet das Thema der am 25. April 2002 vom Institut für Steinkonservierung e.V. in Mainz veranstalteten Tagung. Der vorliegende Bericht Nr. 14 enthält die gehaltenen Vorträge.

Bei der Auswahl der Beiträge standen die baupraktischen Aspekte beim Umgang mit bauschädlichen Salzen am historischen Bauwerk im Vordergrund. Die meisten Vorträge befassen sich deshalb mit den für die Maßnahmenplanung wichtigen naturwissenschaftlichen Voruntersuchungen und mit den möglichen Restaurierungsmaterialien und -methoden.

Zu Beginn stehen allerdings zwei Beiträge mit grundlegenden Themen. Es wird über aktuelle Ergebnisse zur Herkunft der bauschädlichen Salze berichtet und dabei jeweils auf vieldiskutierte Fragestellungen eingegangen: Die Wirkung der Luftinhaltstoffe auf unsere Bausubstanz und der damit verbundene Salzeintrag sowie die Salzbelastung neuer Mörtel.

Bei den Vorträgen über naturwissenschaftliche Voruntersuchungen geht es um die systematische Schadensaufnahme sowie um Probleme bei der Analyse und Bewertung der leicht wasserlöslichen und damit sehr mobilen Salze.

Gemeinsames Thema der sich daran anschließenden Vorträge sind Erfahrungen mit Materialien und Methoden bei der Restaurierung historischer, salzbelasteter Mauerwerksoberflächen.

Dazu gehören die in letzter Zeit viel untersuchten und erfolgreich eingesetzten temporären Kompressenmaterialien zur Entsalzung von Oberflächen im Vorfeld weiterer stein- oder putzkonservatorischer Maßnahmen.

In mehreren Beiträgen wird dann darauf eingegangen, welche Mörtelsysteme bei salzbelasteten Natursteinmauerwerk verwendet werden können. Gerade diese Vorträge sollen die Aufmerksamkeit aller an der Entscheidung über Restaurierungsmaßnahmen Beteiligten darauf lenken, dass am historischen, oft denkmalgeschützen Bauwerk nicht nur Kenntnisse über die Materialien an sich, sondern auch über die Auswirkungen ihrer Verwendung auf andere Bauwerksabschnitte unerlässlich sind.

Eine weitere, wichtige Methode im Umgang mit bauschädlichen Salzen ist die Reduzierung der Ausblühungen durch eine Kontrolle des Klimas. Auch darauf wird in einem Beitrag eingegangen.

Mit der Tagung möchte das Institut für Steinkonservierung e.V. den Dialog zwischen Wissenschaftlern, Denkmalpflegern, Materialherstellern, Anwendern und Planern über den sachgerechten Umgang mit salzbelastetem, denkmalgeschützten Natursteinmauerwerk fördern und intensivieren.

Michael Steiger, Andreas Behlen und Utz Wiese

Immissionsbelastung durch salzbildende Stoffe und Wirkung auf mineralische Baustoffe

Einleitung

Bei der Verwitterung poröser Baustoffe wie Werksteine, Ziegel, Terrakotta, Beton, Putz und Mörtel wird üblicherweise zwischen chemischen und physikalischen Verwitterungsmechanismen unterschieden. Unter chemischer Verwitterung versteht man die Auflösung oder Umwandlung der mineralischen Bestandteile eines Baustoffes durch chemische Reaktionen. Die physikalische Verwitterung schließt alle Prozesse ein, durch die eine mechanische Beanspruchung entweder des Gefüges, also im mikroskopischen Bereich, oder aber ganzer Konstruktionen verursacht wird. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher chemischer und physikalischer Verwitterungsprozesse, die zu erheblichen Schäden an porösen Baustoffen führen können. Ebenso vielfältig sind die an Baustoffen zu beobachtenden Verwitterungsformen (FITZNER *et al*. 1995). Allerdings ist es fast nie möglich, eine bestimmte Verwitterungsform einem bestimmten Schadensmechanismus zuzuordnen. Beispielsweise kann das Absanden von Natursteinen sowohl durch eine chemische Reaktion wie durch Frostsprengung oder auch einer Vielzahl anderer Prozesse verursacht sein. Umgekehrt kann sich ein einzelner Schadensprozess bei unterschiedlichen Materialien in gänzlich verschiedenen Schadensbildern äußern. Es ist deshalb in der Regel nicht möglich, die Schadensursachen allein auf Grundlage einer visueller Bewertung des Schadensbildes zu identifizieren. Darüber hinaus ist bei der Untersuchung von Schadensursachen und aktuellem Schadenszustand eines Bauwerks immer zu unterscheiden zwischen den im Lauf der Jahrhunderte durch das Zusammenspiel verschiedener Verwitterungsprozesse bereits eingetretenen Schäden und den heute tatsächlichen ablaufenden Schadensprozessen. Um die Bedeutung einzelner Schadenprozesse und ihrer aktuellen Raten abzuschätzen, ist deshalb ein detailliertes Verständnis der grundlegenden Mechanismen unverzichtbar.

In diesem Beitrag soll die Rolle von Luftschadstoffen bei der Verwitterung mineralischer Baustoffe genauer betrachtet werden. Spätestens seit der zunehmenden Verwendung des Brennstoffs Kohle an Stelle von Holz wurde auch über mögliche schädliche Auswirkungen auf die Umwelt diskutiert (vgl. BRIMBLECOMBE 1987, BRIMBLECOMBE und RODHE 1988). Bereits im 13. Jahrhundert wurde Kohle bei bestimmten industriellen Prozessen als Brennstoff verwendet und Anfang des 17. Jahrhunderts begann man mit der breiten Verwendung von Kohle zur Beheizung von Wohnhäusern. Seit dieser Zeit war man sich über die schädliche Wirkung der Verbrennungsprodukte bewusst. Beispielsweise schrieb John Evelyn bereits 1661 über die Stadt London und ihre Luftverschmutzung (BRIMBLECOMBE und RODHE 1988, GREENWOOD und EARNSHAW 1990):

"...Dieser verderbliche Rauch ist es, der ihre Glorie beschmutzt, einen Schleier wie ein Tuch über all das Gute legt, der alle bewegliche Habe verdirbt, der das Blech, die Vergoldungen und die Möbel ermatten lässt und sogar Eisenstangen und den härtesten Stein mit diesen stechenden, scharfen Dämpfen zernagt, die aus dem Schwefel kommen..."

Bereits im 17. Jahrhundert wurde also die Luftverschmutzung als Verursacher der Gesteinsverwitterung beschrieben. Dennoch wurde bis kürzlich die Wirkung von Luftschadstoffen durchaus kontrovers diskutiert (vgl. RIEDERER 1973, LUCKAT 1973, KÜNZEL 1987). Heute allerdings gilt als gesichert, dass Luftschadstoffe einen der wichtigsten Verwitterungsfaktoren darstellen und zu einer erheblichen Beschleunigung natürlicher Verwitterungsprozesse geführt haben. Zusammenfassende Darstellungen der Wirkung verschiedener Luftschadstoffe bei der Gesteinsverwitterung finden sich bei FASSINA (1988), BUTLIN (1991) und STEIGER (2002). Im Einzelfall sind die zugrundeliegenden Schadensmechanismen komplex, so dass es schwierig ist, Verwitterungsraten im Vergleich zu anderen Schadensprozessen abzuschätzen. Im Sinne der obigen Klassifizierung von Schadensmechanismen wirken Luftschadstoffe auf zweierlei Weise. Zunächst werden durch Schadstoffe chemische Verwitterungsprozesse ausgelöst, die zu einer direkten Schädigung mineralischer Baustoffe führen. Sekundäre Schadensprozesse, die als physikalische Verwitterungsprozesse anzusehen sind, resultieren aus der Anreicherung von Luftschadstoffen und ihren Reaktionsprodukten in porösen Materialien.

Seit einigen Jahren sinken die Konzentrationen einiger verwitterungsrelevanter Luftschadstoffe kontinuierlich, während andere Luftinhaltsstoffe in unveränderter Konzentration vorliegen, so dass Natursteinbauwerke heute einem anderen Schadstoffspektrum ausgesetzt sind als noch vor zwanzig Jahren. Vor diesem Hintergrund stellt sich insbesondere die Frage, mit welchen aktuellen Verwitterungsraten heute und in Zukunft zu rechnen ist.

Chemische Verwitterung und Salzanreicherung

Die chemische Verwitterung von Baustoffen basiert auf dem Angriff der mineralischen Komponenten durch Wasser und darin gelöster Säuren. Der Angriff von sau-

ren Wässern führt letztlich zur Auflösung von Mineralen und zur Bildung von Verwitterungsprodukten. Einige verbreitete, für die Gesteinsverwitterung relevante Reaktionen sind im Folgenden beispielhaft aufgeführt:

$$CaCO_3 + 2\ H^+ \rightarrow Ca^{2+} + CO_2 + H_2O \quad (1)$$

$$2\ KAlSi_3O_8 + 2\ H^+ + 9\ H_2O \rightarrow 2\ K^+ + Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 4\ H_4SiO_4^0 \quad (2)$$

$$Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8 + 10\ H^+ \rightarrow 5\ Mg^{2+} + Al_2Si_2O_5(OH)_4 + H_4SiO_4 + 5\ H_2O \quad (3)$$

Generell führt der Angriff von Säure (H^+-Ionen) zu einer Mobilisierung von Metallkationen aus den Mineralbestandteilen des Baustoffs. Die wichtigsten Kationen, die bei der Verwitterung der in Naturwerksteinen häufig anzutreffenden Minerale freigesetzt werden, sind in Tab. 1 zusammengefasst. Insbesondere die Carbonatminerale Calcit ($CaCO_3$) und Dolomit ($CaMg(CO_3)_2$) werden durch Säuren gemäß Reaktion (1) leicht angegriffen und führen zur Freisetzung von Ca^{2+} und Mg^{2+}. Aber auch die Silicate unterliegen der chemischen Verwitterung (DREVER 1994, STUMM und WOLLAST 1990, LASAGA *et al*. 1994), wie in den Reaktionen (2) und (3) am Beispiel eines Kaliumfeldspats ($KAlSi_3O_8$) und des Tonminerals Chlorit ($Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8$) dargestellt ist. Bei der Verwitterung der Silicate werden ebenfalls Kationen freigesetzt (vgl. Tab. 1), daneben treten allerdings auch Mineralneubildungen auf, z. B. die Bildung von Kaolinit ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) wie in den Reaktionen (2) und (3). Obwohl die Verwitterungsraten der Silicate deutlich kleiner sind als die der Carbonatminerale, konnten MAUSFELD und GRASSEGGER (1994) durch petrographische und chemische Analysen die Verwitterung von Feldspäten und Tonmineralen an historischen Bauwerken belegen. Die Mobilisierung von Metallkationen konnte durch Analyse von ablaufendem Regenwasser sowohl für Granit als auch für verschiedene Sandsteine nachgewiesen werden (HANEEF et al. 1993, STEIGER und DANNECKER 1994).

Kohlendioxid ist als wichtigste Quelle für den Säuregehalt natürlicher, anthropogen nicht beeinflusster Wässer zu betrachten. In geologischen Zeiträumen ist CO_2 die für die Gesteinsverwitterung bedeutendste Säure. Die Löslichkeit der Carbonatminerale in Gegenwart von CO_2 basiert auf folgendem Gleichgewicht:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3 + H_2O \quad (4)$$

Mineral	Zusammensetzung (idealisiert)	freigesetzte Kationen
Carbonatminerale:		
Calcit	$CaCO_3$	Ca^{2+}
Dolomit	$CaMg(CO_3)_2$	Ca^{2+}, Mg^{2+}
Feldspäte:		
Plagioklas	$Na_xCa_{1-x}\ Al_{2-x}Si_{2+x}O_8$	Na^+, Ca^{2+}
Mikroklin (K-Feldspat)	$KAlSi_3O_8$	K^+
Tonminerale:		
Biotit	$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$	K^+, Mg^{2+}
Chlorit	$Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8$	Mg^{2+}

Die Löslichkeit von Calcit in Regenwasser auf Grund dieser Reaktion ist ca. vier mal höher als in reinem Wasser. Auch bei Abwesenheit sonstiger Säuren findet also durch Beregnung eine kontinuierliche Mobilisierung statt, die man als Karst-Effekt bezeichnet. Dies führt an historischen Kalksteinbauwerken in den beregneten, typischerweise weißgewaschenen Bereichen zu merklichen Rückwitterungen, die sich beispielsweise an Skulpturen aus Kalkstein als deutlicher Konturenverlust feststellen lassen. Im Vergleich zu den Carbonatmineralen ist die Löslichkeit der Silicate in natürlichen, mit atmosphärischem CO_2 in Gleichgewicht befindlichen Wässern deutlich geringer, so dass vergleichbare Mobilisierungs- und Rückwitterungseffekte wie bei Kalksteinen nicht beobachtet werden. Allerdings weist DREVER (1994) darauf hin, dass auch vergleichsweise geringe Lösungsraten dann zu einer merklichen Schädigung auch silicatischer Gesteine führen, wenn der lösende Angriffe im Bereich der Kornkontakte erfolgt.

Der natürliche Säuregehalt des Regenwassers aufgrund des atmosphärischen Kohlendioxids wird jedoch durch anthropogene Beiträge zur sauren Deposition weit übertroffen. Unter saurer Deposition wird hier sowohl der Säureeintrag auf Materialien durch Niederschläge, die nasse Deposition, als auch der direkte Eintrag von gasförmigen oder partikelförmigen Schadstoffen auf Materialoberflächen (trockene Deposition) verstanden. Die Chemie der sauren Deposition ist eng mit der atmosphärischen Chemie von Schwefeldioxid (SO_2) und den Stickstoffoxiden (NO, NO_2) verknüpft (SCHWARTZ 1989). Dies hat zur Folge, dass sowohl die nasse als auch die trockene Deposition ganz überwiegend zur Bildung und Anreicherung von Sulfat und Nitrat in Natursteinen führen, so dass diese beiden Anionen die bei weitem bedeutendsten Gegenionen für die bei der chemischen Verwitterung freigesetzten Kationen darstellen. Die auf diese Weise gebildeten Alkali- und Erdalkalinitrate sind ausnahmslos sehr gut wasserlösliche Salze. Auch die Sulfate von Natrium, Kalium und Magnesium sind so gut wasserlöslich, dass davon auszugehen ist, dass diese Salze in porösen Baustoffen weitgehend mobil sind und in Abhängigkeit von Beregnungs-/Trocknungszyklen sowie bei Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit ständigen Phasenumwandlungsprozessen unterliegen. Dies führt zu sekundären Schadensprozessen durch Deposition von Luftschadstoffen. Der Schadensmechanismus der Verwitterung durch lösliche Salze wird an anderer Stelle in diesem Band ausführlich besprochen. Es soll an dieser Stelle lediglich darauf hingewiesen werden, dass diese Folgeprozesse natürlich nicht durch aktuelle Schadgaskonzentrationen beeinflusst werden. Sie stellen vielmehr das Ergebnis der langjährigen Einwirkung und Anreicherung von Schadstoffen dar. Keine noch so wirksame Maßnahme zur Verbesserung der Luftqualität vermag diesen Schadensprozess zu verlangsamen.

Im Gegensatz zu den bisher besprochenen leichtlöslichen Salzen sind Calciumsulfate ausgesprochen schwerlöslich. Sie sind deshalb in Baustoffen nur wenig

mobil und tendieren zu starker Anreicherung. Unter Bauwerksbedingungen ist in der Regel Gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) das stabilste Calciumsulfat. Gipskrusten sind auf Natursteinen historischer Bauwerke sehr weit verbreitet. Bereits früh wurde die Bildung von Gipskrusten auf Kalksteinen als das primäre Verwitterungsprodukt bei der Kalksteinverwitterung durch SO_2-Deposition beschrieben (KIESLINGER 1932, SCHAFFER 1932). Bei Kalksteinbauwerken zeigt sich der kombinierte Einfluss von nasser und trockener Deposition häufig sehr anschaulich. Während in regengeschützten Bauwerkspartien typischerweise starke Gipsanreicherungen in Form schwarzer Krusten zu beobachten sind, überwiegen bei stark regenexponierten Partien häufig sogenannte weißgewaschene Bereiche (CAMUFFO *et al*. 1982). Hier überwiegt trotz der schlechten Löslichkeit von Gips der reinigende Effekt von oberflächlich ablaufendem Regenwasser, das zu einer Verhinderung der Gipsanreicherung an der Gesteinsoberfläche führt.

Weniger palusibel erscheint zunächst die Bildung von Gipskrusten auf Sandsteinen. Aber auch auf nahezu carbonatfreien Sandsteinen und auf Granit werden häufig Gipskrusten beobachtet (WHALLEY *et al*. 1992, NEUMANN *et al*. 1993, SMITH *et al*. 1994). Bei diesen Gesteinen muss die Gipskrustenbildung also nach einem anderen Mechanismus ablaufen, da sowohl Sulfat als auch Calcium aus externen Quellen stammen. Die Gipsbildung erfolgt in diesem Fall also nicht als Produkt der chemischen Verwitterung des Natursteins. Als Calciumquelle kommen neben den Fugenmörteln, wo Gips durch SO_2-Deposition gebildet und in das angrenzende Gestein eingetragen wird, auch die Atmosphäre in Betracht, wie in Expositionsversuchen nachgewiesen werden konnte (STEIGER *et al* 1993). Die Bildung von Gipskrusten in Sandsteinen als Folge einer vollständigen Auffüllung des Porenraumes mit Gips führt letztlich zur völligen Gefügezerstörung (NEUMANN *et al*. 1993, 1994, 1997). Auch in diesem Fall beruht also der Schadensmechanismus nicht auf der unmittelbaren chemischen Verwitterung des Gesteins, sondern auf Folgeprozessen durch die Anreicherung von Luftschadstoffen.

Immissionsbelastung und saure Deposition

Aufgrund umfassender Emissionsminderungsmaßnahmen ist seit geraumer Zeit eine deutliche Verringerung der Immissionskonzentrationen einiger Schadstoffe zu beobachten. Insbesondere die Schwefeldioxid- und die Schwebstaubkonzentrationen sind stark rückläufig. Dies lässt sich leicht auf Grundlage der von den jeweils zuständigen Landesbehörden sowie dem Umweltbundesamt routinemäßig bestimmten Immissionskonzentrationen veranschaulichen (vgl. UBA 2002). Besonders dramatisch haben die SO_2-Konzentrationen in den neuen Bundesländern abgenommen. Während bis Anfang der 90er Jahre in großen Bereichen von Thüringen, Sachsen und Sachsen-Anhalt noch extrem hohe SO_2-Konzentrationen mit Jahresmittelwerten deutlich über 150 µg m^{-3} vorlagen, sind seit der zweiten Hälfte der 90er Jahre die SO_2-Konzentrationen auf das Niveau der alten Bundesländer gefallen (Jahresmittelwerte bundesweit < 25 µg m^{-3}).

Gänzlich unterschiedlich haben sich die Konzentrationen der Stickstoffoxide entwickelt. Zwar sind auch diese Konzentrationen rückläufig, die Abnahme ist jedoch deutlich weniger ausgeprägt als für SO_2. Auffällig ist insbesondere, dass die Unterschiede zwischen den alten und den neuen Bundesländern wesentlich geringer ausfallen, so dass bundesweit ein gleichermaßen leicht abnehmender Trend zu beobachten ist (vgl. UBA 2002). Zur Veranschaulichung sind in Abb. 1 Daten aus dem Hamburger Luftmessnetz für eine Station im Stadtzentrum von Hamburg zusammengestellt (HALM 2002). Deutlich zu erkennen ist, dass auch in Hamburg seit 1985 die SO_2-Konzentrationen immer noch stark abnehmen. Dieser abnehmende Trend ist bei den Stickoxiden deutlich geringer ausgeprägt, so dass inzwischen die Stickoxidkonzentrationen diejenigen des Schwefeldioxids weit übertreffen.

Eine Abschätzung des Einflusses dieser veränderten Immissionssituation auf die Raten chemischer Verwitterungsprozesse erfordert die Kenntnis von Depositionsraten sowohl für die nasse als auch für die trockene Deposition. Eine Zusammenfassung der relevanten luftchemischen und für den Säureeintrag in die Baustoffe historischer Gebäude relevanten Prozesse findet sich in STEIGER (2002).

Die gesamte Säuremenge, die durch nasse Deposition, also in Form von Niederschlägen, auf eine Baustoffoberfläche eingetragen wird, ergibt sich als Produkt aus der H^+-Ionen-Konzentration und dem Volumen des Niederschlagswassers, das auf der Baustoffoberfläche abgeschieden wird. Niederschläge, die auf Mauerwerksflächen treffen, werden als Schlagregen bezeichnet. Es gibt nur wenige Messungen der Schlagregenintensität an Gebäuden. Die verfügbaren Daten belegen aber, dass der Schlagregeneintrag in recht komplexer Weise

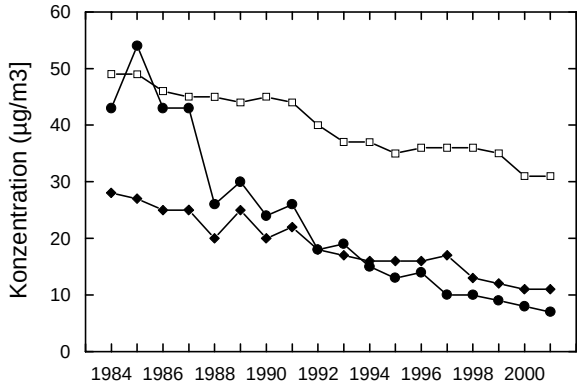


Abb. 1: Jahresmittelwerte von SO_2 (●) NO (◆) und NO_2 ( ) an einer Station im Zentrum von Hamburg seit 1984 (Daten aus dem Hamburger Luftmessnetz, HALM 2002)

nicht nur von Windrichtung und Windgeschwindigkeit sondern auch von den Umströmungsverhältnissen eines Bauwerks und somit von seiner Geometrie abhängig ist (vgl. KÜNZEL und SCHWARZ 1968, HELBIG 1972).

Einfache rechnerische Abschätzungen der Schlagregenintensität sind kaum möglich, so dass man in der Regel darauf angewiesen ist, die nasse Deposition von Säure experimentell zu bestimmen. Als nützliche experimentelle Methode hat sich die Untersuchung von oberflächlich ablaufendem Regenwasser erwiesen (z.B. REDDY 1988). Solche Experimente sind geeignet, den Einfluss von Karst-Verwitterung, saurem Regen und der trockenen Deposition saurer Schadgase getrennt zu erfassen. Bei Feldexperimenten in Ballungsräumen mit signifikanter Luftschadstoffbelastung wurde festgestellt, dass der Einfluss des sauren Regens gegenüber der trockenen Deposition von SO_2 nur von untergeordneter Bedeutung ist (ROEKENS UND VAN GRIEKEN 1989, LIVINGSTONE 1992, STEIGER *et al*. 1993). In ländlichen Reinluftgebieten, wo lokale Schadstoffemissionen ohne Bedeutung sind, kann der Beitrag der nassen Deposition allerdings nicht vernachlässigt werden (BEHLEN *et al*. 1997).

Aufgrund der rückläufigen Konzentrationen der sauren Vorläuferverbindungen unterliegt auch der Säuregehalt des Regens einem abnehmenden Trend. Beispielhaft sind in Abb. 2 die pH-Werte des Niederschlages an zwei Stationen in ländlichen Regionen aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes dargestellt. Die Zunahme des pH-Wertes von ca. 4.3 Anfang der 80er Jahre auf ca. 5 Ende der 90er Jahre entspricht einer ca. dreifachen Verringerung des Säuregehaltes im Regen. Unter der realistischen Annahme, dass sich im Mittel die gesamte Schlagregenmenge, der ein Bauwerk ausgesetzt ist, im Verlaufe auch langer Zeiträume nicht signifikant verändert, kann also gefolgert werden, dass sich die nasse Deposition von Säure in dem Maße verringert, wie sich der Säuregehalt im Niederschlagswasser verringert. Aus den Messdaten des Umweltbundesamtes geht weiterhin hervor, dass die Reduktion des Säuregehaltes hauptsächlich mit einer Verringerung der Sulfatkonzentration

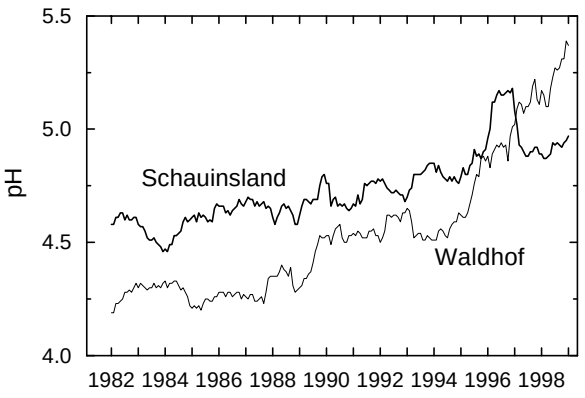


Abb. 2: pH-Werte des Niederschlages an zwei Stationen in ländlichen Regionen aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes (gleitende Jahresmittelwerte); Daten vom Umweltbundesamt.

im Regenwasser einhergeht. Dies ist in Übereinstimmung mit dem bereits bei den Immissionskonzentrationen der sauren Vorläuferverbindungen (SO_2, NO, NO_2) beobachteten Trend, und hat zur Folge, dass auch im Regenwasser inzwischen die Nitratkonzentration die Sulfatkonzentration deutlich übertrifft.

Unter der trockenen Deposition von Säuren bzw. säurebildenden Verbindungen versteht man ihre irreversible Abscheidung auf Natursteinoberflächen. Depositionsraten hängen deshalb sowohl von der Konzentration der atmosphärischen Schadgase als auch von ihrer Reaktivität gegenüber verschiedenen Natursteinen ab. Eine nützliche Größe für die Beschreibung der Reaktivität von Natursteinen gegenüber sauren Gasen ist die Depositionsgeschwindigkeit v_d. Sie ist definiert als das Verhältnis des Flusses F des Schadgases, d.h. der Schadstoffdeposition pro Oberflächeneinheit und Zeit, und der Umgebungskonzentration c des Schadgases in der Atmosphäre:

$$v_d = \frac{F}{c} \tag{5}$$

Aus Gleichung (5) folgt unmittelbar, dass der Fluss eines Schadstoffes F auf eine bestimmte Oberfläche als Produkt der Konzentration c des Schadstoffes und der Depositionsgeschwindigkeit v_d gegeben ist. Bei bekannter Depositionsgeschwindigkeit kann also der Eintrag eines Schadgases auf einen Baustoff für eine gegebene Schadstoffkonzentration berechnet werden. Allerdings ist die Depositionsgeschwindigkeit eine Größe, die durch viele unterschiedliche Parameter beeinflusst wird. Zunächst müssen Schadgase aus der freien Atmosphäre an ein Mauerwerk transportiert werden und durch die unmittelbar an die Materialoberfläche grenzende laminare Grenzschicht diffundieren. Sodann muss ein Stoffübergang entweder direkt an die festen Bestandteile des Baustoffes oder, was im Falle poröser Materialien wahrscheinlicher ist, in einen die Porenwände auskleidenden Feuchtefilm erfolgen. Anschließend finden chemische Reaktionen sowohl im Feuchtefilm als auch mit den mineralischen Bestandteilen des Baustoffes statt.

Im Falle der Deposition von SO_2 auf Gesteinsoberflächen wird davon ausgegangen (LIPFERT 1989), dass sich SO_2 zunächst in einem Wasserfilm auf den Mineraloberflächen auflöst und nach den beiden folgenden Reaktionen zunächst ein H^+-Ion freisetzt:

$$SO_2(g) + H_2O \rightarrow SO_2 \cdot H_2O \tag{6}$$

$$SO_2 \cdot H_2O \rightarrow H^+ + HSO_3^- \tag{7}$$

Es ist bekannt, dass S(IV) auf Gesteinsoberflächen leicht zu Sulfat (SO_4^{2-}) oxidiert wird. Als Oxidationsmittel kommen eine Reihe unterschiedlicher Verbindungen in Frage. Entscheidend ist, dass das bei der Oxidation zunächst gebildete HSO_4^--Ion ein weiteres H^+-Ion freisetzt, so dass also insgesamt pro deponiertem SO_2-Molekül zwei H^+-Ionen gebildet werden. Somit führt der Eintrag von SO_2 in den Feuchtefilm zu einer Absenkung des pH-Wertes und damit gemäß den Gleichgewichten (6) und (7) zu einer Verringerung der SO_2-Löslichkeit. Befindet sich also der Feuchtefilm auf einer inerten

Oberfläche, dann kommt die weitere SO_2-Aufnahme zum Erliegen, wenn sich die Gleichgewichte (6) und (7) eingestellt haben. Findet hingegen ein Säureangriff auf die Gesteinskomponenten gemäß der Reaktionen (1) – (3) statt, dann kann das Absinken des pH-Wertes abgepuffert werden und eine weitere SO_2-Aufnahme ist möglich. Es ist offensichtlich, dass die Depositionsgeschwindigkeit auf Gesteine von der Reaktivität der mineralischen Bestandteile des Gesteins abhängt. In Übereinstimmung mit dem vorgestellten Mechanismus werden die höchsten Depositionsgeschwindigkeiten von SO_2 für die reaktivsten Materialien Zement und Kalkstein gefunden (LIPFERT 1989).

Prinzipiell ähnliche Einflüsse müssen auch bei der Deposition anderer säurebildender Gase berücksichtigt werden, obwohl natürlich im Einzelfall andere Reaktionen in flüssiger Phase und andere Reaktivitäten der Gesteinsminerale zu berücksichtigen sind.

Messung der trockenen Deposition auf Naturwerksteine

Zwar existieren in der Literatur recht viele Untersuchungen zur Deposition von SO_2 auf Gesteine, die Zahl der Arbeiten, die hinsichtlich Durchführung und Dokumentation der Messungen eine Berechnung von Depositionsgeschwindigkeiten erlaubt, ist allerdings recht gering (vgl. LIPFERT 1989). Zudem streuen die in der Literatur beschriebenen SO_2-Depositionsgeschwindigkeiten stark, da neben der Reaktivität der jeweils untersuchten Materialien weitere Einflussgrößen eine wichtige Rolle spielen, die bei experimentellen Untersuchungen oft nicht ausreichend Beachtung finden oder unzureichend dokumentiert sind. Hierzu gehören die relative Luftfeuchtigkeit und die aerodynamischen Bedingungen (vgl. LIPFERT 1989, SPIKER *et al*. 1995). Sehr wenige Untersuchungen liegen für andere Schadgase, insbesondere die Stickstoffoxide vor, die zukünftig auf Grund ihrer im Vergleich zu SO_2 höheren Immissionskonzentrationen immer bedeutender werden.

Will man aber den Einfluss der sich in den beiden letzten Jahrzehnten stark ändernden Immissionssituation auf die Verwitterung von Naturwerksteinen abschätzen, so ist die Kenntnis von Depositionsgeschwindigkeiten unabdingbar. Ein Schwerpunkt unserer Forschungsarbeiten war es deshalb, geeignete Methoden zu entwickeln und einzusetzen, um Depositionsgeschwindigkeiten von SO_2 und wichtigen Stickstoffverbindungen auf Naturwerksteine zu bestimmen. Die dabei verwendeten Methoden und einige wichtige Ergebnisse seien im Folgenden kurz dargestellt.

Es gibt prinzipiell zwei Möglichkeiten, um die Deposition auf Materialoberflächen zu bestimmen. Einerseits können Materialproben in einer simulierten oder natürlichen Atmosphäre für eine bestimmte Zeit exponiert werden, um anschließend die Anreicherung der Reaktionsprodukte, also Sulfat und Nitrat, in dem Material zu messen. Wird gleichzeitig im Expositionszeitraum auch die Konzentration der Schadgase bestimmt, so können auch Depositionsgeschwindigkeiten berechnet werden. Ein grundsätzlich anderer Ansatz wird bei bilanzierenden Gasmessungen verfolgt. Diese Methode geht auf HILL (1967) zurück. Es wird die Konzentrationsabnahme eines Schadgases beim Durchströmen einer Reaktionskammer, die das zu untersuchende Material enthält, zur Bestimmung der Depositionsgeschwindigkeit verwendet. Beide Methoden wurden von uns in den vergangenen Jahren verwendet, um eine bessere Datenbasis für die Abschätzung von Depositionsraten aus Immissionskonzentrationen zu schaffen, mit deren Hilfe es möglich sein würde, auch Prognosen über das Verhalten von Natursteinen bei veränderten Immissionssituationen abzuschätzen. Einige Ergebnisse seien im Folgenden beispielhaft dargestellt.

Umfangreiche Untersuchungen zum Depositionsverhalten der wichtigsten in verschmutzter Atmosphäre anzutreffenden Stickstoffverbindungen NO, NO_2, HNO_3, HONO und PAN (Peroxyacetynitrat) auf einem carboantisch gebundenen Sandstein wurden von BEHLEN *et al*. (1996) ausführlich vorgestellt. Erwartungsgemäß wurden für die extrem reaktive Salpetersäure (HNO_3) die weitaus höchsten Depositionsgeschwindigkeiten gefunden (v_d = 1.8 cm/sec). Bereits deutlich geringere Depositionsgeschwindigkeiten wurden für HONO und NO_2 mit 0.12 cm/sec bzw. 0.02 cm/sec gefunden. Vernachlässigbar kleine Werte für v_d wurden für NO und PAN ermittelt. Berücksichtigt man weiterhin die typischen Immissionskonzentrationen dieser Verbindungen (vgl. WITTENBURG *et al*. 1998), dann zeigt sich, dass trotz der vergleichsweise geringen Konzentrationen von HNO_3 diese Stickstoffkomponente doch den wichtigsten Beitrag zur gesamten sauren Deposition von Stickstoffverbindungen und damit zur Anreicherung von Nitrat erbringt. Auf Grund der erheblich größeren Konzentrationen gibt es auch einen signifikanten Beitrag von NO_2, insbesondere während der Wintermonate, wenn die HNO_3-Konzentrationen auf Grund der geringeren photochemischen Aktivität der Atmosphäre gering sind. Der Beitrag anderer Stickstoffverbindungen kann vernachlässigt werden.

Expositionsuntersuchungen zur Depositionsmessung wurden in großem Umfang unter Verwendung einer Vielzahl unterschiedlicher Natursteinvarietäten durchgeführt. Die Mehrzahl der Untersuchungen erfolgte aber mit drei Gesteinsvarietäten, die als repräsentativ hinsichtlich der Reaktivität von Natursteinen gegenüber sauren Gasen angesehen werden können. Es handelt sich um Obernkirchener Sandstein, Sander Sandstein und Ihrlersteiner Sandstein, deren petrographische Eigenschaften in GRIMM (1990) zusammengefasst sind. Oberkirchener Sandstein ist ein überwiegend kieselig gebundener Wealdensandstein (Unterkreide) mit sehr hohem Quarzanteil. Beim Sander Sandstein handelt es sich um einen Schilfsandstein des mittleren Keupers mit toniger Bindung, der einen erheblich geringeren Quarzgehalt bei deutlich höheren Gehalten an reaktiveren

Silicatmineralen (Feldspäte, Tonminerale) aufweist. Der Ihrlersteiner Sandstein ist ein glaukonitischer Sandstein (Oberkreide), dessen Komponenten, überwiegend Quarz, Glaukonit und andere Silicate, über einen hohen Gehalt an carbonatischem Bindemittel gebunden sind.

Von diesen Gesteinsvarietäten wurden jeweils Plättchen ($5 \cdot 5 \cdot 50$ mm^3) unterschiedlich lange (ca. 1–4 Wochen) in sehr unterschiedlich mit Schadstoffen belasteten Atmosphären regengeschützt exponiert. Die Konzentrationen der wichtigsten Schadgase während der Exposition wurden kontinuierlich gemessen. Nach Ende der Exposition wurden die in den Gesteinsprüfkörpern angereicherten Schadstoffe nach wässeriger Extraktion bestimmt. Erste Auswertungen dieser Untersuchungen wurden bereits von WITTENBURG *et al*. (1998) vorgestellt. Inzwischen konnte die Datenbasis noch erweitert werden und es bestätigten sich die bisherigen Befunde. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 zusammengefasst. Erwartungsgemäß ist die Depositionsgeschwindigkeit auf den carbonatischen Ihrlersteiner Sandstein am größten, während für den Oberkirchener Sandstein die geringsten Depositionsraten gemessen wurden. Diese Ergebnisse bestätigen die unterschiedlichen Reaktivitäten der mineralischen Bestandteile dieser Sandsteine. Auffällig ist aber, dass die Depositionsgeschwindigkeit von SO_2 eine ausgeprägte Konzentrationsabhängigkeit aufweist. Dieser Effekt ist bei den beiden carbonatfreien Gesteinen am deutlichsten ausgeprägt. Deutlich ist zu erkennen, dass mit steigender SO_2-Konzentration die Depositionsgeschwindigkeiten auf Sander und Oberkirchener Sandstein stark abnehmen.

Vergleicht man die in Abb. 3 dargestellten Messwerte mit der oben diskutierten Entwicklung der SO_2-Konzentrationen der vergangenen ca. 20 Jahre, so ist klar, dass die Konzentrationsabhängigkeit der Depositionsgeschwindigkeit wichtige Konsequenzen besitzt. Die höchsten bei unseren Feldmessungen herrschenden SO_2-Konzentrationen liegen bei ca. 200 µg/m^3. Diese Konzentrationen wurden vor allem bei Messungen während der Heizperiode Anfang der 90er Jahre in den neuen Bundesländern angetroffen (vgl. WITTENBURG *et al*. 1998). Es ist davon auszugehen, dass ähnliche Schadstoffbelastungen auch in den alten Bundesländern in Ballungsräumen während der Wintermonate vorgelegen haben, bevor Luftreinhaltemaßnahmen in Kraftwerken und industriellen Anlagen sowie die Umstellung auf weniger emissionsintensive Hausfeuerungsanlagen umgesetzt waren. Unter solchen Bedingungen vermag der carbonatische Ihrlersteiner Sandstein deutlich mehr SO_2 aufzunehmen als die beiden anderen Sandsteine. Inzwischen sind die Jahresmittelwerte der SO_2-Konzentrationen sowohl in den alten wie in neuen Bundesländern auf unter 25 g/m^3 gesunken, Das sind Werte, die wohl auch schon früher in ländlichen und Reinluftgebieten vorgeherrscht haben. Unter solchen Bedingungen verhalten sich die drei so unterschiedlichen Gesteine sehr ähnlich.

Von besonderem Interesse ist nun die Interpretation dieser Befunde im Sinne des oben diskutierten Mechanismus der SO_2-Deposition auf Naturwerksteine. Aufgrund der höheren Reaktivität der Carbonatminerale ist es verständlich, dass die Depositionsgeschwindigkeit auf Ihrlersteiner Sandstein größer ist als auf die beiden silicatischen Gesteine. Sind keine reaktiven Minerale vorhanden, dann können die bei der SO_2-Deposition gebildeten H^+-Ionen nicht ausreichend schnell mit den Gesteinsbestandteilen reagieren, so dass der oberflächliche Feuchtigkeitsfilm versauert, wodurch gemäß der Gleichgewichte (6) und (7) die weitere SO_2-Aufnahme behindert wird. Schwieriger zu beschreiben ist zunächst die ausgeprägte Konzentrationsabhängigkeit und es wurden von uns weitere Untersuchungen durchgeführt.

Zunächst wurde das Verhalten eines idealen Absorbers für SO_2 im Feldversuch untersucht. Es wurden zusätzlich zu den Natursteinen auch Filterpapiere exponiert, die mit einer Na_2CO_3-Lösung getränkt wurde. Zur Feuchthaltung des Filters wurde weiterhin Glycerin zugesetzt. In Laborversuchen wurde zunächst nachgewiesen, dass es sich bei den getränkten Filtern um einen idealen Absorber für SO_2 handelt. Die mittlere bei diesen Messungen ermittelte Depositionsgeschwindigkeit und die Streuung dieser Daten (± 1s) ist ebenfalls in Abb. 3 dargestellt. Für einen idealen Absorber gilt, dass die SO_2-Aufnahme nicht durch die chemischen Eigenschaften der Oberfläche beeinflusst werden, sondern ausschließlich durch den Transport des Schadgases zur Materialoberfläche limitiert ist. Depositionsgeschwindigkeiten auf ideale Absorber sind deshalb ein Maß für die maximale Depositionsgeschwindigkeit unter gegebenen atmosphärischen Bedingungen. Die in Abb. 3 dargestellte recht hohe Streuung der mit dem idealen Absorber ermittelten Depositionsgeschwindigkeiten ist ein Maß für die Variabilität des Transports reaktiver Gase aus der freien Atmosphäre zu einer exponierten Oberfläche. Die Effektivität dieses Transports hängt in erheblichem Maße von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Turbulenz in der Atmosphäre ab, die zudem stark durch die lokale Bebauung beeinflusst werden. Die beobachtete hohe Streuung der maximalen Depositionsgeschwindigkeiten ist deshalb nicht überraschend.

Abb. 3 zeigt deutlich, dass sich die Depositionsgeschwindigkeiten der drei Gesteine mit sinkender SO_2-Konzentration immer mehr dem Verhalten eines idealen Absorbers annähern. Mit einem sehr einfachen Modell gelingt es unter Berücksichtigung der Gleichgewichte (6) und (7) in Verbindung mit einfachen Annahmen zu den Reaktionsgeschwindigkeiten der Oxidation von S(IV) zu S(VI) sowie der Reaktion der H^+-Ionen mit den jeweiligen Gesteinen, die experimentell ermittelten Depositionsgeschwindigkeiten durch eine einfache Gleichung zu beschreiben (BEHLEN UND STEIGER 2002). In dieser Gleichung gehen neben der SO_2-Konzentration nur zwei zusätzliche Parameter ein.

$$1/v_d = 1/v_{d,max} + (c/k_s)^{1/2} \qquad (8)$$

In Gleichung (8) ist c die SO_2-Konzentration, $v_{d,max}$ beschreibt die alleine durch Transportprozesse limitierte maximale Depositionsgeschwindigkeit, während k_s eine Größe ist, die der Reaktivität der Gesteine bezüglich des

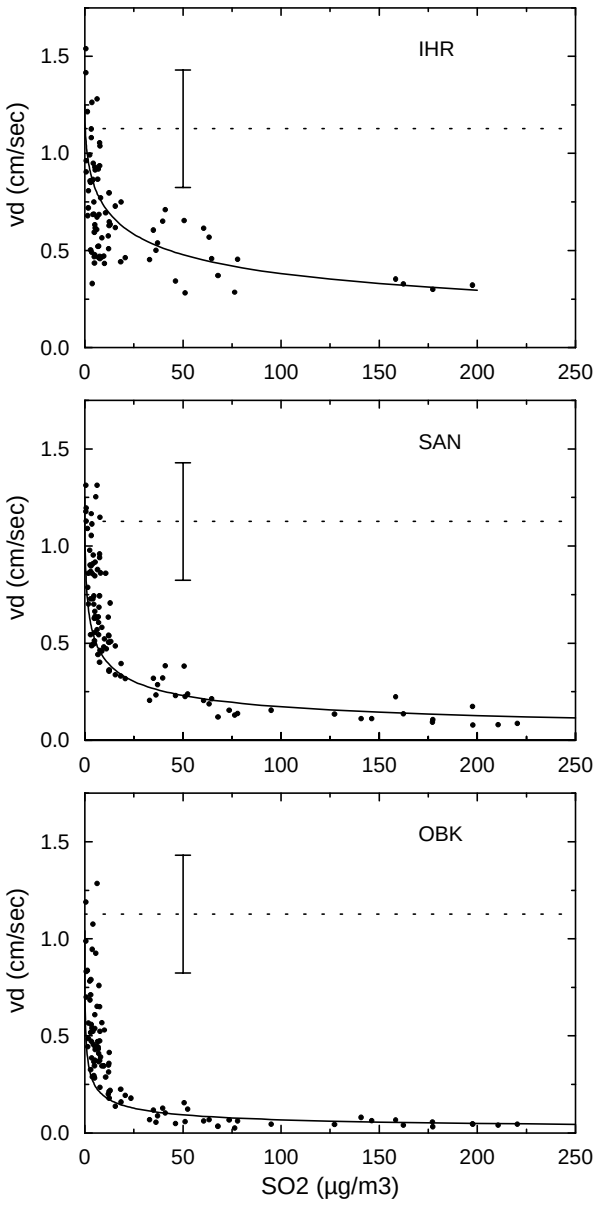


Abb. 3: Depositionsgeschwindigkeiten auf Ihrlersteiner (IHR), Sander (SAN) und Obernkirchener (OBK) Sandstein als Funktion der SO_2-Konzentration; (●): experimentelle Werte ermittelt in Feldexperimenten und unter Verwendung von Gleichung (8) angepasste Kurven (—)

Angriffs von H^+-Ionen direkt proportional ist. Verwendet man für $v_{d,max}$ die mittleren experimentell mit Hilfe der idealen Absorber ermittelten maximalen Depositionsgeschwindigkeiten (vgl. Abb. 3), dann können für die drei Gesteine Werte für k_s aus den experimentellen Daten durch Anpassung bestimmt werden. Die mit diesen Parametern berechneten Konzentrationsabhängigkeiten der Depositionsgeschwindigkeiten sind ebenfalls in Abb. 3 dargestellt. Es ist erstaunlich, wie gut dieses einfache Modell unter Verwendung nur eines gesteinsspezifischen Parameters das Verhalten der drei Gesteine beschreibt.

Weitere Untersuchungen zur Überprüfung der Konzentrationsabhängigkeit des Depositionsverhaltens wurden im Labor unter Verwendung der Kammermethode vorgenommen. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abb. 4 dargestellt. Bei den Messungen wurde die Konzentration von SO_2 am Kammerausgang C(a) auf die gewünschte konstante Konzentration geregelt. Die Dosierung erfolgt durch Mischung eines zertifizierte Prüfgases mit gereinigter Druckluft. Aus der Differenz der Eingangs- und Ausgangskonzentrationen, der Durchflussrate und der exponierten Gesteinsoberfläche lässt sich die Depositionsgeschwindigkeit ermitteln. Neben der SO_2-Konzentration wurde bei den Messungen auch die relative Feuchtigkeit in der Kammer geregelt. Um Beeinträchtigungen der SO_2-Aufnahme durch Transportprozesse zu unterbinden, ist die Kammer mit einem Ventilator ausgestattet, durch den eine optimale Durchmischung in der Kammer erzwungen werden kann. Auch bei den Kammerexperimenten wurde die maximale Depositionsgeschwindigkeit mit Hilfe idealer Absorber bestimmt.

Durch die Ergebnisse der Depositionsmessungen mit der Kammermethode werden die Feldmessungen bestätigt. Es seien beispielhaft die Ergebnisse der Messungen mit Sander Schilfsandstein in Abb. 5 vorgestellt. Als Punkte sind die experimentell mit der Kammer bestimmten Depositionsgeschwindigkeiten dargestellt. Es wurden Messungen im Luftfeuchtebereich zwischen 45% und 95% r.F. durchgeführt. In diesem Luftfeuchtigkeitsbereich erwies sich die Depositionsgeschwindigkeit auf Sander Schilfsandstein als nicht signifikant von der Luftfeuchtigkeit abhängig. Es sind deshalb alle experimentellen Werte in Abb. 5 zusammengefasst, wobei Mehrfachmessungen bei gleicher SO_2-Konzentration gemittelt wurden. Die durchgezogene Kurve entspricht einer Anpassung von Gleichung (8) an die Messwerte. Wie schon bei den Feldmessungen gelingt auch bei den Messungen mit der Kammermethode die Beschreibung der Messwerte mit ausreichender Genauigkeit. Zum Vergleich ist als gestrichelte Kurve die Konzentrationsabhängigkeit der Depositionsgeschwindigkeit dargestellt, die sich aus den Expositionsexperimenten (vgl. Abb. 3) ergibt, wenn die in der Kammer höheren Transportraten berücksichtigt werden. Auch hier liegt eine unter Berücksichtigung der experimentellen Fehler beider Methoden sehr gute Übereinstimmung vor. Ähnliche Ergebnisse wurden auch mit den beiden anderen Gesteinen erzielt. Eine mit der relativen Luftfeuchtigkeit zunehmende Depositionsgeschwindigkeit wurde lediglich für den Ihrlersteiner Sandstein beobachtet.

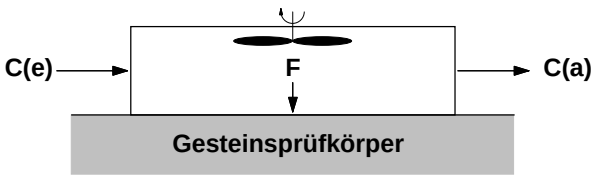


Abb. 4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung von Depositionsgeschwindigkeiten mit der Kammermethode

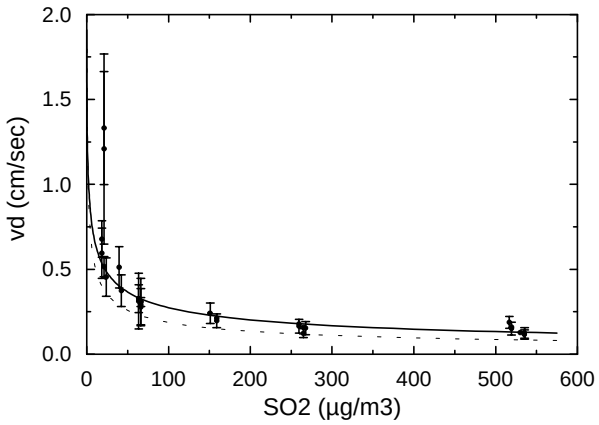


Abb. 5: Depositionsgeschwindigkeiten auf Sander Schilfsandstein als Funktion der SO_2-Konzentration; (●): experimentelle Werte ermittelt mit der Kammermethode; (—): daran angepasste Gleichung (8); (- - - -): s. Text

Die Untersuchungen belegen, dass Abschätzungen zum Einfluss der aktuellen Immissionsbelastung auf den Säureeintrag durch trockene Deposition schwieriger zu leisten sind als im Falle der nassen Deposition. Die hier vorgestellten Untersuchungsmethoden erlauben jedoch eine relativ einfache Messung von Depositionsflüssen und eignen sich auch zur Untersuchung anderer Einflüsse auf Depositionsgeschwindigkeiten. Beispielsweise wurde die Kammermethode erfolgreich eingesetzt, um Depositionsgeschwindigkeiten *in situ* an einem historischen Mauerwerk zu bestimmen. Bei solchen Untersuchungen können auch systematisch Einflüsse durch Schutzstoffbehandlungen oder andere Veränderungen der Mauerwerksoberfläche erfasst werden.

Schlussfolgerungen

Naturwerksteine und andere Baustoffe wurden und werden durch Luftschadstoffe, insbesondere durch saure Deposition in erheblicher Weise beeinträchtigt. Obwohl die zu Grunde liegenden Schadensmechanismen auf qualitativer Basis verstanden sind, ist es äußerst schwierig, Schädigungsraten in Abhängigkeit von der Luftbelastungssituation anzugeben. Vor dem Hintergrund ständig sinkender Konzentrationen des in der Vergangenheit als Hauptverursacher identifizierten Schwefeldioxids bei gleichzeitig nur langsam sinkenden Stickstoffoxidkonzentrationen wären entsprechende Abschätzungen dringend erforderlich, um Prognosen über die Auswirkungen einer veränderten Immissionssituation treffen zu können.

Das Hauptproblem liegt in der vielfältigen Wirkungsweise saurer Depositionen bei der Gesteinsverwitterung begründet. Primär wirken sowohl die nasse als auch die trockene Deposition säurebildender Verbindungen durch chemische Verwitterungsprozesse. Im Fall der nassen Deposition lassen sich die Auswirkungen von Luftreinhaltemaßnahmen relativ leicht abschätzen. Der in Abb. 2 ersichtliche Rückgang des Säuregehaltes im Regenwasser lässt sich direkt proportional als eine ca. dreifache Reduktion des Säureeintrages mit nasser Deposition interpretieren, denn es kann davon ausgegangen werden, dass die auf eine Mauerwerksoberfläche auftreffende Regenmenge sich im Laufe der Standzeit eines Bauwerkes nicht verändert. Demgegenüber liegen die Verhältnisse bei der trockenen Deposition weitaus komplizierter. Aufgrund der oben diskutierten Konzentrationsabhängigkeit der SO_2-Depositionsgeschwindigkeit wirkt sich die Reduktion der SO_2-Konzentrationen nicht direkt proportional auf die deponierte Säuremenge aus. Mit sinkender Konzentration nehmen Natursteine das SO_2 zunehmend effektiver auf, was dazu führt, dass Materialien, die sich in ihrer Reaktivität gegenüber SO_2 eigentlich stark unterscheiden, gleichermaßen effektiv SO_2 aufnehmen können und sich wie ideale Senken für SO_2 verhalten. Trotz der beschriebenen Unsicherheiten ist aber darauf hinzuweisen, dass selbstverständlich die rückläufigen SO_2-Konzentrationen zu einer deutlichen Verbesserung der Belastungssituation geführt haben.

Durch gezielte Messungen von Depositionsgeschwindigkeiten der beschriebenen Art lässt sich die Datenbasis deutlich verbessern, mit deren Hilfe man nicht nur die aktuelle Schadstoffaufnahme von Bauwerken ermitteln kann, sondern die dazu verwendet werden kann, um sowohl die Deposition und Anreicherung im Verlauf früherer Jahrzehnte als auch die zukünftige Entwicklung abschätzen zu können. Auf Grundlage der hier vorgestellten Messmethoden ist es weiterhin möglich, auch die Auswirkungen von Konservierungsmaßnahmen auf die Schadstoffaufnahme quantitativ zu untersuchen. Insbesondere die Kammermethode als zerstörungsfreie Messmethode eignet sich ausgezeichnet, um die Schadgasdeposition auf Natursteinmauerwerk nicht nur im Labor sondern auch *in situ* zu bestimmen. Erste Versuche in diesem Sinne wurden bereits durchgeführt. So konnte beispielsweise eine deutliche Reduktion der SO_2-Depositionsgeschwindigkeiten auf hydrophob gefestigten Sandsteinoberflächen nachgewiesen werden.

Als sekundäre Wirkung von Luftschadstoffen erweist sich aber die aufgrund des langjährigen Eintrages atmosphärischer Schadstoffe in vielen Mauerwerken erfolgte starke Anreicherung von Reaktionsprodukten, insbesondere löslichen Salzen, als sehr problematisch. Die in den vergangenen Jahren beobachteten Veränderungen der Immissionsbelastung werden zwar zu einer deutlichen Verlangsamung der weiteren Sulfatanreicherung führen, es ist jedoch kaum eine Verringerung der Nitratdeposition zu erwarten. Somit wird im Laufe der Jahre der Anteil von Nitraten im Mauerwerken im Vergleich zu Sulfat langsam zunehmen. Aber selbst noch drastischere Luftreinhaltemaßnahmen, die auch die Nitrate einschließen, könnten nicht verhindern, dass die bereits im Porenraum vorhandenen Salze auch zukünftig einen aktiven Schadensprozess darstellen. In vielen Bauwerken haben die bereits vorliegenden Salzkonzentrationen auch außerhalb des Einflussbereiches von aufsteigender

Feuchtigkeit bedenklich hohe Konzentrationen erreicht. Sie stellen langfristig ein erhebliches Schädigungspotential dar.

Literatur

BEHLEN A., WITTENBURG C., STEIGER M., DANNECKER W. (1996): Dry Deposition of NO, NO_2, HNO_3, and PAN on Historic Building Stones. In: RIEDERER J. (Hrsg.): *International Congress on Deterioration and Conservation of Stone - Proceedings*. Möller Druck und Verlag GmbH, 377-386.

BEHLEN A., STEIGER M. (2002): Deposition Velocity of Sulfur Dioxide to Natural Stone: The Influence of the Ambient SO_2 Concentration. *(Manuskript in Vorbereitung)*

BEHLEN *et al*. (1997): Quantification of the Salt Input by Wet and Dry Deposition on a Vertical masonry. In: MOROPOULOU A., ZEZZA F., KOLLIAS E., PAPACHRISTODOULOU I. (Hrsg.), *4th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean - Proceedings*. Rhodes, Vol. 2, 237-246.

BRIMBLECOMBE P. (1987). *The Big Smoke. A History of Air Pollution in London Since Medieval Times*. Methuen, London.

BRIMBLECOMBE P., RODHE H. (1987). Air Pollution – Historical Trends. *Durability Build. Mater.*, **5**, 291–308.

BUTLIN R.N. (1991). Effects of Air Pollutants on Buildings and Materials. *Proc. Roy. Soc. Edinburgh*, **97B**, 255–272.

DREVER J.I. (1994). Durability of Stone: Mineralogical and Textural Perspectives. In: KRUMBEIN W.E., BRIMBLECOMBE P., COSGROVE D.E., STANIFORTH S. (Hrsg.), *Durability and Change*. John Wiley & Sons, Chichester, 27–39.

FASSINA V. (1988). Environmental Pollution in Relation to Stone Decay. *Durability Build. Mater.*, **5**, 317–358.

FITZNER B., HEINRICHS K., KOWNATZKI R. (1995): Verwitterungsformen – Klassifizierung und Kartierung. In: SNETHLAGE R. (Hrsg.), *Denkmalpflege und Naturwissenschaft – Natursteinkonservierung I*. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 41–88.

GREENWOOD N.N., EARNSHAW A. (1990): *Chemie der Elemente*. VCH, Weinheim, S. 915.

GRIMM W.-D. (1990): *Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland.* Karl M. Lipp Verlag, München.

HALM (2002): Die Daten sind der Internet-Seite des Hamburger Luftmessnetzes (HALM) der Behörde für Umwelt und Gesundheit Hamburg entnommen: *www.hamburger-luft.de/default.asp*.

HANEEF S.J., JOHNSON J.B., JONES M., THOMPSON G.E., WOOD G.C., AZZAZ S.A. (1993): A Laboratory Simulation of degradation of Leinster Granite by Dry and Wet Deposition Processes. *Corr. Sci.*, **34**, 511–524.

HELBIG A. (1972): *Messungen der Schlagregenintensität am Gebäude*. In: Abhandlungen des meteorologischen Dienstes der DDR, Nr. 105 (Band XIV), Akademie-Verlag Berlin.

HILL A.C. (1967): A special purpose plant environment chamber for air pollution studies. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **17**, 743–748.

KIESLINGER A. (1932): *Zerstörungen an Steinbauten*. Verlag Franz Deuticke, Leipzig, 51–82.

KÜNZEL H. (1987). Sind wirklich Schadstoffe aus der Luft an der fortschreitenden Zerstörung unserer Denkmäler schuld? *Bautenschutz Bausanierung,* **10**, 139–141.

KÜNZEL H., SCHWARZ B. (1968): Die Feuchtigkeitsaufnahme von Baustoffen bei Beregnung. In: *Berichte aus der Bauforschung, Heft 51*,.Verlag Ernst & Sohn, 101–113.

LASAGA A.C., SOLER J.M., GANOR, J., BURCH, T.E. NAGY, K.L. (1994): Chemical Weathering Rate Laws. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 2361–2386.

LIPFERT F.W. (1989): Dry Deposition Velocity as an Indicator for SO2 Damage to Materials. *J. Air Pollut. Control Assoc*. **39**, 446–452.

LIVINGSTONE R.A., Graphical Methods for Examining the Effects of Acid Rain and Sulfur Dioxide on Carbonate Stones. In: DELGADO RODRIGUES J., HENRIQUES F., JEREMIAS T., *Proceedings 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Lisbon, 375–386.

LUCKAT S. (1973). Die Wirkung von Luftverunreinigungen beim Steinzerfall. *Staub – Reinhalt. Luft*, **33**, 283–285.

MAUSFELD S.A., GRASSEGGER G. (1994): Abbauprozesse an Feldspäten und Tonmineralen unter den Bedingungen der Bauwerksverwitterung. *Z. dt. geol. Ges.*, **143**, 23–39.

NEUMANN H.-H. (1994): Aufbau, Ausbildung und Verbreitung schwarzer Gipskrusten, dünner schwarzer Schichten und Schalen sowie damit zusammenhängender Gefügeschäden an Bauwerken aus Naturstein. In: Dannecker W. (Hrsg.): *Schriftenreihe Angewandte Analytik, Nr. 24*. Institut für Anorganische und Angewandte Chemie, Universität Hamburg.

NEUMANN H.-H., STEIGER M., WASSMANN A., DANNECKER W. (1993): Aufbau und Ausbildung schwarzer Gipskrusten und damit zusammenhängender Gefügeschäden von Naturwerksteinen am Beispiel des Leineschlosses Hannover. In: SNETHLAGE R. (Hrsg.), *Jahresberichte Steinzerfall–Steinkonservierung Band 3–1991*, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 151–167.

NEUMANN H.-H., LORK A., STEIGER M., JULING H. (1997): Decay Patterns of Weathered Quartz Sandstones: Evidence for Gypsum Induced Structural Changes. In Sveinsdottir E.L. (Hrsg.): *Proceedings 6th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*. Icelandic Building Research Institute, Reykjavik, 238-249.

RIEDERER J. (1973). Die Wirkungslosigkeit von Luftverunreinigungen beim Steinzerfall. *Staub – Reinhalt. Luft*, **33**, 15–19.

ROEKENS E., VAN GRIEKEN R. (1989): Rates of air pollution induced surface recession and material loss for a cathedral in Belgium. *Atmos. Environ.*, **23**, 271–277.

SCHAFFER R.J. (1932): *The Weathering of Natural Stones*. Department of Scientific and Industrial Research Special report No. 18, London (Nachdruck 1972), 26–33.

SCHWARTZ S.E. (1989): Acid deposition: Unraveling a regional phenomenon. *Science*, **243**, 753–763.

SMITH B.J., MAGEE R.W., WHALLEY W.B. (1994): Breakdown Patterns of Quartz Sandstone in a Polluted Urban Environment, Belfast, Northern Ireland. In: ROBINSON D.A., WILLIAMS R.B.G. (Hrsg.), *Rock Weathering and Landform Evolution*, John Wiley & Sons, Chichester, 131–150.

STEIGER M. (2002). Salts and Crusts. In: Brimblecombe P. (Hrsg.), *Air Pollution Reviews. Vol. 2. The Effects of Air Pollution on the Built Environment*. Imperial College Press, London, im Druck.

STEIGER M., WOLF F., DANNECKER W. (1993): Deposition and Enrichment of Atmospheric Pollutants on Building Stones as Determined by Field Exposure Experiments. In: THIEL M.-J. (Hrsg.), *Conservation of stone and other materials, Vol. 1*. E&FN SPON, London, 35-42.

STEIGER M., DANNECKER W. (1994): Determination of Wet and Dry Deposition of Atmospheric Pollutants on Building Stones by Field Exposure Experiments. In: ZEZZA F., OTT H., FASSINA V. (Hrsg.) *The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin. Proceedings of the 3rd International Symposium.* Soprintendenza ai beni Artistici e Storici di Venezia. Venice, 171–178.

STUMM W., WOLLAST R. (1990). Coordination Chemistry of Weathering: Kinetics of the Surface-Controlled Dissolution of Oxide Minerals. *Rev. Geophys.* **28**, 53–69.

UBA (2002): Eine Zusammenstellung langjähriger Messdaten findet sich unter folgender Internet-Adresse des Umweltbundesamtes (UBA): *www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/schadsto.htm.*

WHALLEY B., SMITH B., MAGEE R. (1992): Effects of Particulate Air Pollutants on Materials: Investigation of Surface Crust Formation. In: WEBSTER R.G.M. (Hrsg.), *Stone Cleaning and the Nature, Soiling and Decay Mechanisms of Stone: Proceedings of the International Conference Held in Edinburg, U.K.*, Donhead, London, 227–234.

WITTENBURG B., BEHLEN A., STEIGER M., DANNECKER W. (1998): Die Messung von Luftschadstoffen und deren Deposition auf verschiedene Sandsteine an historischen Bauwerken. In: SNETHLAGE R. (Hrsg.): *Handbuch Naturwissenschaft und Denkmalpflege: Natursteinkonservierung II*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 27–59.

Karin Kraus

Lösliche Alkalisalze in neuen Mörteln (Bestimmung, Gehalte, Bewertung, Untersuchungsbedarf und erste Ergebnisse)

1 Einleitung

Bei der Restaurierung von Natursteinbauten sind auf neuen Fugen und Putzen Ausblühungen von Alkalisalzen (i.A. Sulfate und alkalische Carbonate), die durch hydraulische und puzzolanische Mörtelbindemittel eingebracht werden, ein nicht selten zu beobachtendes Phänomen. Auf den Fugen- und Putzoberflächen werden die abgelagerten Salze als optische Beeinträchtigung empfunden. Über eine durch sie im Laufe der Zeit ausgelöste Schädigung der Mörteloberflächen ist nichts bekannt bzw. gibt es keine systematischen Untersuchungen. Diese leicht wasserlöslichen Salze wandern aber auch in die angrenzenden Naturwerksteine und dort verursachen sie im Laufe der Zeit eine Schädigung der Natursteinoberflächen. Darauf weist nachdrücklich ARNOLD (1981 und 1986) aufgrund vieler Beispiele in der Schweiz hin. Darüberhinaus begründen ALTHAUS ET AL (1986), FALLER ET AL (1987, 1988, 1989), BLÄUER (1992) und LEGRUM (1993) an Naturwerksteinen beobachtbare Schäden durch Alkalisalze mit der Verwendung von hydraulischen Bindemitteln. Bei allen Literaturzitaten wurden zementhaltige bzw. trasszementhaltige Bindemittel neu in die Bauwerke eingebracht. Eine weitere Quelle für lösliche Alkalien in neuen Mörteln können alkalihaltige Zusatzstoffe und Zusatzmittel sein. ARENDT UND SEELE (1996) berichten über einen auf die Verwendung eines alkalihaltigen Zusatzstoffs begründeten Schadensfall.

2 Bestimmung und Gehalte

Eine Prüfung neuer Mörtel auf ihr Potential an ausblühfähigen Salzen ist deshalb unbedingt notwendig.

Denkbar sind die Bestimmung des :

a. Gesamtalkaligehalts

b. Gehalts (poren)wasserlöslicher Alkalien

c. Ausblühverhaltens von Alkalisalzen

zu a:

Der Gesamtalkaligehalt der Bindemittel (Tabelle 1) ist im allgemeinen ungeeignet, da er nichts darüber aussagt, an welche Phasen die Alkalien gebunden sind. Die chemische Stabilität der alkalihaltigen Phasen ist aber maßgebend für die Mobilität der Alkalien im Porenlösungsmilieu des Mörtels. Allenfalls bei Bindemitteln mit vergleichbarem Phasengehalt, wie z.B. Portlandzementen, ist der Gesamtalkaligehalt aussagekräftig.

Tabelle 1: Gesamtalkaligehalte einiger Bindemittel, die immer wieder als potentieller Alkaliionenlieferant genannt werden.

Bindemittel	**Na_2O (M.%)**	**K_2O (M.%)**
Portlandzement (Keil, 1971)	0,04-0,4	0,3-1,9
Natürliche hydraulische Kalke (Winnefeld et al, 1996)	< 0,1	0,5-1,3
Trasskalk mit rheinischem Trass (Faller et al, 1989; Stark und Wicht, 1998)	2,2-2,3	2,7-3,6
Trasskalk mit bayerischem Trass (Faller et al, 1989; Stark und Wicht, 1998)	0,2-0,5	0,7-0,8

Beim Portlandzement sind die im Porenlösungsmilieu alkaliliefernden Phasen die Alkalisulfate, v.a. das Kaliumsulfat (KEIL, 1971). Beim rheinischen, vulkanischen Trass ist es die Glasphase, die Alkalien als Netzwerkwandler enthält (LUDWIG UND SCHWIETE, 1962). Auch bei dem bayerischen Trass, einer Impaktbreccie mit dem Gesteinsnamen Suevit, enthält der Glasanteil Alkalien (LIEBIG, 1997). Über die potentellen alkaliliefernden Phasen in natürlichen hydraulischen Kalken ist in der Literatur nichts zu finden.

zu b.:

Die Bestimmung der wasserlöslichen Alkaligehalte des neuen Mörtels ist eine häufig geforderte Methode (ROSSI-DORIA, 1986; BLÄUER, 1992). Es gibt allerdings keine einheitliche Analysenvorschrift wie eine Literaturauswertung zeigt (Tabelle 2). Im allgemeinen werden Schütteltests an zerkleinerten Proben durchgeführt; in der Übersicht findet sich nur ein Säulentest. Die bei der Prüfung auf Umweltverträglichkeit (s.u.) verbreiteten Standtests an intakten Probekörpern werden offenbar bislang nicht eingesetzt.

Variiert werden bei den Schütteltests:

- Probenart
- Probenaufbereitung
- Verhältnis Probe/Lösungsmittel
- Reaktionsdauer

Bei Laborproben ist zudem das Alter der Proben wichtig, d.h. die Frage ob vollständig carbonatisierte oder

Tabelle 2: Methoden zur Bestimmung der wasserlöslichen Anteile eines Mörtels Literaturauswertung.

Autoren	**Proben**	**Probenaufbereitung**	**Lösungsmittel**	**Verhältnis Probe / Lösungsmittel**	**Reaktionsdauer**	**Bestimmte Gehalte der Ionen (mg/kg) (1 mg/kg = 1 ppm = 0,0001 M.%)**
Peroni et al (1981)	Labormörtel	Granulat: 1-2 mm, 0,5-1 mm, < 0,5 mm je 10 g	Bidestilliertes Wasser	30 g / 250 ml	30 Tage (jede Woche einmal umschütteln)	Na+: 41-207 K+: 53-810
Laurenzi Tabasso et al (1984)	Labormörtel, reine Bindemittel	aufgemahlen < 106 µm	Deionisiertes Wasser	5 g /200 ml	7 Tage, Rütteltisch	Na+: 100-2400 K+: 100-9000 Ca++: 400-16900 (spez.Leitf.: 150-5200 µS/cm)
Faller et al (1987)	Bauwerksmörtel (1-15 Jahre alt)	aufgemahlen (?)	Wasser (bidestilliert?)	10-30 g / 100 ml	2 Tage schütteln, 20°C,	Na+: 34-676 K+: 99-3740 Ca++: 45-4542 Mg++: 4-2188
Faller und Althaus (1989)	Mörtelrohstoffe (Trasse, Trasskalke, Trasszemente)	nicht notwendig	Bidestilliertes Wasser	1 g / 100 ml	2 Tage, 3 Monate, 1 Jahr schütteln, 20°C	Na+: 37-7686 K+: 151-12099
Papayianni et al (1993)	Labormörtel	aufgemahlen	Destilliertes Wasser	5 g / 200 ml	7 Tage, Rütteltisch	Na+: 40-400 Ca++: 2500-11000
Bettzieche (1994)	Labormörtel (28 Tage alt)	Perkolationsverfahren nach DIN 51100: (< 0,2 mm, destilliertes Wasser, 50 g / 1500 ml, Ende der Auslaugung wenn keine Sulfationen mehr nachweisbar sind)				Na+: 59-223 K+: 83-739 Ca++: 900-1421 SO4--: 480-1860
Gödicke-Dettmering und Strübel (1996)	Labormörtel (1/2 Jahr alt)	aufgemahlen	deionisiertes Wasser	10g / 100ml	24 Stunden schütteln	Na+: 13-346 K+: 29-776 Ca++: 376-6706 Mg++: 4-10 SO4--: 20-2096

noch calciuimhydroxidhaltge Mörtel geprüft werden. Hierauf geht keiner der Autoren ein. Wie schon gesagt arbeiten alle Methoden an weitgehend aufgemahlenen Proben. Das heisst, der Einfluss des Mörtelgefüges auf die Freisetzung der Alkalien bleibt unbeachtet. In Prüfungen der Umweltverträglichkeit von Beton wird dem Gefügeeinfluss große Beachtung geschenkt. Eine Bestimmung der Auslaugung an aufgemahlenen Proben wird abgelehnt. Es sind verschiedene realitätsnahe Verfahren zur Bestimmung von Auslaugraten an gefügeintakten Probekörpern, sog. Standtests entwickelt worden (siehe Literaturzusammenstellung von STARK UND WICHT, 1996). Allerdings ist die hier betrachtete Fragestellung eine andere. Bei der Umweltverträglichkeitsprüfung werden die von einem monolithischen, relativ dichten Betonkörper an die wässrige Phase der Umgebung abgebenen anorganischen und organischen Stoffe bestimmt. In dem vorliegenden Fall wird die Zu-

sammensetzung der Porenlösung gesucht, die sich in den relativ porösen Mörteln einstellt und von dort bei Durchfeuchtung in die angrenzenden Baustoffe einwandert, da ein Konzentrationsausgleich angestrebt wird. Diesem Unterschied ist bei der Versuchs- und Messanordnung Rechnung zu tragen (s. Kapitel 4).

zu c.:

Einen anderen Weg zur Bestimmung der löslichen Salze in einem neuen Mörtel geht WISSER (1989). Er prüft durch zyklisches, einseitiges Befeuchten und Trocknen von Festmörtelproben das sog. Ausblühverhalten von Festmörteln. Versuchsergebnis sind optisch feststellbare Ausblühungen von Salzen und deren Phasenbestimmung, eventuell die Bestimmung der Menge der Ausblühungen. Diese Untersuchungsmethode geben auch KNÖFEL UND SCHUBERT (1993) in ihrer Übersicht über Mörtelprüfungen als die Methode zur Feststellung der ausblühfähigen Salze an.

Vorteil der Methode ist, dass hier zusätzlich das reale Transportverhalten der wässrigen Phase simuliert wird. Leider stellt WISSER (1989) keine Korrelationen seiner Ergebnisse mit den Gehalten wasserlöslicher Alkalien einerseits und mit gewissen Festmörteleigenschaften wie Porosität oder Wasseraufnahmeverhalten anderseits auf. In seiner Arbeit werden Ausblühungen von Alkali- und Erdalkalisalzen ausschließlich an gewissen puzzolanhaltigen Mörteln festgestellt, wobei eine Abhängigkeit der Art der Ausblühungen vom Alter der Mörtel, d.h. von der Carbonatisierung deutlich wird.

3 Bewertung

Bewertet werden die analysierten Alkali- oder Salzgehalte jeweils relativ; d.h. das Bindemittel- bzw. Mörtelsystem, das die geringsten Gehalte aufweist, ist am geeignetsten. Die relativ höchsten Alkaligehalte haben die in Tabelle 2 genannten Autoren bei zementhaltigen und gewissen puzzolanhaltigen Mörteln gefunden. Eine Zuordnung der Ergebnisse zu den verschiedenen Mörtelrezepturen enthält Tabelle 3. Neuere Untersuchungen an verschiedenen hydraulischen Kalken zeigen auch diese Unterschiede (Tabelle 4). Man erkennt deutlich, dass Natriumionen v.a. durch Trass freigesetzt werden, während die Sulfationen durch den Zementanteil der Mörtel eingebracht werden.

Daneben werden von einigen Autoren Grenzwerte für die wasserlöslichen Alkaliionengehalte neuer Mörtel angegeben und auch die Mauerziegelnorm DIN 105 fordert die Einhaltung von Grenzwerten zur Gewährleistung ausblühfreier Ziegel (Tabelle 5).

Für eine Bewertung der löslichen Salzgehalte und eine Abschätzung der Gefährdung des Mörtels und seiner angrenzenden Baustoffe ist auch folgende Überlegung von Interesse: Angenommen ein Festmörtel zeigt im wässrigen Auszug 0,025 M.% Na^+; d.h. in 1 kg Festmörtel sind 0,25 g wasserlösliche Na^+-Ionen. Der Festmörtel habe eine kapillare Wasseraufnahme von 10 M.%; d.h. in 1 kg Mörtel befinden sich nach ausreichender Beregnung 100 g Porenwasser, in das die wasserlöslichen Na^+-Ionen übergehen. Die Porenlösung enthält dann 0,25 M.% Na^+. Bei gleichzeitiger Anwesenheit von SO_4^{--} - Ionen hat man eine 0,75 %ige Na_2SO_4-Lösung. Zum Vergleich: Beim Salzsprengtest nach VDI 3798 verwendet man eine 10 %ige Na_2SO_4-Lösung und kann den Zerstörungsprozess damit wesentlich raffen.

4 Untersuchungsbedarf und erste Ergebnisse

Vor einer Diskussion über Grenzwerte ist es notwendig, ein einheitliches Analysenverfahren festzulegen, bei dem die an die Porenwasserlösung abgegebenen Ionengehalte bestimmt werden.

Im Folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, das in einer ersten Untersuchungsphase erprobt wurde. Aufgrund der Ausführungen in Kapitel 2b wurden gefügeintakte Mörtelproben untersucht. Ausgewählt wurde ein Granulat, 4-10 mm, herzustellen durch Zerschlagen von Mörtelprismen und der Zielgröße 4-10 mm entsprechendem Aussieben. Die Größe der Granalien ergab sich aus Praktibilitätsgründen und aus den in Kapitel 2b aufgeführten Überlegungen der notwendigen vollständigen Durchfeuchtung in der vorgegebenen Auslaugungszeit. Die Granalien sollten in einem Standverfahren eluiert werden. In Anlehnung an DIN 38414, Teil 4 sollte das Verhältnis Probe zu destilliertem Wasser 1:10 betragen, die Auslaugungszeit 24 Stunden auf einem Magnetrührer. Im Filtrat sollte neben den Alkaliionen Natrium und Kalium auch die Magnesiumionen- und die Sulfationen quantitativ analysiert werden. Die Ergebnisse sind auf die Festmörtelmasse bezogen anzugeben.

In der ersten Untersuchungsphase sollte geklärt werden:

- Wie verhalten sich die Mörtelgranalien?
- Ist das Standverfahren eine Alternative zu den bekannten Schütteltests?
- Welchen Einfluss hat das Mörtelalter bzw. die Carbonatisierung der Mörtel?
- Kommt es bei einem Laugungszyklus zu einer weitgehend vollständigen Auslaugung?

Mit der Klärung dieser Fragen befasste sich das Wilhelm Dyckerhoff Institut für Baustofftechnologie, Wiesbaden. Als Untersuchungsmaterial diente ein Trasszementmörtel (Bindemittel CEM IV/B-P 32,5 der Fa. Tubag). In den wässrigen Auszügen wurden die Na^+-, K^+- und SO_4^{--} -Ionenkonzentration, der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit gemessen.

Tabelle 3: Alkaliionengehalte in Abhängigkeit von der Mörtelrezeptur. Literaturauswertung

Mörtel	**Angaben zur Zusammen setzung (1); i.A. handelt es sich um Labormörtel**	**Na^+ (mg/kg)**	**K^+ (mg/kg)**	**Literaturzitat**
Kalkmörtel	K/S 1:2,6-3 (RT)	54-68	50-54	Peroni et al (1981)
	K/S 1:3 (RT)	59	83	Bettzieche (1994)
	K/S 1:4 (MT)	n.n.	n.n.	Gödicke-Dettmering und Strübel (1996)
Hydraulischer Kalk-mörtel	HK/S 1:1,6 (RT)	45	210	Peroni et al (1981)
	HK/S 1:4 (MT)	13	517	Gödicke-Dettmering und Strübel (1996)
Trassmörtel	K/Tr/S 1:1,2:2,5 (RT) (2)	133	253	Peroni et al (1981)
	Trasskalkmörtel, ca 15 Jahre alt, vom einem Bauwerk (3)	669	1261	Faller et al (1987)
	Trasskalkmörtel, ca. 1 Jahr alt, von einem Bauwerk (4)	34	99	Faller et al (1987)
	K/Tr/Z/S 1:0,8:0,2:6 (RT) (5)	320	k.A.	Papayianni et al (1993)
	Handelsüblicher Trassmörtel	223	498	Bettzieche (1994)
	K/Tr/S 1:1:8 (MT) (3)	336	195	Gödicke-Dettmering und Strübel (1996)
	Handelsüblicher Trasskalk TrK/S 1:4 (MT) (3)	203	376	Gödicke-Dettmering und Strübel (1996)
Kalkzementmörtel	K/Z/S 3:1:12 (RT)	78	291	Peroni et al (1981)
	K/Z/S 2:1:12 (RT)	100	300	Laurenzi Tabasso et al (1984)
	K/Z/S 1:1:6 (RT)	111	739	Bettzieche (1994)
Zementmörtel	Z/S 1:2,3 (RT)	207	810	Peroni et al (1981)
	Z/S 1:3 (RT)	100	300	Laurenzi Tabasso et al (1984)
	Z/S 1:4 (MT)	100	776	Gödicke-Detterming und Strübel (1996)

n.n.: nicht nachweisbar k.A.: keine Angabe
(1) K: Kalk HK: Hydraulischer Kalk Z: Zement Tr: Trass S: Sand
(2) Puzzolan von Salone (Italien)
(3) Trass aus der Eifel (Rheinischer Trass)
(4) Trass aus dem Nördlinger Rieß (Bayerischer Trass)
(5) Puzzolan von Santorin (Griechenland)

Tabelle 4: Wasserlösliche Ionengehalte durchcarbonatisierter Labormörtel. Angaben zum Elutionsverfahren: Aufgemahlene Proben, Verhältnis Feststoff/Wasser 1:10, 24 Stunden schütteln. Die Mörtelbezeichnung richtete sich nach dem verwendeten Bindemittel. Die Mörtel wurden mit Normsand B/Z = 1:4 (MT) hergestellt. Zusammenstellung aus Kraus et al (2001) sowie Gödicke-Dettmering und Strübel (1996)

Mörtel	**SO_4^{--}**	**NO_3^-**	**Cl^-**	**Ca^{++}**	**Mg^{++}**	**Na^+**	**K^+**	**pH**
	(mg/kg)							
Weisskalkhydrat CL 90	26	5	5	k.A.	n.n.	n.n.	n.n.	k.A.
Weisskalkhydrat CL80	35	3	9	391	3	9	62	10,78
Natürlicher hydraulischer Kalk NHL2	106	9	19	412	3	9	233	11,18
Natürlicher hydraulischer Kalk NHL5	188	1	23	226	11	15	302	10,64
Weisskalkhydrat CL90/PZ45 1:1	300	15	7	394	5	28	113	10,30
Weisskalkhydrat CL90/PZ45 2:1	145	10	7	457	2	14	65	10,95
Weisskalkhydrat CL90/PZ45 3:1	115	15	6	86	1	2	9	11,37
Hydraulischer Kalk HL5	243	17	25	261	17	19	339	10,16
Trasskalk HL5 mit rheinischem Trass	767	19	48	k.A.	10	203	346	k.A.

n.n.: nicht nachweisbar k.A.: keine Angabe
PZ45: Portlandzement CEM I 42,5

Tabelle 5: Grenzwerte zur Beurteilung ausblühfreier bzw. durch lösliche Salze nicht gefährdeter Mörtel und Ziegel. Literaturauswertung.

Literaturzitat	Grenzwerte
Laurenzi-Tabasso et al (1984)	$Na^+ + K^+ < 2500$ mg/kg (Bindemittel?) $Ca^{++} < 4000$ mg/kg (Bindemittel?) spez. Leitfähigkeit < 1000 µS/cm
Faller und Althaus (1989)	$Na_2O < 1000$ mg/kg ($Na^+ < 742$ mg/kg) $K_2O < 1000$ mg/kg ($K^+ < 830$ mg/kg) MgO < 1000 mg/kg ($Mg^{++} < 603$ mg/kg)
DIN 105, Teil 1	$Na^+ + K^+ < 300$ mg/kg
DIN 105, Teil 3	$Na^+ + K^+ < 150$ mg/kg

Vergleichend wurde untersucht:

- Unterschiedliche Probenpräparation: Festmörtelgranulat 4-10 mm, Festmörtelgranulat < 1 mm, analysenfein aufgemahlener Festmörtel
- Unterschiedliche Laugungsverfahren: Schütteltest und Standverfahren
- Unterschiedliche Probenalter: 28 Tage, 63 Tage und älter bis zu 248 Tagen
- Unterschiedliche Elutionsmethode: Mit und ohne Wasserwechsel

Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse:

- Bei den vorrangig untersuchten 28-Tage Proben unterscheiden sich die Ergebnisse der Festmörtelgranalien 4-10 mm nur geringfügig von den Ergebnissen der aufgemahlenen Festmörtel, während es bei den Festmörtelgranalien <1 mm offenbar zu einer Anreicherung des Bindemittels kommt, die die Ergebnisse beeinflusst.
- Bei den 28-Tage Proben können die wasserlöslichen Alkaliionen schon beim ersten Auslaugungszyklus zu 70-80% erfasst werden, während sich bei den Sulfationen keine Abnahme der Konzentration über die durchgeführten 11 Zyklen zeigt.
- Die ermittelten Alkali- und Sulfationengehalte liegen in der für trasshaltige Mörtel in der Literatur bekannten Größenordnung. Bezüglich der Ionengehalte zeigt sich aber eine unerwartet starke Abhängigkeit von der Carbonatisierung der Proben. Die Natrium- und v.a. die Kaliumionengehalte nehmen in den carbonatisierten Proben ab, die Sulfationen zu (Abb.1). Die Untersuchungen zum Einfluss des Probenalters wurden nur an den Festmörtelgranalien 4-10 mm durchgeführt.
- Werden die Untersuchungen an Festmörtelgranalien 4-10 mm durchgeführt, ist das Standverfahren dem Schüttelverfahren vorzuziehen, da so der Abrieb keine Rolle spielt.

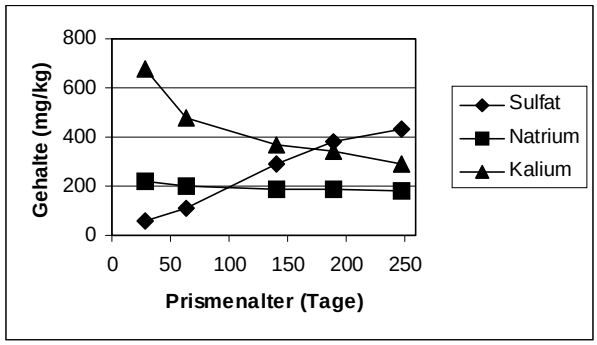


Abb.1: Ergebnisse der ersten Untersuchungen zum Auslaugungsverhalten von Mörtelgranalien 4-10 mm aus einem Trasszementmörtel. Aufgetragen sind die durch 24-stündige Auslaugung mobilisierbaren Ionengehalte verschieden alter Mörtelprismen. Aus Volkmann (2001)

Die Ergebnisse zeigen die Eignung von Mörtelgranalien für die Auslaugungsversuche. Allerdings ist der Einfluss des Gefüges geringer als erwartet. Aufgrund der im Vergleich zum Aufmahlen einfachen Probenpräparation sollen die Versuche an Granalien aber weiterverfolgt werden.

Die Ergebnisse machen aber v.a. deutlich, dass noch viele grundsätzliche Fragen zur Mobilität der salzbildenden Ionen in neuen Mörteln offen sind. Vor allem die aufgezeigte Abhängigkeit der freigesetzten Ionengehalte von der Carbonatisierung der Mörtel macht alle bisherigen Angaben zu löslichen Salzgehalten, die auch schon Eingang in die technischen Merkblätter von Mörtelherstellern gefunden haben, nicht miteinander vergleichbar. Vor der Festlegung eines einheitlichen Analysenverfahrens besteht also weiterer Untersuchungsbedarf.

Es fehlt:

- Systematische Untersuchung des Einflusses der Carbonatisierung auf das Auslaugverhalten von aufgemahlenen Festmörtelproben und von Festmörtelgranalien 4-10 mm
- Vergleich der Ergebnisse mit dem Ausblühtest
- Hinzunahme weiterer Mörtelrezepturen (Mörtel mit verschiedenen hydraulischen und puzzolanischen Anteilen, Mörtel mit Zusatzmitteln u.s.w.)
- Festlegung der Lagerungbedingungen für die Laborprüfkörper vom Tag der Herstellung bis zum Untersuchungstermin, um optimale und vergleichbare Bedingungen für die Erhärtungsreaktionen zu gewährleisten.

Ziel dieser Untersuchungen ist einerseits die endgültige Festlegung aller Versuchsparameter für ein einheitliches Auslaugungsverfahren. Stehen diese fest, sind die Praktikabilität des Verfahrens und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse in einem Ringversuch abzuklären. Ziel ist aber andererseits auch die Verbesserung der Kenntnisse um die Freisetzung salzbildender Ionen in Mörteln in Abhängigkeit von Mörtelbestandteilen und Mörtelgefüge. Damit könnten Möglichkeiten zur Optimie-

rung von Mörtelrezepturen im Hinblick auf die löslichen Alkalisalzgehalte aufgezeigt werden.

Derartige Untersuchungen werden derzeit in einem Kooperationsprojekt des IFS zusammen mit dem Institut für Geowissenschaften der Universität Mainz, der Fa. Tubag, Kruft und dem Wilhelm Dyckerhoff Institut für Baustofftechnologie, Wiesbaden durchgeführt. Die Publikation der Ergebnisse in Form eines IFS-Berichts ist in Vorbereitung.

5 Literatur

(kursiv: nicht zitierte Literatur, für das Thema von Interesse)

Althaus, E.; A. Faller; E. Karothke (1986): Putz- und Mauerwerkschäden durch Salze. SFB 315, Jahrbuch 1986, 272-283.

Arendt, C. & J. Seele (1996): Instandsetzungsberatung als Detektivarbeit. Bautenschutz und Bausanierung, 7/96, 37-39.

Arnold, A. (1981): Salzmineralien in Mauerwerken. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt., 61, 147-166.

Arnold A. (1986): Moderne alkalische Baustoffe und die Probleme bei der Konservierung von Denkmälern. Intern. Kolloquium Natursteinkonservierung, München, 21./22.5.1986, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Arbeitsheft 31, 152-162.

Arnold, A. (1992): Salze: Lästige Ausblühungen oder Hauptschadensursache? Jahresberichte Steinzerfall - Steinkonservierung, Band 2, Verlag Ernst&Sohn Berlin, 1-9.

Beauchamp, D; S. Zsembery (1996): 19th century protest helps save parliament house for the 21st century - Testing mortars for repointing sandstone. Proceedings of the 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone Berlin 1996, 1577-1584.

Bettzieche, H.(1994): Einfluss von Zementen und Fertigmörteln auf die Ausblühungen von Sichtmauerwerk. ZI international, 1994, Heft 6, 397-408.

Blachnik, B. (2001): Zusatzmittel in Putzmörteln – Wirksamkeit, Dauerhaftigkeit und Auslaugung. Dissertation Universität Siegen.

Bläuer, C. (1982): Weathering of the Nydegg Bridge in Berne, Switzerland. 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lissabon, 15.-18.6.1992, 979-988.

Brameshuber, W. (1999): Emission von umweltrelevanten organischen Bestandteilen aus Betonen mit organischen Betonzusatzstoffen – Abschlussbericht. Institut für Bauforschung RWTH Aachen, Forschungsbericht Nr. F 626, Fraunhofer IRB-Verlag T 2904.

Breitenbücher, R. (1994): Auslaugbarkeit von Beton - Prüfverfahren und Wertung von Versuchsergebnissen. Beton- und Stahlbetonbau, 89, 237-243.

Breitenbücher, R.; R. Springenschmidt & H.W. Dorner (1992): Verringerung der Auslaugbarkeit von Spritzbeton im Tunnelbau durch Auswahl von Zementen und Betonzusätzen, Beton-Information, 1/92, 10-15.

DIN 105, Teil 1 (08/89): Mauerziegel - Vollziegel und Hochlochziegel.

DIN 105, Teil 3 (05/84): Mauerziegel - Hochfeste Ziegel und hochfeste Klinker.

DIN 38414, Teil 4 (10/84): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. Schlamm und Sedimente (Gruppe S), Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4).

DIN 51100 (4/57): Bestimmung der löslichen Salze (Percolatorverfahren).

Ehrenberg, A.; R. Bialucha; J. Geiseler (1998): Ökologische Eigenschaften von Hochofenzement - Lebenswegphase Nutzung: Auslaugung und Radioaktivität. Beton-Informationen, 4'98, 3-19.

Faller, A.; E. Althaus (1989):Verträglichkeit moderner Mörtel in historischem Mauerwerk.Intern. Tagung des SFB 315 "Untersuchungen an Material und Konstruktion historischer Bauwerke", Karlsruhe, 18.-21.10.89, Arbeitsheft Nr.10, 45-47.

Faller, A.; E. Karotke; E. Althaus, K.Grimm (Exposé) (1987): Mineralogische Untersuchungen an der Abtei Neresheim. Mikrobiologische Untersuchungen (Exposé). SFB 315, Jahrbuch 1987, Ernst & Sohn, Berlin, 143-154.

Faller, A.; E. Karotke; E. Althaus (1988): Salzschäden in Putz und Mauerwerk des ehemaligen Augustiner-Klosters Oberndorf/Neckar. SFB 315, Jahrbuch 1988, 165-172

Faller, A.; E. Karotke; E. Althaus (1989): Salzschäden an historischen Bauwerken. SFB 315, Jahrbuch 1989, 105-113.

FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen) (1994): FGSV-Arbeitspapier Nr. 28/1: Umweltverträglichkeit von Mineralstoffen. Teil: Wasserwirtschaftliche Verträglichkeit. 20 S. Köln (Ausgabe Oktober 1994).

Gödicke-Dettmering, T. und G. Strübel (1996): Mineralogische und technologische Eigenschaften von hydraulischen Kalken als Bindemittel von Restaurierungsmörtel in der Denkmalpflege. Giessener Geologische Schriften, Nr. 56, Festschrift Professor Knoblich, 131-154.

Gundlach, H. (1958): Über die Bestimmung von geringen Mengen an wasserlöslichen Salzen in Gesteinen, TIZ, 82, 292-294.

Gunkel, P. (1983): Die Zusammensetzung der flüssigen Phase erstarrender und erhärtender Zemente, Beton-Informationen, 1/83, 3-8.

Hirschwald, J. (1911): Über die Einwirkung von Trass- und Zementmörtel auf natürliche Bausteine. Bautechnische Gesteinsuntersuchungen, 2, 23-33.

Hohberg, I.; C. Müller; P. Schießl; G. Volland (1996): Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe. Sachstandsbericht. Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton Nr. 458, Beuth-Verlag, Berlin.

Keil, F. (1971): Zement – Herstellung und Eigenschaften. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 439 Seiten.

Knöfel, D.; P. Schubert (Hrsg.) (1993): Handbuch Mörtel und Steinergänzungsstoffe in der Denkmalpflege, Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT-Verbundforschung zur Denkmalpflege, Verlag Ernst & Sohn, Berlin

Kraus, K.; A. Qu; G. Strübel (2001): Eigenschaften von Mörteln aus Kalken mit natürlichen und zugemischten hydraulischen Anteilen. IFS-Bericht Nr. 12 – 2001, Mainz.

Laurenzi Tabasso, M.; P. Sammuri (1984): Evaluation of mortars for use in conservation from the standpoint of the release of soluble salts. Preprints of the 7th Triannial Meeting ICOM-Committee for Conservation, Kopenhagen, 1984, S. 84.10.8-84.10.11.

Legrum, J. (1993): Untersuchungen zur Klärung der Sandsteinverwitterung im Judenbad zu Friedberg in Hessen, VDI-Berichte Nr 1060, 373-382.

Liebig, E. (1997): Gebrannte Tonminerale und Trassmehle als puzzolanische Komponenten in Kalkmörteln. Dissertation Universität Karlsruhe.

Ludwig, U. & H.E. Schwiete (1962): Beitrag zur Konstitution einiger rheinischer Trasse. Zement, Kalk, Gips, 1962, 160-165.

McCoy, W.J. & O.L. Eshenour (1968): Significance of total and water-soluble alkali contents of portland cements. Journal of Materials. 3, 684-694.

Odler, I. & E.N. Stassinopoulos (1982): Über die Zusammenstetzung der Porenflüssigkeit hydratisierter Zemente, TIZ-Fachberichte, 106, 394-401.

Papayianni, I.; K. Theocharidou (1993): Efflorescence Tendency of Mortars used in Interventions on old Masonry. RILEM Tagung Conservation of Stone and other Materials, Paris, 1.-3.7.93, 621-628.

Peroni, S. et al (1981): Lime based mortars for the repair of ancient masonry and possible substitutes. ICCROM-Symposium Mortars, Cements and Grouts used in teh conservation of Historic Buildings, Rom, 3.-6.11.1981, 63-99.

Perry, S.H.; A.P. Duffy (1997): The short-term effects of mortar joints on salt movement in stone. Atmospheric Environment, 9, 1297-1305.

Rossi-Doria, P. (1986): Mortars for the restauration: basic requirements and quality control. Materials and structure, vol. 19, Nr. 114, 445-448

Schießl, P. und I. Hohberg (1995): Umweltverträglichkeit von zementgebundenen Baustoffen – Untersuchungen zum Auslaugverhalten. Institut für Bauforschung, Forschungsbericht Nr. F 414, Aachen.

Schießl, P. und I. Hohberg (1998): Untersuchungen zum Auslaugverhalten von Frischbeton. Institut für Bauforschung, Forschungsbericht Nr. F 641, Aachen.

Schwiete, H.-E.; P. Kastanja; U. Ludwig (1965): Das mörteltechnische und chemische Verhalten verschiedener Trasse und Gesteinsmehle in Verbindung mit Kalk in wässrigen Lösungen. Foschungsbericht des Landes NRW Nr. 1441, Westdeutscher Verlag Köln und Opladen.

Spanka, G. & G. Thielen (1995): Untersuchungen zum Nachweis von verflüssigenden Betonzusatzmitteln und zu deren Sorptions- und Eluationsverhalten, Beton, 5/95, 320-327.

Stark, H & S. Stürmer (1996): Bauschädliche Salze. Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, Heft Nr. 103, 51 Seiten.

Stark, H. & B. Wicht (1996): Umweltverträglichkeit von Baustoffen. Kapitel 7 - Auslaugbarkeit von Baustoffen. Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, Heft Nr. 104, 99 Seiten.

Stark, H.; B. Wicht (1998): Anorganische Bindemittel. Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, Heft Nr. 109, 364 Seiten.

Volkmann, S. (2001): Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung des Gehaltes an eluierbaren Alkalien in Mauermörteln für die Restaurierung von Natursteinbauwerken. Unveröffentlichter, interner Untersuchungsbericht, Wilhelm Dyckerhoff Institut für Baustofftechnologie, Wiesbaden, 21 Seiten.

VDI 3797 Blatt 1 (02/1980): Salzsprengest

Winnefeld, F.; D. Knöfel (1996): Eigenschaften von Baukalken mit unterschiedlich hohen hydraulischen Anteilen – eine kritische Betrachtung hinsichtlich des Einsatzes für die Denkmalpflege. Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen, 4. Internationales Kolloquium, Fraunhofer IRB Verlag, 801-815.

Wisser, S. (1989) Historische und moderne Mörtel im Verbund mit Naturstein. Hochschulsammlung

Naturwissenschaft, Mineralogie Band 1, Hochschulverlag Freiburg.

Zehnder, K.; A. Arnold; H. Spirig (1986): Zerfall von Wandmalerei durch lösliche Salze. Eine Fallstudie am Beispiel der Krypta des Züricher Grossmünsters. Maltechnik Restauro, 92, 9-33

Danksagung

Das Institut für Steinkonservierung dankt dem Wilhelm Dyckerhoff Institut für Baustofftechnologie, Wiesbaden, für die Zuverfügungstellung der Untersuchungsergebnisse des internen Forschungsprojekts zur Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung des Gehalts an eluierbaren Alkalien in Mauermörteln und für die Erlaubnis zur Publikation der zusammenfassenden Ergebnisse.

Steffen Laue

Verwitterung von Naturstein durch lösliche Salze an wechselfeuchter Luft

1 Einleitung

Die Kristallisation von löslichen Salzen bei sich ändernden Klimabedingungen trägt an vielen Gebäuden zur Schädigung von Natursteinen bei und wurde bereits in vielen Publikationen beschrieben (u.a. ARNOLD, 1992 oder ZEHNDER, 2002).

Salzionen werden in wässrigen Lösungen innerhalb des Porensystem eines Gesteins transportiert. Wo das Wasser verdunstet, konzentrieren sich die Lösungen mit den in ihnen gelösten Salzionen auf, die Ionen können nicht mit dem Wasser verdampfen. Wird die Sättigung der Lösung bzgl. einer Salzart erreicht, kristallisiert dieses. In der Regel vermehrt sich die Salzmenge am selben Ort durch Aufkonzentrierung und weiterer Ausfällung. Das kristallisierte Salz reagiert anschließend auf die sich ändernden Umgebungsbedingungen. Diese Einflüsse aus der Umgebung sind z.B. aufsteigende Feuchtigkeit, die gegebenenfalls neue Salzionen transportieren kann, oder die Feuchtigkeit der Luft, die zu Auflösungsprozessen von Salzen bzw. bei Trockenheit zur Kristallisation neuer Salze aus der Mauerwerkslösung führen kann.

Um die in einem Gestein ablaufenden Verwitterungsprozesse verstehen zu können, sollte also stets das miteinander kommunizierende System "poröses Gestein - Salzlösung - kristallisiertes Salz - Klima" (Abb.1) betrachtet werden. Dieses System befindet sich aufgrund der sich ständig ändernden Umgebungsbedingungen immer in einem Ungleichgewicht, das aber stets bestrebt ist, ein Gleichgewicht herzustellen, d.h. die herrschenden Konzentrationsunterschiede zwischen dem porösen Baumaterial und Umgebung auszugleichen (z.B. Wasseraufnahme und -abgabe, Temperaturunterschiede).

Sind die Parameter dieses Systems hinreichend bekannt, kann anschließend konservatorisch eingegriffen und können geeignete Maßnahmen für die nachhaltige Pflege des zu schützenden Steins eingeleitet werden.

In dieser Arbeit werden zunächst die Parameter, die bei der Salzverwitterung eine Rolle spielen, genannt, bevor anschließend anhand von Fallbeispielen verschiedene Salzverwitterungsprozesse erläutert werden.

2 Das System "poröser Stein - Salzlösung - kristallisiertes Salz - Klima"

2.1 Poröser Stein

Anzahl, Größe und Anordnung von Poren in einem Gestein sind für den Transport einer Salzlösung verantwortlich. Die dabei herrschenden Kräfte sind überwiegend Kapillarkräfte. Die Anordnung der Poren wird durch das Gefüge eines Bausteins beschrieben (u.a. FITZNER & BASTEN, 1992 oder MIRWALD, 1997).

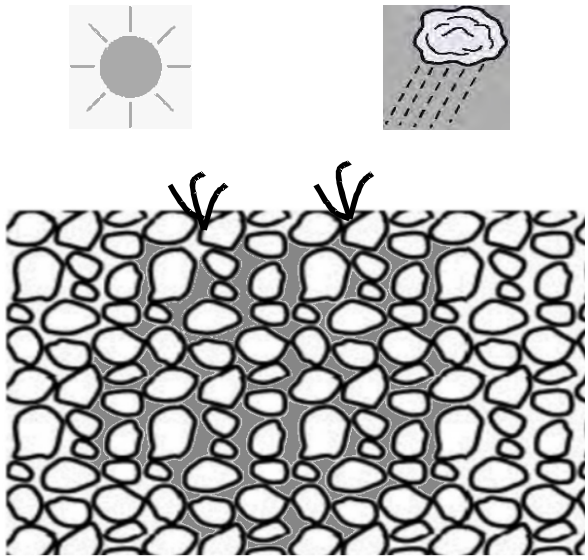


Abb.1: Systems „Poröser Baustoff - wässrige Lösung - kristallisiertes Salz - Klima“ (schematische Darstellung)

Die Analyse des Porengefüges sowie Messungen zur Wasseraufnahme und –abgabe eines Bausteins ermöglichen es, die Wassertransportprozesse abzuschätzen. Durchlichtmikroskopie an zweifarbig imprägnierten Dünnschliffen gibt zusätzlich Aufschluss darüber, welche Poren an den Wassertransportprozessen und damit auch an den Ionentransportprozessen teilnehmen (HAMMECKER, 1993 oder LAUE, 1997).

Die Porensysteme der einzelnen Baugesteine sind verschieden und transportieren daher die Feuchtigkeit mit den gelösten Salzionen ganz unterschiedlich. Während beispielsweise viele Sandsteine Wasser gut kapillar transportieren können, besitzen magmatische Gesteine häufig kaum Poren, die kapillar aktiv sind.

Wasser transportierende Natursteine nehmen Salzlösungen auf und transportieren sie. Bei Übersättigung der Salzlösung kristallisieren Salzminerale im Porenraum. Wenn Salze in einem porösen Stein kristallieren, geschieht dies dort, wo das Wasser mit den gelösten Ionen verdunstet.

Bei kaum Wasser transportierenden Bausteinen (z.B. viele Magmatite, dichte Kalksteine oder Marmore) können Salzionen in gelöster Form nicht oder nur in geringem Maß in den unverwitterten Stein eindringen. In der Regel finden bei diesen Gesteinstypen Salzverwitterungsprozesse im Oberflächenbereich des Steins statt. Erst bei fortgeschrittener Verwitterung (z.B. thermisch induzierter Spannungen im Gefüge) wird bei diesen

Steinen ein Porensystem geschaffen, dass es Salzlösungen ermöglicht, tiefer kapillar in den Stein einzudringen und dort Verwitterungsprozesse auszulösen.

Das Porensystem eines Bausteins ist also ein wichtiger Parameter für die Aufnahme und den Transport von Salzlösungen.

2.2 Salzlösung

Salzionen sind in Wasser gelöst und werden mit der Lösung transportiert. In porösen Bausteinen werden Salzlösungen überwiegend durch Kapillarkräfte transportiert. Die Salzlösungen bestehen in der Regel aus den Anionen SO_4^{2-}, Cl^-, NO_3^- , HCO_3^- und CO_3^{2-} sowie aus den Kationen Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} und NH_4^+ (ARNOLD & ZEHNDER, 1990). Es handelt sich jeweils um Ionengemische, in denen die einzelnen Ionenspezies unterschiedlich stark angereichert sein können. Welche Ionen in welchen Konzentrationen vorliegen, hängt u.a. von der Quelle der Salzionen, den Wassertransportmechanismen, den Lösungs- und Aufkonzentrierungsprozessen sowie von den bereits stattgefundenen Kristallisationsereignissen ab.

In aufkonzentrierten Salzlösungen beeinflussen sich die verschiedenen Ionen durch Wechselwirkungskräfte gegenseitig, was veränderte Kristallisations- und Lösungseigenschaften von Ionengemischen gegenüber reinen Salzsystemen zur Folge hat. (u.a. STEIGER et al., 1998).

2.3 Kristallisiertes Salz

Es gibt ca. 50 verschiedene Mauerwerkssalze, die sich hinsichtlich ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften unterscheiden, die in Tabellenwerken (z.B. Handbook of Chemistry and Physics, 1999 oder GMELIN, 1928) oder speziellen Publikationen (ARNOLD & ZEHNDER, 1990 oder BLÄUER BÖHM, 1994) nachgeschlagen werden können. In Tabelle 1 wird eine Auswahl von häufig an Bauwerken kristallisierenden Salzen dargestellt.

Welche Salze kristallisieren, hängt vom Salzionenangebot in der Lösung und von den thermodynamischen Bedingungen (u.a. Temperatur und Wasserdampfpartialdruck) ab. Wichtige Eigenschaften für das Kristallisations- und Auflösungsverhalten sind die Löslichkeit und die Hygroskopizität der Salze.

Die Löslichkeit eines Salzes gibt die maximale Menge des Salzes an, die in einer wässrigen Lösung gelöst werden kann, oder umgekehrt betrachtet, wie hoch die Konzentration an Ionen in der Lösung sein muss, damit das Salz kristallisieren kann. Die unterschiedlichen Löslichkeitseigenschaften der Salze haben zur Folge, dass Salzionen in porösen Steinen, die Wasser kapillar transportieren können, auch unterschiedlich weit transportiert werden. ARNOLD & ZEHNDER (1990) haben die vertikale Verteilung von Salzanreicherungen in einer Wand in Abhängigkeit von ihrer Löslichkeit beschrieben. Bei vertikal aufsteigender Feuchte kristallisieren schwer lösliche Salze zuerst (es werden nicht so viele Ionen benötigt, um die Sättigung der Lösung zu erreichen) und reichern sich in den unteren Bereichen einer Wand an, während leichter lösliche Salze mit der Mauerfeuchte höher kapillar wandern können, da u.a. mehr Ionen für ihre Kristallisation benötigt werden.

Als Hygroskopizität bezeichnet man die Fähigkeit von Salzen, Feuchtigkeit aus der Luft an sich zu ziehen. In der Folge fängt das Salz an zu verklumpen bis es schließlich zerfließt. Das hygroskopische Verhalten beruht auf dem Prinzip der Dampfdruckerniedrigung über Salzlösungen. Ein spezifisches Maß für die Hygroskopizität ist die Gleichgewichtsfeuchte eines Salzes. Sie ist diejenige Luftfeuchte, die sich über der gesättigten Salzlösung einstellen würde und ist – wie die Löslichkeit – temperaturabhängig.

Tabelle 1: Eine Auswahl von häufig an Bauwerken kristallisierenden Salzen mit ihren Löslichkeiten und Gleichgewichtsfeuchten, Daten aus ARNOLD & ZEHNDER (1990) und Handbook of Chemistry and Physics (1999) und der jeweils dort zitierten Literatur, k.A. = keine Angaben in der Literatur, P = Phasenübergang zu Mirabilit (aus STEIGER & DANNECKER, 1998)*

Mineralogischer Name	**Chemische Formel**	**Löslichkeit in g/100ml [T in °C]**	**Gleichgewichtsfeuchte in % [T in °C]**
Calcit	$CaCO_3$	0,001 [20]	ca. 100
Natrit	$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	21,5 [0]	96,5 [15]
Gips	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	0,24 [20]	ca. 99
Hexahydrit	$MgSO_4 \cdot 6H_2O$	30,3 [20]	k.A.
Epsomit	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	71,0 [20]	86,9 [10]
Thenardit	Na_2SO_4	16,1 [20]	bei ca. 71% P* [15]
Mirabilit	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	11,0 [0]	95,2 [15]
Antarticit	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	536 [20]	33,7 [10]
Bischofit	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	167 [0]	33,3 [15]
Halit	NaCl	35,7 [0]	75,6 [15]
Sylvin	KCl	23,8 [20]	85,9 [15]
Nitrocalcit	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	266 [0]	54,0 [15]
Nitromagnesit	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	125 [0]	55,9 [15]
Nitronatrit	$NaNO_3$	92,1 [25]	76,5 [15]
Nitrokalit	KNO_3	13,3 [0] 31,6 [20]	95,4 [15]

Beispielsweise löst sich Halit (Natriumchlorid) bei einer Temperatur von 15°C bereits bei einer relativen Luftfeuchte von 75,6% auf, während Sylvin (Kaliumchlorid) erst bei einer relativen Luftfeuchte von 85,9% zerfließen würde (siehe Tabelle 1). Werden die in diesem Beispiel genannten relativen Luftfeuchten aber unterschritten,

würde Sylvin (KCl) unterhalb von 85,9% und Halit (NaCl) unterhalb von 75,6% wieder kristallisieren. Die Gleichgewichtsfeuchte von Halit ist niedriger als die von Sylvin: Halit hat stärkere hygroskopische Eigenschaften als Sylvin.

In der Regel handelt es sich bei Mauerwerkslösungen aber nicht um Salzlösungen mit nur einem Ionenpaar, sondern um Salzionengemische (Kapitel 2.2), was die Vorgänge der Kristallisation und des Sichwiederauflösens wesentlich verkompliziert. Diese Beobachtungen wurden an verschiedenen Gebäuden gemacht (siehe z.B. ARNOLD & ZEHNDER, 1990, oder Kapitel 4.2). Das Verhalten von Salzionengemischen kann auch thermodynamisch berechnet werden (z.B. STEIGER & DANNECKER, 1995).

Einige Salze können in verschiedenen Hydratstufen auskristallisieren, d.h. Salzionenpaare können unterschiedlich viele H_2O-Moleküle in ihr Kristallgitter einbauen, Beispiele sind Natriumsulfate und Natriumkarbonate. In welcher Hydratstufe siekristallisieren, hängt von den thermodynamischen Bedingungen des betrachteten Systems ab (am Gebäude sind es u.a. die Klimabedingungen). Natriumsulfate können z.B. als

Thenardit [Na_2SO_4] oder Mirabilit [$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$] kristallisieren (siehe auch STEIGER & DANNECKER, 1998). Ein Beispiel für die Kristallisation von Natriumsulfaten wird in Kapitel 4.4 vorgestellt. Ein weiteres Beispiel für die Kristallisation von Hydratsalzen ist das System der Magnesiumsulfate Hexahydrit [$MgSO_4 \cdot 6H_2O$] und Epsomit [$MgSO_4 \cdot 7H_2O$] (SIEDEL, 1997).

2.4 Klima

Aus den oben genannten Wechselwirkungen des miteinander kommunizierenden Systems wird der besondere Einfluss des Faktors Klima deutlich. Während im Laborversuch die Dampfphase über einer Salzlösung von der Zusammensetzung der Lösung bestimmt wird, stehen an Gebäuden relativ kleine Mengen von Salzlösungen in Kontakt mit großen, praktisch unbegrenzten Mengen an Wasserdampf in der Luft. Also spielt die Dampfphase (Luftfeuchtigkeit) - und dadurch auch die Temperatur an Gebäuden - eine entscheidende Rolle und hat Einfluss auf die Ionenkonzentration in der Mauerwerkslösung bzw. auf das kristallisierte Salz.

Grundlagen zu Klimamessungen in historischen Gebäuden werden beispielsweise bei KÜNZEL & HOLZ (1991) vermittelt. Die für ein Gebäude in Bezug zur Salzverwitterung wichtigen Klimaparameter, ihre Erfassung und Auswertung, sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Klimaparameter	Ermittlung	Aussagen
Lufttemperatur	Messgeräte: - Thermometer - Thermohygrograph - elektronische Messsysteme und Datenspeicherung	Temperaturschwankungen beeinflussen: - relative Luftfeuchte - Thermisches Dehnen und Schrumpfen Temperatur hat Einfluss auf die: - Gleichgewichtsfeuchte der Salzlösung - Löslichkeit der Salze
Relative Luftfeuchtigkeit	Messgeräte: - Hygrometer - Psychrometer - Thermohygrograph - Elektronische Messsysteme und Datenspeicherung	Schwankungen der relativen Luftfeuchte bewirken: - Auflösen von (hygroskopischen) Salzen (Bildung von Feuchtigkeit → eventuell weitere Lösungsprozesse) - Kristallisation von Salz - Quellen und Schrumpfen bestimmter Baumaterialien
Oberflächentemperatur	Messgeräte: - Temperaturfühler - Infrarot-Thermometer - elektronische Messsysteme und Datenspeicherung	- Oberflächentemperaturverteilung verschiedener Materialien - Ist Lufttemperatur >Oberflächentemperatur findet Kondensation an entsprechender Stelle statt - Bestimmung des kältesten Punktes eines Gebäudes → dort zuerst Kondensation
Absolute Feuchte (Wassergehalt der Luft)	- Berechnung aus Lufttemperatur und Luftfeuchte	In Korrelation mit dem Außenklima ist festzustellen: - Wann findet Feuchteaustausch mit dem Außenklima statt - Gibt es zusätzlichen Wassereintrag? (z.B. Grundfeuchte)
Taupunkttemperatur	- Berechnung aus Oberflächen-temperatur, Luftfeuchte und Wasserdampf-sättigungsdruck	Unterschreitung der Taupunkttemperatur führt zur Kondenswasserbildung
Grenzwertfeuchte im Oberflächenbereich	- Berechnung aus Lufttemperatur, Oberflächentemperatur und Luftfeuchte	- Hypothetischer Wert der relativen Luftfeuchte an der Steinoberfläche: → Abschätzen der relativen Luftfeuchte in den Bereichen, wo die Salzverwitterungsprozesse stattfinden In Korrelation mit der Luftfeuchtigkeit: - Feststellen, wann sorptive Wasseraufnahme oder abgabe des Steins stattfindet

Tabelle 2: Klimaparameter und ihr Einfluss auf salzbelastete Natursteine

3 Untersuchungsmethode zur Erfassung des Kristallisationsverhaltens von Salzen bei wechselnden Klimabedingungen

Mit der zerstörungsfreien Methode „Monitoring von Referenzflächen in Kombination mit Klimamessungen“ lässt sich an einem z.B. mit Naturstein ausgestatteten Gebäude die zum Schadensbild beitragende Wechselwirkung von Salz und Klima ermitteln.

Zunächst ist eine Schadensdokumentation zusammen mit einer Salzkartierung zu erstellen. Diese Dokumentation gibt u.a. Hinweise zur Probenahme.

Sind Salzausblühungen an dem Objekt erkennbar, können diese entnommen und mittels Mikroskopie, Mikrochemie (BLÄUER BÖHM, 1994) oder Röntgendiffraktometrie identifiziert werden. Dadurch ist bekannt, welches auskristallisierende Salz zu dem Schaden an dem Werkstein geführt hat. Eine Probenahme ist aber immer nur eine Momentaufnahme. Das Ergebnis gibt keinen Aufschluss darüber, ob das kristallisierte Salz ein aktuell zur Schädigung beitragendes Salz ist oder ob es eventuell aus einem nicht mehr aktiven Schadensprozess resultiert. Mittels sogenannter Referenzflächen (Beobachtungsfelder) ist es möglich, die Veränderungen der kristallisierenden Salze (Umwandlungen, Neukristallisationen), den aktiven Schadensprozess zu ermitteln. Dazu legt man zu jeder kristallisierten Salzart eine Referenzfläche an, die – eventuell zuvor von Ausblühungssalzen gereinigt - regelmäßig bzgl. Neukristallisationen untersucht werden. In Kombination mit Klimamessungen (siehe Tabelle 2) kann so festgestellt werden, zu welchem Zeitpunkt innerhalb eines Jahres welche Salze unter welchen Klimabedingungen den Schaden auslösen.

Auch wenn keine ausgeblühten Salze an den Schadenszonen sichtbar sind, ist es sinnvoll Referenzflächen anzulegen und diese zu beobachten. Abhängig von dem Ionengehalt der Mauerwerkslösung und von den Umgebungsbedingungen können nämlich zu einem bestimmten Zeitpunkt Salzkristalle auskristallisieren und bestimmt werden.

Sind keine Ausblühungssalze sichtbar und erlaubt die Objektsituation die Entnahme von z.B. Bohrmehl, können in einem wässrigen Auszug der Probe quantitativ die Ionen bestimmt werden. Auch dieses Messergebnis ist lediglich eine Momentaufnahme und aussagekräftig nur für eine bestimmte Stelle des Steins. Es liefert uns aber zusätzlich Informationen über Umfang und Qualität der Belastung des Mauerwerks mit Salzionen. Möglicherweise ist aufgrund der Analysenergebnisse ersichtlich, welche Salzsysteme an der beprobten Stelle kristallisieren könnten. Werden quantitative Salzanalysen in Höhen- und Tiefenprofilen einer Wand erstellt, können Aussagen über die qualitative und quantitative Salzionenverteilung getroffen werden.

Je mehr über die Salzart, -verteilung und -konzentration an bzw. in einem Stein und das Porensystem des Steins bekannt ist, desto besser sind Schadensprozesse nachvollziehbar und umso konkreter können die Konservierungsvorschläge für eine nachhaltige Pflege des Steins ausfallen.

Die theoretischen Betrachtungen sollen nun anhand einiger Fallbeispiele näher erläutert werden.

4 Fallbeispiele

4.1 Kristallisation schwerlöslicher Salze an wechselfeuchter Luft

Beispiel: Kristallisation von Gips [$CaSO_4 \times 2H_2O$] am Brandenburger Tor in Berlin

Das Brandenburger Tor wurde 1789-1791 aus verschiedenen Elbsandsteintypen erbaut. Während bei den Restaurierungen um ca. 1900 schlesische Sandsteine verwendet worden sind, wurde der Wiederaufbau nach dem Zweiten Weltkrieg wieder mit Elbsandsteinen ausgeführt (DAMASHUN & JEKOSCH, 1990). Das Tor ist nach der Wiedervereinigung 1990 gereinigt worden.

Auf der Oberfläche einiger Elbsandsteine der Varietät Cotta waren im Sommer 2000 längliche, teilweise flammenartige, dunkle Bereiche zu beobachten (Abb.2).

Zur Klärung der Genese dieser Verwitterungsphänomene, wurden an 3 verschiedenen Stellen des Bauwerks Bohrkerne im Grenzbereich zwischen verfärbten und unverfärbten Bereichen gezogen. Diese Proben wurden mittels Durchlichtmikroskopie von Dünnschliffen und Rasterelektronenmikroskopie im Hinblick auf die Existenz einer Kruste im Oberflächenbereich, auf die Porenstruktur sowie auf die kristallisierten Salze untersucht. Mit der Quecksilberporosimetrie wurde zusätzlich der Porenraum analysiert (ALTENBERGER et al., 2001).

Im Dünnschliff ist eine dunkle Kruste kaum zu erkennen, an einigen Stellen wird lediglich ein dünner schwarzer Film im µm-Bereich sichtbar.

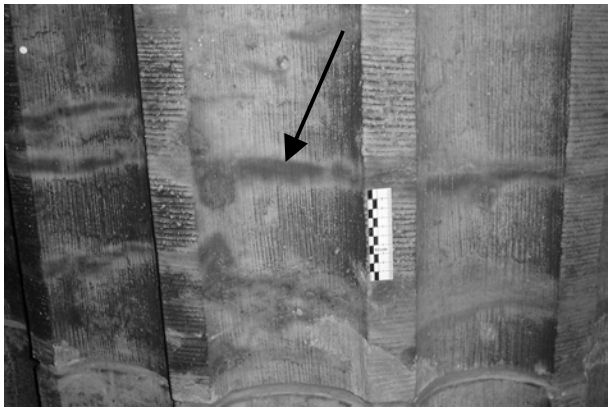


Abb.2: Brandenburger Tor, Westseite, Säule 5, Januar 2001: längliche dunkle Bereiche auf einer bestimmten Varietät des Cottaer Sandsteins

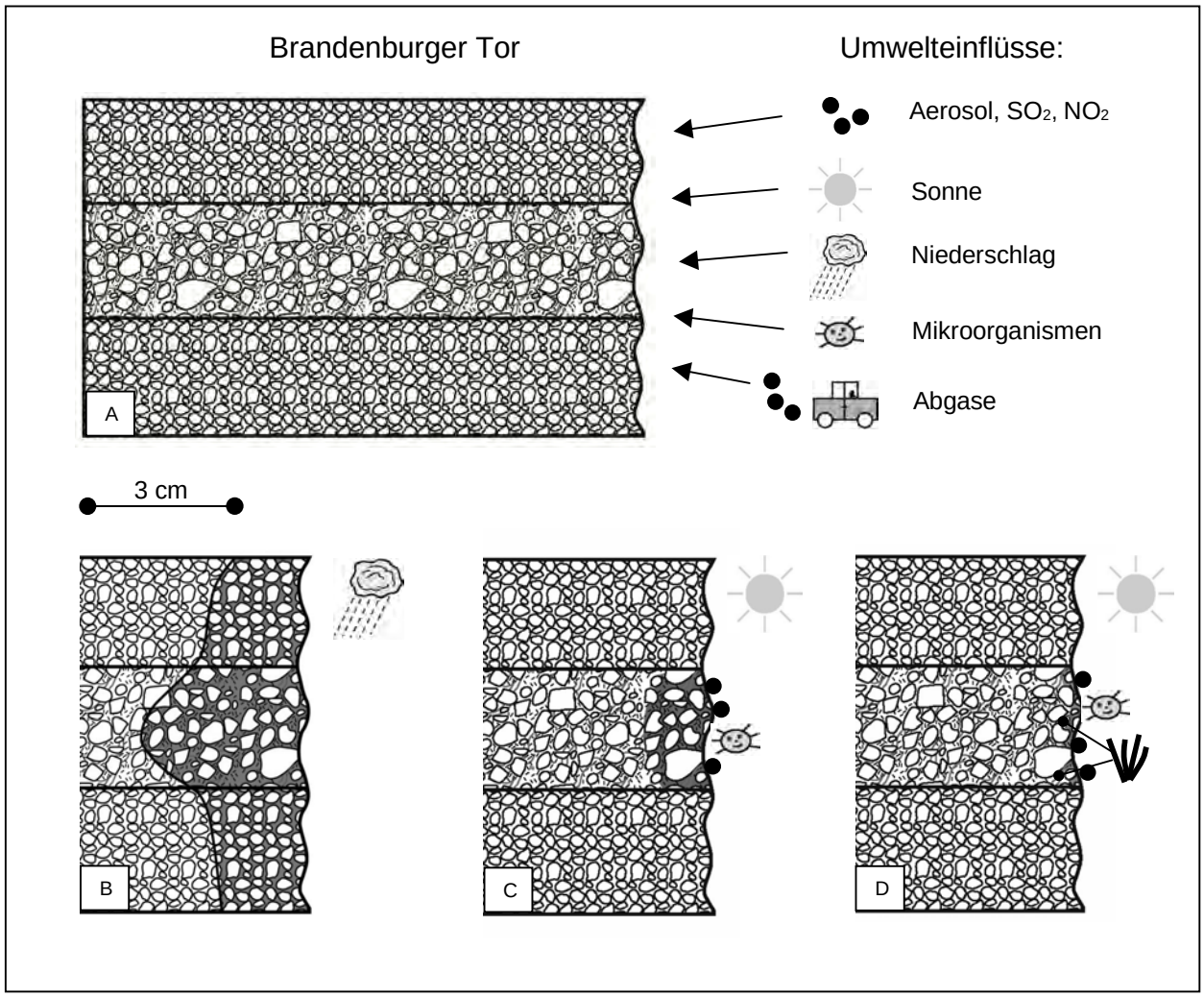


Abb.3: Verwitterungssituation für die untersuchte Varietät des Cottaer Sandsteins am Brandenburger Tor (schematische Darstellung), Erläuterungen siehe Text

Das Porensystem und die Porenfüllung unterhalb der Verfärbungen unterscheiden sich deutlich von denen in den Bereichen, in denen keine dunklen Verfärbungen auf der Oberfläche erkennbar sind. Das bedeutet, dass diese Varietät des Cottaer Sandsteins primär durch verschiedene Gesteinslagen mit unterschiedlichen Mineralgehalten ausgestattet ist.

Die Kornlagen hinter der unverfärbten Oberfläche des Werksteins bestehen aus gut sortierten Quarz-Kornlagen ohne Tonminerale und Fe-Verbindungen. Die Analyse des Porenraums in den hinteren Bereichen des Kerns mit der Quecksilberporosimetrie ergab ein Porenvolumen von 21,6 Vol.%.

Die Bereiche hinter den dunklen Verfärbungen dagegen sind durch schlecht sortierte Kornlagen aus überwiegend Quarz mit einem relativ hohen Anteil an feinkörnigen Tonmineralen und Eisenoxiden bzw. Eisenhydroxiden gekennzeichnet. Als lösliches Salz hat schwerlöslicher Gips [$CaSO_4 \cdot 2H_2O$] den Porenraum oberflächennah sekundär verdichtet. Der Porenanteil ohne sekundäre Gipskristalle ist in diesen Minerallagen mit 19,8 Vol.% etwas geringer als in den Lagen mit einer unverfärbten Oberfläche. Um dies zu ermitteln wurde der hintere Teil eines Bohrkerns mit der Quecksilberporosimetrie gemessen, auf diese Weise ging die sekundäre Verfüllung der vorderen Bereiche nicht in die Messergebnisse mit ein. Darüber hinaus konnte mit der Quecksilberporosimetrie nachgewiesen werden, dass die oberflächlich dunkel verfärbten Kornlagen einen höheren Anteil an kleineren Eingangsporen besitzen. Dies lässt auf ein höheres Feinporensystem in dem verfärbten gegenüber dem unverfärbten Bereich schließen und bestätigt damit die Untersuchungsergebnisse der Dünnschliffmikroskopie.

Im Rasterelektronenmikroskop zeigt sich, dass der dunkle Bereich des Sandsteins zusätzlich durch Flugaschepartikel und mikrobiologische Besiedlungen (Pilzhyphen und Sporen) gekennzeichnet ist.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass die beobachteten lagenartigen Verfärbungen der Werksteinoberfläche mit dem Gefüge des Bausteins in Zusammenhang stehen. Verwitterungssituation und Umweltbelastung des untersuchten Werksteins am Brandenburger Tor sind in Abb.3A schematisch dargestellt.

Die unterschiedlichen Kornlagen des Sandsteins repräsentieren verschiedene Schüttungen mit unterschiedlicher Mineralzusammensetzungen in einem flachmarinen Ablagerungsmilieu während der Sedimentation des

Lockergesteins. Bei der Diagenese (Verfestigung des Gesteins) kam es in bestimmten Kornlagen des Gesteins zu Tonmineralneubildungen (VOIGT, 1995), dadurch hat sich in diesen Lagen ein feines Netz an Poren ausgebildet.

Ein feinporiges Gefüge hat bestimmte Eigenschaften, die eine Vielzahl von Stoffwechselreaktionen begünstigen können. U.a. ist eine größere Oberfläche vorhanden, an der Kapillar-, Adhäsions- und Absorptionskräfte wirken und Fällungsreaktionen stattfinden können. Solche Reaktionen haben möglicherweise syn- oder postdiagenetisch zur Anlagerung von Eisenverbindungen im Feinporennetz geführt, die heute einzelne Kornlagen ocker-rostbraun aussehen lassen.

Das Feinporennetz ist – z.B. bei Niederschlägen – für den Wasserhaushalt eines Bausteins von entscheidender Bedeutung. Hier finden bei entsprechender Porenraumgeometrie (Größe und Anordnung der Poren zueinander) bevorzugt kapillare Transportprozesse statt (Abb. 3B). Beim Austrocknen des Gesteins sind die feinporigen Bereiche diejenigen, in denen das Wasser zuletzt verdunstet (Abb. 3C). In diesen Bereichen existieren durch Tonminerale und Eisenhydroxide große Mineraloberflächen, die Wassermoleküle z.B. adhäsiv binden können. Mit der Feuchtigkeit bleiben aber auch die im Wasser gelösten Salzionen in diesen Bereichen in Lösung bis ihre Sättigungsgrenze erreicht ist, und es zur Kristallisation kommen kann (Abb. 3D).

Die beobachteten Gipskristalle in den Feinporen des Cottaer Sandsteins nahe der Oberfläche sind ein Beispiel für diesen Prozess. In diesem Fall ist schwerlöslicher Gips das kristallisierte Salz. Als Salzionenquellen kommen im Falle des Brandenburger Tor Baumaterialien und Atmosphäre in Frage. Die Löslichkeit von Gips ist gering (siehe Tabelle 1). Dies bedeutet, dass für eine Übersättigung der Lösung mit Gips die Konzentration an Ca^{2+}- und SO_4^{2-}-Ionen lediglich ca. 0,2 g/100ml betragen muss. Andererseits löst sich der bereits kristallisierte Gips nur schwer wieder auf (es wird über einen längeren Zeitraum hinweg ein hoher Wassereintrag benötigt), was zur Folge hat, dass sich Gips an wechselfeuchter Luft allmählich in den Poren anreichert und sie verdichtet.

Darüber hinaus begünstigt die hohe Feuchtigkeit im Feinporennetz die Adhäsion von Aerosol und die Lebensbedingungen für Mikroorganismen, die unter dem Rasterelektronenmikroskop identifiziert worden sind.

Die Bildung von schwarzen Verfärbungen auf bestimmten Bausteinen des Cottaer Sandsteins des Brandenburger Tors ist also primär durch das Feinporensystem des Baugesteins angelegt. Zur Verfüllung von Poren in Oberflächenbereichen des Bausteins durch schwerlöslichen Gips und zur Ausbildung der oberflächlichen Verfärbungen trägt also eine Kombination von mehreren Prozessen bei, die hier noch einmal zusammengefasst werden:

- beim Verdunsten der Bausteinfeuchtigkeit nach Niederschlägen ist eine erhöhte Feuchtigkeit in den feinporigen Bereichen des Werksteins festzustellen.
- an der feuchten und feinporigen Oberfläche findet bevorzugt Adhäsion von Luftinhaltsstoffen wie Staub, Flugaschen, Ruß und organischen Verbindungen statt (Abb. 3C, beim Brandenburger Tor kann von einem erhöhten Anteil an Kraftfahrzeuggasen bzw. Abrieb von Reifen, Brems- und Straßenbelägen ausgegangen werden).
- Immission von Schadstoffen, erhöhte Feuchtigkeit und große Oberfläche des Feinporensystems führen zu Stoffwechsel-, Lösungs-, Aufkonzentrierungs- und Fällungsreaktionen, die u.a. zur Ausbildung und Anreicherung von Gips in den Poren geführt haben (Abb. 3D).
- Feuchte Feinporensysteme bilden außerdem einen geeigneten Lebensraum für Mikroorganismen.

Generell kristallisiert Gips, wie bereits erwähnt, aufgrund seiner Löslichkeitseigenschaft und seiner hohen Gleichgewichtsfeuchte an Bauwerken relativ schnell und wird nur dann wieder gelöst, wenn größere Wassermengen zur Verfügung stehen. Das führt dazu, dass Gips als Ausblühungssalz häufig zu finden ist. Indem es sich allmählich aufkonzentriert, stellt es einen wesentlichen Schadensfaktor bei der Salzverwitterung von Natursteinen dar.

4.2 Kristallisation hygroskopischer Salze an wechselfeuchter Luft

Beispiel Krypta St. Maria im Kapitol, Köln

St. Maria im Kapitol wurde um die Mitte des 11.Jh. errichtet. Unter dem Chor befindet sich die Krypta, deren Mauern noch aus romanischen Bausteinen bestehen und deren Gewölbe noch Fragmente romanischer Wandmalereien enthalten. Mitte der 1990er Jahre wurde die Krypta im Rahmen des BMBF-Forschungsprojekts „Erhaltung historischer Wandmalereien“ an der Fachhochschule Köln ausführlich untersucht (u.a. BLÄUER BÖHM, 1996, HÄFNER, 1996 oder LAUE, 1997). Es sind extreme Salzschäden sowohl an Naturbausteinen, als auch an verputzten Wänden zu beobachten. Die wichtigsten Ereignisse für die Schadensentwicklung in der Krypta sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Krypta St. Maria im Kapitol, Daten zur Bau- und Nutzungsgeschichte

Zeit	Ereignis
1065	Kirchweihe
1838 bis 1853	Nutzung als Salzlager
1945	Zerstörung im 2.Weltkrieg
1950	Beginn des Wiederaufbaus
1969	Einbau einer Fußbodenheizung
seit 1987	Luftheizung durch Fernwärme

Um die Gründe für die aktuelle Schadenssituation zu ermitteln, war es notwendig, die Geschichte der Krypta im Hinblick auf Schadensquellen (z.B. Salzlager) zu untersuchen und eine genaue Analyse der heute am Objekt stattfindenen Schadensprozesse durchzuführen.

Mit der in Kapitel 3 beschriebenen Methode des ‚Monitoring von Referenzflächen in Kombination mit Klimamessungen' wurde die Krypta untersucht. Zunächst wurden repräsentative Ausblühungsproben entnommen und analysiert: Halit (NaCl) und Nitronatrit ($NaNO_3$) sind die in der Krypta am häufigsten kristallisierenden Salze. Untergeordnet kristallisieren an einigen Stellen auch Thenardit [Na_2SO_4], Mirabilit [$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$], Trona [$Na_3H(CO_3)_2 \cdot 2H_2O$], Epsomit [$MgSO_4 \cdot 7H_2O$] und Gips [$CaSO_4 \cdot 2H_2O$]. Das Kristallisationsverhalten der Salze wurde an Referenzflächen in Kombination mit Klimamessungen über einen Zeitraum von 3 Jahren untersucht.

Verantwortlich für das Klima in der Krypta ist eine instationäre, automatische Luftheizung: Wird eine Grundtemperatur von ca. 10°C unterschritten, sorgt die Heizung für die Regelung der Raumtemperatur, zu Nutzungszeiten ist dafür eine Temperatur von ca. 15°C ausschlaggebend. Etwa im Oktober eines jeden Jahres schaltet sich die Heizung automatisch ein. Bei Überschreiten dieser Temperatur schaltet sich die Heizung wieder aus. Das ist der Fall, sobald die Grund- bzw. Nutzungstemperatur durch Aufheizen wieder erreicht wird, bzw. im Frühjahr, wenn die Außentemperaturen generell ansteigen.

Das Raumklima der Krypta ist in Abb.4 dargestellt. Die Temperatur in der Krypta schwankt zwischen ca. 11°C im Winter und bis zu 20 °C im Sommer. Die relative Luftfeuchte variiert zwischen 30% und 80%, hohe relative Luftfeuchten oberhalb 65% konnten von Juni bis einschließlich September registriert werden. In Abb.4 ist zusätzlich der Kristallisationszeitraum der beiden Salze Halit und Nitronatrit dargestellt.

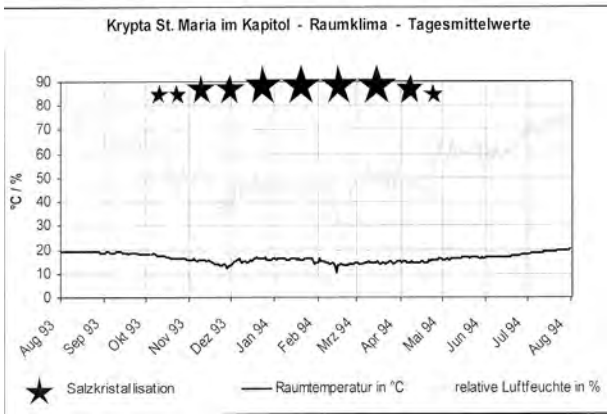


Abb.4: Krypta St. Maria im Kapitol, Raumklima und die Zeiten der Salzkristallisation von Halit und Nitronatrit von August 1993 bis August 1994

Die Untersuchung zur Wechselwirkung zwischen der Kristallisation der Salze und dem Raumklima hat ergeben, dass in der Krypta der Hauptschaden an denjenigen Wänden und Säulen entsteht, an denen die Salze Halit (NaCl) und Nitronatrit ($NaNO_3$) vorkommen. Der Grund dafür ist die hygroskopische Eigenschaft dieser beiden Salze. Bei einer relativen Luftfeuchte von über 75% während der Sommermonate haben sich Halit und Nitronatrit aufgelöst, die Salzionen befinden sich an oder in den Wänden in Lösung. Innerhalb des Luftfeuchtebereichs von ca. 65% - 75% beginnen Halit und Nitronatrit zu kristallisieren bzw. sich aufzulösen. Unterhalb von ca. 65% relativer Luftfeuchte wurde nur das Kristallisieren der beiden Salze beobachtet. Es besteht also eine Abhängigkeit zwischen dem Kristallisieren aus der Mauerwerkslösung bzw. dem Sichwiederauflösen der Salzphasen und der relativen Luftfeuchte: Wann immer sie unterhalb von ca. 75% schwankt, muss mit Auflösungs- und Kristallisationsprozessen der Salze Halit und Nitronatrit gerechnet werden. Die relative Luftfeuchte in der Krypta lag in den Wintermonaten überwiegend unterhalb und im Sommer oberhalb von 65%, so dass vor allem diese jahreszeitlichen Schwankungen für die Schäden in der Krypta verantwortlich gemacht werden können.

Abb. 5A und 5B zeigen eine Stelle aus dem Fußbodenbereich der Krypta: im Sommer und im Winter. Der verbaute Naturstein ist hier Drachenfels Trachyt. Obwohl diese Stelle sich am Fußboden ca. 1,5 m unterhalb der Geländeoberkante des Außenniveaus befindet, handelt es sich bei dem Feuchtefleck nicht um aufsteigende Grundfeuchte, sondern um hygroskopische Feuchte.

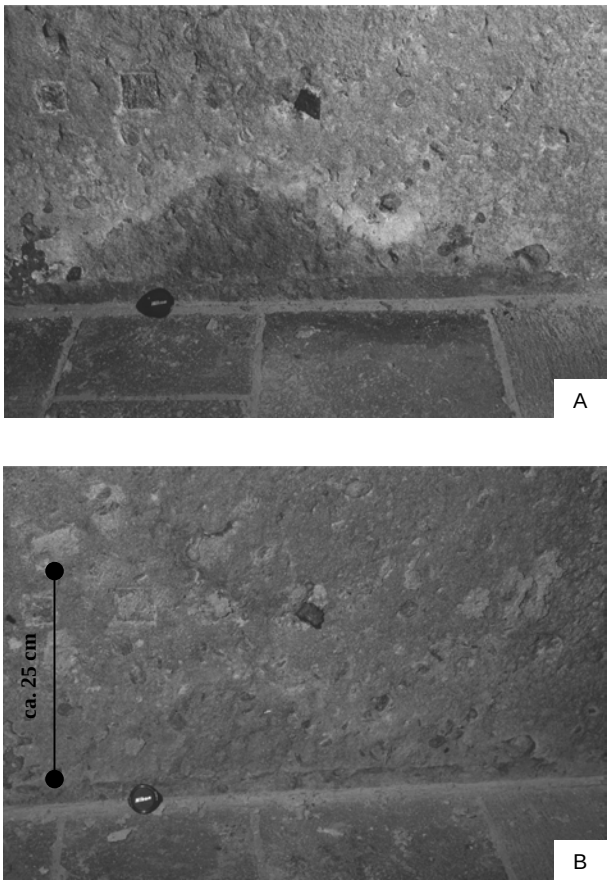


Abb.5: Krypta St. Maria im Kapitol, Bereich Fußboden / Wand
A:August 1994, hygroskopische Feuchte auf der Oberfläche des Drachenfels Trachyts;
B: November 1993, trocken;

Ein Maß für die Hygroskopizität eines Salzes ist – wie in Kapitel 2 bereits erwähnt – seine Gleichgewichtsfeuchte. Entsprechend Tabelle 1 haben Halit und Nitronatrit eine

Gleichgewichtsfeuchte von ca. 76% bei 15°C (durchschnittlicher Temperaturbereich in der Krypta). Laut diesen Angaben sollten sie sich also unterhalb von 76% aufgelöst haben und oberhalb dieses Wertes kristallieren. Tatsächlich haben die Beobachtungen und Messungen in der Krypta aber gezeigt, dass das Auflösen und Rekristallisieren dieser Salze bereits bei einer relativen Raumluftfeuchte zwischen 65% und 75% erfolgt. Dies hat zwei Gründe:

1. Die Gleichgewichtsfeuchte der jeweils kristallisierenden Salze hängt von der Ionenzusammensetzung in der Mauerwerkslösung ab. Die Wechselwirkung der Ionen untereinander führt in der Regel zu einer Gleichgewichtsfeuchteerniedrigung, was STEIGER & DANNECKER (1995) auch thermodynamisch berechnet haben. Das bedeutet, dass es bereits unterhalb der Gleichgewichtsfeuchte der reinen Salze zu Auflösungen bzw. Kristallisationen kommt – das Maß der Gleichgewichtsfeuchte, ist von der jeweiligen Ionenzusammensetzung der Salzlösung abhängig.

2. Im Wandoberflächenbereich, wo das Monitoring durchgeführt wurde, ist die Temperatur im Sommer immer etwas niedriger, d.h., dass die relative Luftfeuchtigkeit (die sogenannte Grenzwertfeuchte) hier höher ist als die Raumluftfeuchte. Die tatsächlich herrschende Luftfeuchtigkeit im Wandoberflächenbereich ist also höher als die gemessene Raumluftfeuchte und damit näher an dem theoretischen Wert der Gleichgewichtsfeuchte der reinen Salze.

Die Ursache für die Erniedrigung der relativen Raumluftfeuchte und damit für die zyklische Salzverwitterung liegt im Beheizen der Krypta während der Wintermonate. Würde nicht geheizt werden, würde auch die Gleichgewichtsfeuchte für die in der Mauerwerkslösung enthaltenen Salze möglicherweise nicht unterschritten werden, die Salzionen blieben in Lösung und würden somit nicht mehr an der jahresperiodischen Verwitterung teilnehmen.

4.3 Temperaturabhängige Kristallisation von Salzen

Beispiel Chor St. Johannes, Neustadt/W. – Mußbach

Die spätgotische Kirche St. Johannes zu Mußbach wurde 1370 erbaut und zu Beginn des 18.Jh. in einen katholischen und einen protestantischen Bereich geteilt. Eine Mauer im Chorbogen trennt den katholischen Chor von dem protestantischen Kirchenschiff. Während das alte Kirchenschiff auch heute noch den Protestanten als Gotteshaus dient, erhielt die katholische Gemeinde 1959 einen Kirchenneubau. Seit dieser Zeit ist der alte Chor von St. Johannes ungenutzt. Ende der sechziger Jahre wurden im Chor gotische und auch jüngere Wandmalereien freigelegt, die seitdem der Verwitterung ausgesetzt sind. Dieses Bauwerk wurde mit der gleichen Methode im Rahmen des o.g. Forschungsprojekts untersucht.

Eines der Schadensbilder sind zyklisch auftretende Salzausblühungen von Nitrokalit (KNO_3) bis in 1,50 m Höhe im Ostteil des Chores. Diese periodischen Ausblühungen wurden über einen Zeitraum von 3 Jahren beobachtet. Es konnte dabei jeweils im Winter - einmal im November und teilweise ein zweites Mal ungefähr im Februar - ein neuer Salzrasen an verschiedenen Referenzstellen kartiert werden. Das Klima im Chor von St. Johannes spiegelt gedämpft das Außenklima wieder (Abb.6). Die relativen Luftfeuchten schwanken während des ganzen Jahres, die Lufttemperatur beträgt im Sommer teilweise über 20°C, im Winter werden Werte unterhalb des Gefrierpunktes erreicht.

Es konnte kein Zusammenhang zwischen den Ausblühungen und den unterschiedlichen relativen Luftfeuchten ermittelt werden. Auffallend war aber, dass die Kristallisationsphasen immer mit einem Lufttemperaturabfall des Außenklimas, der kurze Zeit später auch im Chor stattfand, einhergehen. Beispielsweise fiel die Außentemperatur Anfang Februar 1993 innerhalb weniger Tage von +8°C auf -5°C und die Innentemperatur im gleichen Zeitraum von 7°C auf 2°C. Während desselben Zeitraums pendelte die relative Außenfeuchte zwischen 80% und 90% und die relative Innenfeuchte zwischen 60% und 75% (Abb.6).

Bei der Interpretation der Klimadaten in Zusammenhang mit der Beobachtung der Ausblühungsphasen müssen auch die Löslichkeitseigenschaften von Nitrokalit (KNO_3) berücksichtigt werden: Nitrokalit ist ein Salz, dessen Löslichkeit sehr temperaturabhängig ist (siehe Abb.7): So lösen sich nach STEPHEN & STEPHEN (1963) bei z.B. 20°C 24 Gew.-% KNO_3 in einer wässrigen Lösung, während bei 0°C nur 11,7% Gew.-% KNO_3 gelöst werden, also über die Hälfte weniger. Je niedriger also die Temperatur des Systems KNO_3 - H_2O, desto größer ist auch die Wahrscheinlichkeit der Übersättigung einer KNO_3-reichen Lösung und somit des Ausblühens von Nitrokalit.

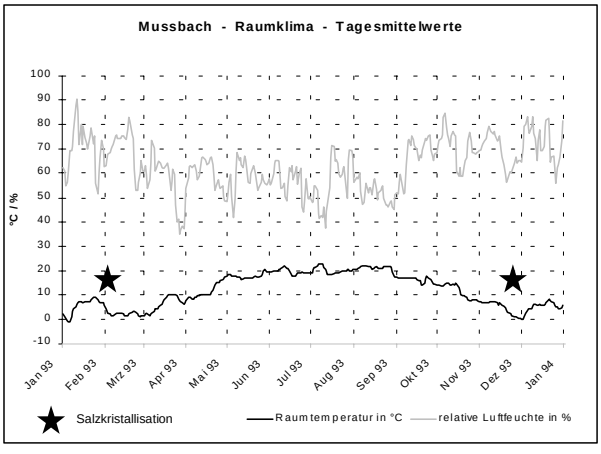


Abb.6: Chor St. Johannes, Raumklima und die Zeiten der Salzkristallisation von Nitrokalit von Januar 1993 bis Januar 1994

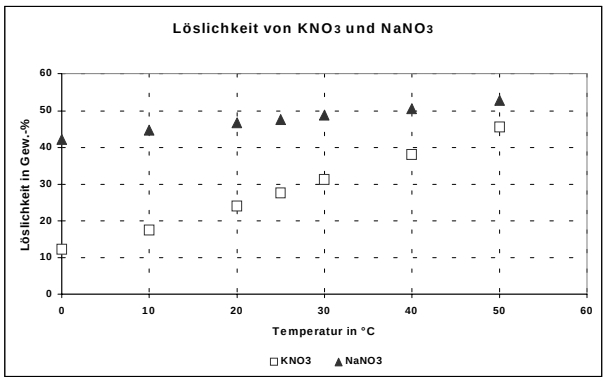


Abb.7: Löslichkeit von Nitronatrit und Nitrokalit in Abhängigkeit von der Temperatur, Daten aus STEPHEN & STEPHEN (1963)

Diese Erkenntnis, die im Chor durchgeführten Messungen und Beobachtungen führen zu folgendem Modell für die zyklischen Kaliumnitratausblühungen in Mußbach:

In den Sommermonaten bildet sich aufgrund der Temperatur- und Feuchtebedingungen eine KNO_3-haltige Lösung in den Porenräumen im unteren Sockelbereich des Chores. Unterhalb von 10°C sorgen fallende Temperaturen aufgrund der Reduzierung der Löslichkeit von Kaliumnitrat für eine Übersättigung der KNO_3-haltige Lösung, sodass Nitrokalit in Form von Whiskern und Fläumen ausblüht. Mit der Temperaturerniedrigung während der Kristallisationsphasen war jedes Mal auch ein leichter Rückgang der relativen Feuchtigkeit um ca. 10-20% zu verzeichnen, sodass wahrscheinlich beide Klimafaktoren - Absenkung der Temperatur und erniedrigte relative Luftfeuchte - dazu beigetragen haben werden, dass die Mauerwerkslösung an Kaliumnitrat-Ionen übersättigt wurde.

Die Ausblühungsphase dauert so lange an, bis die Übersättigung an Ionen in der Lösung aufgehoben ist. Eine mögliche Erklärung für das Ende der Kristallisationsphasen ist die jeweils gemessene Temperaturerhöhung im Raum. Durch die Temperaturerhöhung wird die Sättigungsgrenze von KNO_3 in der Mauerwerkslösung erheblich heraufgesetzt und damit unterschritten, was zur Beendigung der Ausblühungsphase führt.

Eine andere mögliche Erklärung für die Beendigung der Kristallisationsphase ist ein Feuchtenachschub aus dem Grundfeuchtebereich, der die Salzlösung verdünnen und damit zu einem Ende des Kristallwachstumes führen würde.

4.4 Kristallisation von Salzen in mehreren Hydratstufen

Beispiel Grottensaal im Neuen Palais, Potsdam

Der Grottensaal befindet sich im Erdgeschoss des Neuen Palais im Schlosspark Sanssouci und wurde zwischen 1765-1769 errichtet. Er ist an Wänden, Decke und Fußboden mit einer Vielzahl unterschiedlicher Bau- und Dekorationsmaterialien, wie z.B. Mineralen, Gesteinen, Fossilien, Conchilien und Stuckarbeiten, ausgestattet und stellt in dieser Form eine einzigartige geowissenschaftliche Sammlung dar. Die Ausstattungsstücke sind in einen Gipsmörtel in die Wände und Decken einbettet.

An den Ausstattungsstücken ist eine Vielzahl von Schäden festzustellen. Die stärksten Schäden finden sich in den Fensterbereichen zum Park hin, generell nimmt die Schadensintensität in Richtung Schlossinneres ab.

Sondierende Untersuchungen haben ergeben, dass bei den Verwitterungsprozessen im Grottensaal Salzkristallisationen eine große Rolle spielen (LAUE, 1998). Salzminerale kristallisieren auf und in unmittelbarer Nähe der Wandoberflächen, was zur Zerstörung der Baumaterialien führt.

Als Untersuchungsmethode zur Ermittlung der Schadensprozesse wurde wiederum die bereits beschriebene Methode ‚Monitoring von Referenzflächen in Kombination mit Klimamessungen' gewählt. Es war nicht möglich, im Grottensaal Proben für quantitative Salzanalysen zu nehmen.

In den Ausblühungsproben konnten die beiden Natriumsulfate Thenardit [Na_2SO_4] und Mirabilit [$Na_2SO_4 \cdot 10H_20$] nachgewiesen werden. In wenigen Proben konnte auch Gips analysiert werden, der aber auch vom Grottierungsmörtel stammen könnte, also nicht neu kristallisiert sein muss.

Die Quellen der Na^+-Salzionen sind wahrscheinlich alkalische Baumaterialien (Portlandzemente), die zu verschiedensten Zeiten zur Stabilisierung des Bauwerks eingebracht worden sind. Diese Baustoffe enthalten Alkalien (u.a. Na^+), die zu Alkalikarbonaten reagieren. Diese gehen bei geeigneten Feuchtebedingungen mit anderen autochtonen Salzen, z.B. mit den SO_4^{2-}-Ionen des Grottierungsmörtels Gips, Reaktionen ein und wandeln sich in leichtlöslichere Salze – wie z.B. Natriumsulfate – um (ARNOLD, 1985).

Abb.8 zeigt die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte im Grottensaal von Januar 1998 bis Januar 1999. Die Klimakurve ist typisch für einen unbeheizten Raum: Das Innenklima spiegelt ein gedämpftes Außenklima wider. Die Temperatur pendelt zwischen 5°C und 20°C, die relativen Luftfeuchten variieren überwiegend zwischen 40% und 75%, nur während einer längeren trockenen Kälteperiode im Dezember sank die relative Luftfeuchte auf Werte um 30%.

Klimamessungen in Kombination mit der Beobachtung der Referenzflächen ergaben, dass über das ganze Jahr hinweg Salzkristallisationen der beiden Natriumsulfate stattfinden.

Das hat folgende Gründe: Im Oberflächenbereich der Wände verdunstet Wasser - aufgestiegene Feuchte und an den Außenwänden dazu eingedrungenes Oberflächenwasser - aus den mit Ionen angereicherten Mauerwerkslösungen. Beim Verdunsten konzentriert sich die Salzlösung auf, und es kommt zur Kristallisation von Mirabilit.

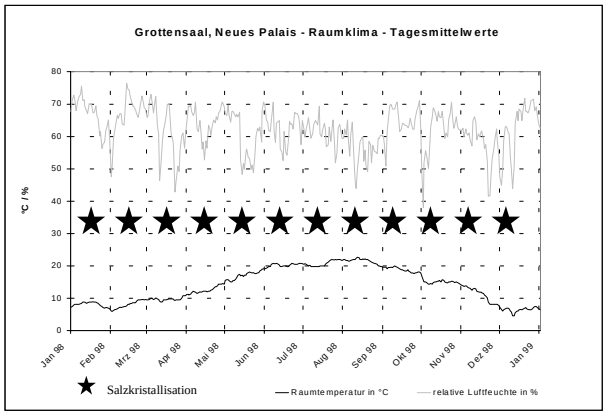


Abb.8: Grottensaal, Neues Palais, Raumklima und die Zeiten der Salzkristallisation von Nitrokalit von Januar 1998 bis Januar 1999

Abb.9 zeigt das Verhalten des Systems Wasser – Natriumsulfat. Dargestellt ist auf der Abzisse die Temperatur und auf der Ordinate die relative Luftfeuchtigkeit. Die Grafik verdeutlicht, dass das Verhalten der wässrigen Lösung und der Salze sowohl temperaturabhängig als auch luftfeuchteabhängig ist. Wenn z.B. bei 20°C eine Mauerwerkslösung verdunstet, wird Mirabilit die erste Phase sein, die kristallisiert. Thenardit würde oberhalb von ca. 33°C als erste Phase ausgeschieden.

Ein Fallbeispiel: Die Temperatur im Grottensaal beträgt konstant 20°C, und es herrscht eine hohe relative Luftfeuchte von 85%, wir befinden uns also in Abb.9 in Punkt X, das kristallisierte Salz ist Mirabilit. Sinkt nun die relative Luftfeuchte, bewegen wir uns entlang der gestrichelten Linie XY in Richtung Punkt Y. Wir erreichen den Punkt Y bei einer relativen Luftfeuchte von ca. 76%. Genau an diesem Punkt sind die beiden Salze Mirabilit und Thenardit im Gleichgewicht, das heißt, beide Salze können genau unter diesen Bedingungen (Temperatur 20°C, relative Luftfeuchte 7%) nebeneinander existieren. Unterhalb dieser relativen Luftfeuchte, z.B. entlang der grauen Strecke YZ, existiert nur das Salzmineral Thenardit.

Während also bei einer Temperatur von 20°C unterhalb von 76% das Mineral Thenardit ausblüht, kristallisiert oberhalb von 76% das Mineral Mirabilit.

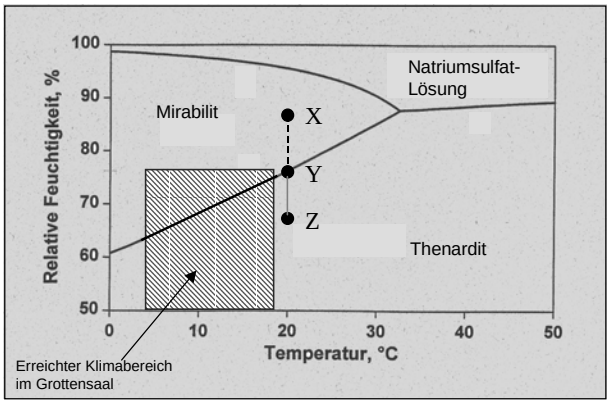


Abb.9: Phasendiagramm Natriumsulfatlösung - Thenardit - Mirabilit in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte (verändert nach STEIGER & DANNECKER, 1998), Erläuterung siehe Text

Der Umwandlungsprozess von Thenardit zu Mirabilit geht mit einer Volumenvergrößerung einher, die z.B. von PRICE & BRIMBLECOMBE (1994) mit 314% angegeben wird. Jedes Mal, wenn die kritische relative Luftfeuchtigkeit, die zur Kristallisation der jeweils anderen Phase führt, über- oder unterschritten wird, kommt es zu Umkristallisationsprozessen, die der eigentliche Motor für die Zerstörung sind. Da sich sowohl die Temperatur, als auch die relative Luftfeuchtigkeit im Grottensaal ständig ändern (siehe Abb.8 und 9), werden die kritischen Klimabereiche sehr oft überschritten, dementsprechend zahlreich sind die Schäden.

In Abb.9 ist darüber hinaus der im Grottensaal erreichte Klimabereich eingetragen. Es ist erkennbar, dass die Phasengrenze Thenardit/Mirabilit durch den im Grottensaal erreichten Klimabereich verläuft, was nochmals deutlich macht, dass die Umkristallisationsprozesse von Thenardit und Mirabilit im Grottensaal über das ganze Jahr hinweg stattfinden.

Folgender Ablauf der Schadensprozesse konnte für den Grottensaal ermittelt werden: Durch Grundfeuchte und durch Oberflächenwasser (Spritzwasser) erfolgt ein Feuchteeintrag ins Mauerwerk. Beim Verdunsten der Mauerwerkslösung konzentriert sich die Salzlösung auf, und es kommt - bei den ermittelten Temperaturbereichen im Grottensaal - zur Kristallisation von Mirabilit. Bei trockenem Klima – zwischen ca. 60% und 75% relativer Luftfeuchte, je nach Temperatur – findet eine Dehydratisierung von Mirabilit [$Na_2SO_4 \cdot 10\ H_20$] zu Thenardit [Na_2SO_4] statt. Mirabilit ist bei diesen Feuchteverhältnissen nicht mehr stabil, es verliert sein Kristallwasser, Thenardit kristallisiert. Beim erneuten Anstieg der Luftfeuchte findet die Hydratation von Thenardit zu Mirabilit statt. Dieser Kristallisationsprozess geht mit einer Volumenzunahme einher. Bei diesen Hydrations- und Dehydrationsprozessen findet wahrscheinlich ein Zusammenbruch des einen Kristallsystems statt, rasch danach erfolgt die jeweilige Kristallisation der anderen Hydratstufe.

Dieser Effekt, Hydratation und Dehydratation, führt zum stetigen Umkristallisieren der Salze. Aus der damit einhergehenden Volumenzunahme bzw. -abnahme, resultieren die beschriebenen Schäden.

Die Zerstörungsprozesse im Grottensaal werden demnach durch zyklische Kristallisationsprozesse hervorgerufen. Unter bestimmten Temperatur- und Luftfeuchteverhältnissen führen Hydratations- und Dehydratationsereignisse bzw. Auflösungs- und Rekristallisationsprozese zur Verwitterung des Grottierungsmaterials.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Ein komplexes Zusammenspiel von Porensystem – Salzlösung – Salz – Klima ist für Salzverwitterungsprozesse an Natursteinen verantwortlich.

Diese Prozesse sind abhängig

- vom Gefüge des Gesteins, es definiert das Wasseraufnahmevermögen, die Qualität und Quantität des Wassertransports, die Wasserabgabe und damit auch die Lokalität der Salzkristallisation;
- von der Feuchtequelle (Art, Ort und Intensität)
- von den gelösten Salzionen und ihrer Konzentration in der Mauerwerkslösung;
- von den Eigenschaften des kristallisierten Salzes (u.a. Löslichkeit und Gleichgewichtsfeuchte);
- von dem an einem Bauteil wirkenden Mikroklima (Temperatur, relative Feuchte).

In der Regel ist nicht die einmalige Kristallisation von Salzen der Hauptschadensfaktor bei der Zerstörung von Naturstein, sondern das wiederholte Lösen, Rekristallisieren, Umkristallisieren und Aufkonzentrieren von Salzen. Dabei spielen die individuellen Eigenschaften der Salze, wie z.B. Löslichkeit oder Hygroskopizität eine wichtige Rolle.

Zur Behebung der Schadensursache ist die Ermittlung der Salzquellen dringend erforderlich. Geeignete Untersuchungsmethoden, u.a. ‚Monitoring von Referenzflächen in Kombination mit Klimamessungen' ermöglichen es, die ablaufenden Schadensmechanismen nachzuvollziehen.

Durch Salze hervorgerufene Schäden gehören zum Erscheinungsbild vieler Bauwerke. Die beschriebenen Fallbeispiele belegen die Komplexität der sie verursachenden Prozesse. Intensives Studium der Bauwerke und ihrer Geschichte bildet zusammen mit naturwissenschaftlichen – möglichst zerstörungsarmen – Untersuchungsmethoden die Voraussetzung für das Verständnis der Schadensabläufe. Auf dieser Grundlage ist es möglich, geeignete Konservierungsvorschläge im Hinblick auf präventive und nachhaltige Pflege historischer Bausubstanz aus Stein zu entwickeln.

6. Literatur

ALTENBERGER, U., LAUE, S. & OBERHÄNSLI, R. (2001): Mineralogisch – petrographische Untersuchungen am Brandenburger Tor in Berlin. Unveröffentl. Untersuchungs-bericht, Universität Potsdam, Institut für Geowissenschaften, 24 S.

ARNOLD, A. (1985): Moderne alkalische Baustoffe und die Probleme bei der Konservierung.- Arbeitsh. 31, Bayer. Landesamt f. Denkmalpflege, 152-162.

ARNOLD, A. (1992): Salze: Lästige weiße Ausblühungen oder Hauptschadensursache.- In: Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung 1990, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1-9.

ARNOLD, A. & ZEHNDER, K. (1990): Salt weathering on monuments.- In: Advanced workshop Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones, Pavia (Italy), 14.-21. September 1990.

BLÄUER BÖHM, C. (1994): Salzuntersuchungen an Baudenkmälern.- Kunsttechn. u. Konservierung, Jg. 8/94, H. 1, 85-103.

BLÄUER BÖHM, C. (1996): Bericht Laboranalysen zu Proben aus St.Maria im Kapitol, Köln, Apsodiole B.- unveröffentl. Abschlußbericht des Forschungsprojekts „Erhaltung historischer Wandmalerein", Fachhochschule Köln, 34 S.

DAMASHUN, F. & JEKOSCH, U. (1990): Petrographische Untersuchungen an Gesteinen des Brandenburger Tores.- Untersuchungsbericht, Mineralogisch-Petrographisches Institut und Museum am Fachbereich Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität Berlin, 32 Seiten.

FITZNER, B. & BASTEN, D. (1994): Gesteinsporosität - Klassifizierung, meßtechnische Erfassung und Bewertung ihrer Verwitterungsrelevanz.- Jahresberichte Steinzerfall - Steinkonservierung 1992, Verlag Ernst & Sohn Berlin, 19-32.

GMELIN (1928): Gmelins Handb. der Anorganischen Chemie.- Natrium, System-Nr. 21, Verlag Chemie GmbH, Berlin, 8, 758-769.

HÄFNER, K. (1996): Untersuchungsabschlussbericht St.Maria im Kapitol.- unveröffentl. Abschlußbericht des Forschungsprojekts „Erhaltung historischer Wandmalerein", Fachhochschule Köln, 60 S.

HAMMECKER, C. (1993): Importance des transferts d'eau dans la dégradation des pierres en oeuvre.- Dissertation de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 254 S.

Handbook of Chemistry and Physics (1999): 79th Edition, Ed.: LIDE, D.R., CRC Press Inc., Boca Raton, Florida.

KÜNZEL, H. & HOLZ, D. (1991): Bauphysikalische Untersuchungen in unbeheizten und beheizten Gebäuden alter Bauart.- IBP-Bericht FB-32/1991, IRB-Verlag, 1-88.

LAUE, S. (1997): Einfluß des Porenraums und des Raumklimas auf die Verwitterung von Steinen durch lösliche Salze.- Dissertation, FB Geowissenschaften, Universität Mainz, Tectum Verlag Marburg, 170 Seiten.

LAUE, S. (1998): Der Grottensaal im Neuen Palais – Voruntersuchungen für ein Restaurierungskonzept.- Kurzberichte der Jahrestagung Archäometrie und Denkmalpflege vom 23. - 25.September 1998 in Würzburg, 57-58.

LAUE, S. (2000): Klimaeinfluß auf die Zerstörung von Baudenkmalen durch lösliche Salze am Beispiel des Grottensaals im Neuen Palais.- Brandenburgische Umwelt Berichte (BUB), 8, 191-196.

MIRWALD, P.W. (1997): Physikalische Eigenschaften der Gesteine.- In: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmnalpflege, Hrsg.: Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e.V., Ebner Verlag, Ulm, 283-308.

PRICE, C. & BRIMBLECOMBE, P. (1994): Preventing salt damage in porous materials.- Prepr. Contr. Ottawa Congr., Preventive Conservation-practice, theory and research, Ed. Ashok Roy & Perrry Smith, IIC, London, 90-93.

SIEDEL, H. (1997): Behandlung substanzschädigender Salze im Naturstein. - In: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege.- Handbuch für den Steinmetzen und Steinbildhauer, Architekten und Denkmalpfleger. Ebner Verlag Ulm. 3.Auflage, 694–701.

STEIGER, M. & DANNECKER, W. (1995): Hygroskopische Eigenschaften und Kristallisationsverhalten von Salzgemischen.- Jahresberichte "Steinzerfall-Steinkonservierung" 1993, Verlag Ernst & Sohn Berlin, 115-128.

STEIGER, M. & DANNECKER, W. (1998): Die Bedingungen für die Kristallisation verschiedener Salzhydrate am Beispiel Thenardit/Mirabilit.- In: Jahresberichte "Steinzerfall-Steinkonservierung, Band 6, 1994-1996", Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 123-133.

STEIGER, M., NEUMANN, H.H., GRODTEN, T., WITTENBURG, C. & DANNECKER, W. (1998): Salze in Natursteinmauerwerk – Probenahme, Messung und Interpretation.- In: Denkmalpflege und Naturwissenschaft – Natursteinkonservierung II.- Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 61-91

STEPHEN, H. & STEPHEN, T. (1963): Solubilities of inorganic and organic compounds.- Pergamon Press, Oxford, S. 116 u. S.180.

VOIGT, T. (1995): Faziesentwicklung und Ablagerungssequenzen am Rand eines Epikontinentalmeeres – Die Sedimentationsgeschichte der Sächsischen Kreide.- Dissertation an der TU Bergakademie Freiberg, 130 S.

ZEHNDER, K. (2002): Beobachtung von Salzverwitterungsprozessen am Objekt.- Beitrag zur Tagung „Mauersalze und Architekturoberfläche“, 29.1.-3.2.2002 in Dresden, in Druck.

Danksagung

Für die gute Zusammenarbeit an den untersuchten Bauwerken bedanke ich mich sehr herzlich den Eigentümern, Denkmalpflegern, Restauratoren und Kollegen der Naturwissenschaften.

Für kritische und anregende Diskussionsbeiträge zu den Untersuchungsergebnissen an den hier vorgestellten Denkmälern danke ich sehr herzlich Uwe Altenberger, Andreas Arnold, Christine Bläuer Böhm, Klaus Häfner, Daniel Jeannette, Uwe Kalisch, Roland Oberhänsli, Stephan Pfefferkorn, Michael Steiger und Konrad Zehnder.

Hans-Werner Zier

Untersuchung der Salzbelastung – Analysenmethoden, Bewertung, Grenzwerte

1 Vorbemerkungen

Die Kenntnis von Salzbelastungen in der Bausubstanz alter Gebäude ist Voraussetzung für die sachgerechte Planung von Sanierungsmaßnahmen.

Es muss prinzipiell davon ausgegangen werden, dass in allen Baustoffen Salze enthalten sind. Einige Baustoffe - z. B. Gips - sind selbst reine Salze.

Salze werden dann als bauschädlich eingestuft, wenn sie durch chemische Reaktionen und oder Umkristallisation zu signifikanten Schäden an Baustoffen, Bauteilen und Bauwerken führen.

Neben der Salzart und der Konzentration sind baustoffspezifische Faktoren – wie z. B. Art und Menge der Poren, Festigkeit - für das Ausmaß von Schadwirkungen verantwortlich.

Die Baustoffe selbst sind eine Salzquelle. In Bindemitteln, in Ziegeln, in Anstrichen und Natursteinen sind immer Anteile wasserlöslicher Salze enthalten. Häufig sind diese Anteile aber gering und führen während der Nutzung zu keinen Schäden.

Nutzungsbedingte Einflüsse können zu einer Anreicherung der in den Baustoffen vorhandenen Salze führen. Vor allem durch Feuchteeinwirkungen werden Salze mobilisiert und in der Nähe von Verdunstungsbereichen angereichert. So können zunächst in geringen Konzentrationen vorhandene unschädliche Salze zu Schadsalzen werden.

Eine weitere Salzquelle stellt die Umwelt dar. Hier können natürliche Umwelteinflüsse wie salzhaltige Grundwässer oder Salzsprühnebel in Nähe des Meeres zu Salzeinträgen in die Materialien führen.

Es treten aber auch anthropogen verursachte Salzbelastungen, die über die Luft, den Boden und Niederschläge in Materialien eingetragen werden, auf. Zu den zuletzt genannten zählen Sulfate und Stickstoffverbindungen aus Verbrennungsprozessen, Nitrate aus landwirtschaftlicher Nutzung oder spezielle Einträge aus Emissionen von Industriebetrieben.

Die Schadwirkungen der Salze in porösen Baustoffen, wie Natursteinen, Ziegeln und Mörteln, stehen im engen Zusammenhang mit dem Vorhandensein von Wasser.

Wasser ist Transport- und Reaktionsmedium für die Auflösung und Umkristallisation von Salzen erforderlich und führt zu Kristallisationsdrücken im Material. Die gleiche Wirkung kann durch Anlagerung und Abgabe von Wasser an Salze bei bestimmten Temperaturen und atmosphärischen Drücken erreicht werden.

Salze können aber auch chemische Reaktionen eingehen und dann über Treiberscheinungen zu Schäden führen. Aus weniger löslichen Salzen können sich lösliche Salze bilden. Die leicht löslichen Salzen führen dann zu den zuvor genannten Schadwirkungen.

Die Bewertung der Schadwirkungen von Salzen in Baustoffen erfordert deshalb zwingend Kenntnisse über die vorhandenen Salzarten, deren Eigenschaften sowie Eigenschaftsveränderungen in Abhängigkeit von Umgebungsveränderungen.

In der Praxis werden die Salzbewertungen nach verschiedensten Maßstäben durchgeführt. Im einfachsten Fall werden Salze einfach ignoriert oder die Belastung lediglich verbal eingeschätzt. Aus Kostengründen werden oft einfache halbquatitative Tests zur Bestimmung der Salzart für quantitative Aussagen herangezogen.

Eine Bewertung der Größenordnungen von Belastungen fehlt häufig oder Grenzwerte werden nicht richtig interpretiert.

Aus diesen Gründen soll nachfolgend auf Fragen von Grenzwerten für Salzbelastungen und Grenzen einfacher Nachweismethoden eingegangen werden.

Für Fragestellungen zu komplexeren Untersuchungen zur Salzbelastung in Natursteinmauerwerk sei hier z. B. auf STEIGER u.a. (1998) verwiesen.

2 Grenzwerte für Salzbelastungen

In der Literatur finden sich Angaben für Grenzwerte von Salzbelastungen. Diese Grenzwerte sind aber lediglich als Orientierungswerte zu werten. Die Vielzahl spezifischer Eigenschaften der salzbelasteten Materialien und die daraus resultierenden möglichen Wechselwirkungen kann nicht vollständig berücksichtigt werden.

SCHMITZ, BÖHNING, & GOERDT-HOFACKER (1991) zeigen zum Beispiel ein „Nomogramm zur Bestimmung der Schadensklasse von Baustoffversalzung“. In diesem werden auf der y- Achse die „Masse des Wassers in Gramm“ (unterer Teil des Nomogramms) und die „Ionenmasse in Milligramm / Baustoffmasse in kg“ (oberer Teil des Nomogramms) angegeben. Im Nomogramm sind Linien gleicher „Ionenkonzentration in der Lösung in Milligramm pro Liter“ (oben im Nomogramm) bzw. gleicher „Masse des Baustoffs in Gramm“ (unten im Nomogramm) über der x-Achse („Verhältnis Masse Wasser / Masse Baustoff“) dargestellt. Diesem Nomogramm werden außerdem Schadsalzklassen für Sulfat-, Chlorid- und Nitrationen zugeordnet.

Zusätzlich ist eine Tabelle mit Schadensklassen in Abhängigkeit vom Salzgehalt angegeben (Tabelle 2.1).

Gleiche Größenordnungen für Belastungen weisen ARENDT & SEELE (2000) aus (Tabelle 2.2).

Grenzwerte speziell für Chloridionen werden von FRIESE & POHLMANN (1986) angeben. Diese Werte dienten zur Bewertung der Möglichkeit einer „elektrokinetischen" Trocknung des Mauerwerks. Die Größenordnungen der Werte für Belastungen entsprechen den der zuvor aufgeführten Literaturquellen (Tabelle 2.3)

Auch im WTA-Merkblatt 4-5-99/D zur Beurteilung von Mauerwerk werden Angaben zu Salzgehalten, bei denen mit Schadwirkungen zu rechnen ist, gemacht (Tabelle 2.4).

Die in Tabelle 2.4 angegebenen Werte lassen überwiegend höhere Gehalte in den Bewertungsstufen mittlere und beginnende hohe Belastungen zu als die in den zuvor aufgeführten Quellen enthaltenen Grenzwerte.

Ergänzend werden nachfolgend die Wertungen nach ÖNORM B3355-1 (1995) aufgeführt. Auch hier werden Angaben für die Bewertung von Salzgehalten anhand der Anionengehalte gemacht (Tabelle 2.5).

Die in Tabelle 2.5 angegebenen Werte liegen wieder deutlich unter den in Tabelle 2.4 zitierten. Es wird davon ausgegangen, dass in allen Literaturquellen gewisse Erfahrungswerte bei der Festlegung der Grenzen für Salzbelastungen Berücksichtigung fanden. Auffallend ist, dass bei allen hier angeführten Literaturquellen lediglich Anionenkonzentrationen angegeben werden. Zur Verdeutlichung der Bedeutung der Kationen in Salzen sind deshalb in Tabelle 2.6 die Löslichkeiten von einigen Salzen in Abhängigkeit von der An-/Kationen-Kombination mit angegeben.

An Alkalien gebunden können auch Carbonate als bauschädliche Salze auftreten. Grenzgehalte für wasserlösliche Carbonate werden aber in allen hier zitierten Literaturquellen nicht berücksichtigt.

Ausgehend von den erheblichen Einflüssen der Kationen muss bei Bewertungen der Salzbelastung deren Nachweis gefordert werden. Die ausschließliche Erfassung der Anionen kann nur einen orientierenden Charakter für die Bewertung der Belastung haben.

Nachfolgend soll deshalb auf einige einfache Methoden zur orientierenden Erfassung von Salzgehalten und die Grenzen dieser Methoden eingegangen werden.

3 Nachweismöglichkeiten für Schadsalze

Als einfache Nachweismethoden werden häufig die gravimetrische Bestimmung von Gesamtsalzgehalten und Anionennachweise mittels Teststäbchen angewendet. Der Grund liegt im scheinbar schnellen und kostengünstigen Erhalt von Aussagen zur Salzbelastung.

Ebenfalls zu schnellen Ergebnissen führt die Anwendung von elektrochemischen Messungen.

Bei allen der zuvor aufgeführten und auch den meisten anderen auf quantitative Bestimmungen ausgerichteten Nachweismethoden müssen die bauschädlichen Salze zunächst aufgeschlossen werden.

3.1 Aufschlussverfahren

Voraussetzung für den Nachweis von bauschädlichen Salzen ist die Überführung der Salze in eine wässrige Lösung. Nachfolgend sollen deshalb zunächst einige Beispiele für mögliche Aufschlüsse angeführt werden.

Die DIN 38414 Teil 4 (1984) ist als Verfahren auf „feste, pastöse und schlammige Materialien" anwendbar und somit auch für Baumaterialien geeignet. Nach dieser Norm werden Probenansätze von etwa 100 g Trockenmasse in eine Weithalsflasche mit 2000 ml Volumen gegeben, mit 1 l destilliertem Wasser versetzt, langsam über Kopf gedreht oder geschüttelt und bei Raumtemperatur über 24 Stunden eluiert. Zwischenzeitlich kann die Messung der elektrischen Leitfähigkeiten erfolgen und so der Lösungsfortschritt verfolgt werden.

Nach der ÖNORM B3355-1 (1995) werden mindestens 10 g Probe mit der 10fachen Menge entmineralisierten Wasser versetzt und mindestens 24 Stunden gelagert. Zwischenzeitlich ist der Ansatz 3 mal aufzuschütteln. Auch hier wird auf die Möglichkeit der Messung elektrischer Leitfähigkeiten verwiesen.

Den Versatz des getrockneten Probenmaterials mit der 50fachen Menge „demineralisiertem, abgekochtem und gekühlten Wasser", eine Elution über eine Stunde unter ständigem Schütteln und die anschließende Filtration schlagen KNÖFEL & SCHUBERT (1993) für Mörtel vor.

Von FRIESE (1991) wird für die Vorbereitung von Leitfähigkeitsmessungen an pulverisierten Mauerwerksproben beschrieben: „In der Praxis hat sich bewährt, Probematerial und Wasser in einem Gewichtsverhältnis von 1 : 1 zu mischen und nach etwa 10 Minuten, die zum Herauslösen der Salze ausreichend sind, die feste Phase durch Filtration abzutrennen."

LEVELT & VAN LEEUWENSTIJN (1992) trocknen Pulverproben bei 105°C und eluieren 10 g des Materials 16 Stunden lang in 100 ml destilliertem Wasser unter ständigem rühren.

Aus den aufgeführten Beispielen lässt sich bereits die Spannbreite der gebräuchlichen Aufschlussverfahren erkennen.

Aus eigenen Erfahrungen kann hinzugefügt werden, dass häufig nur geringe Probemengen (teilweise weniger als 1 g) zur Verfügung stehen oder Aufschlüsse von quellfähigen Materialien (z. B. Bentonit-Cellulose-Kompressen) bei geringen Mischungsverhältnissen Wasser / Feststoff (wie 1 :1) eine Elution stark beeinträchtigen.

Tabelle 2.1: Schadensklassen in Abhängigkeit vom Salzgehalt [nach SCHMITZ, BÖHNING, & GOERDT-HOFACKER (1991)]

Schadensklasse Klasse	(mol Salz / g Baustoff)*10^{-6}	Wirkung
0	<= 3	keine Beeinträchtigung zu erwarten
1	> 3 bis 8	keine akuten Beeinträchtigungen, jedoch bei Planungen, z. B. Putzen, Versalzung berücksichtigen
2	> 8 bis 25	erhöhte hygroskopische Wasseraufnahme, Baustoffzermürbung
3	> 25 bis 80	starke Ausblühungen, dauerhafte Durchfeuchtung

Tabelle 2.2: Belastungsstufen mit bauschädlichen Salzen - hier auf lösliche Anionen bezogen [nach ARENDT & SEELE (2000)]

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

Tabelle 2.3: Auswirkungen verschiedener Chloridionenkonzentrationen auf das Mauerwerk [nach FRIESE & POHLMANN (1986)]

Chloridionenkonzentration (Mol/g Mauerwerk)	Auswirkungen auf das Mauerwerk
< 3 x 10^{-6} (3 mmol/kg)	„Keine Versalzung, das Mauerwerk kann ohne Schwierigkeiten elektrokinetisch getrocknet werden.“
3 x 10^{-6} – 8 x 10^{-6} (3 - 8 mmol/kg)	„Erhöhter Salzgehalt im Mauerwerk, eine Trocknung des Mauerwerks mit Hilfe elektrokinetischer Verfahren ist noch möglich, nasse Flecken durch hygroskopische Eigenschaften der Salze sind in der Regel nicht zu erwarten.“
8 x 10^{-6} - 8 x 10^{-5} (8 – 80 mmol/kg)	„Starker Salzgehalt im Mauerwerk, eine elektrokinetische Trocknung ohne vorherige Entsalzung ist nicht mehr möglich. Selbst bei nachträglich eingezogenen Horizontalsperren können an den Wänden feuchte Flecken verbleiben, verursacht durch die hygroskopischen Eigenschaften der Chloride. Diese Flecken treten besonders bei hohen relativen Luftfeuchten auf. Das Mauerwerk hat – selbst wenn keine aufsteigende Feuchtigkeit mehr vorliegt – eine hygroskopische Restfeuchte von 2 - 5%.“
> 8 x 10^{-5}	„Extrem hohe Versalzung, die hygroskopischen Restfeuchten sind oft > 5%, selbst bei nachträglich eingezogenen Horizontalsperren kommt es zu Putzabsprengungen, auch dann, wenn das Mauerwerk neu verputzt wurde.“

Tabelle 2.4: „Bewertung der schadensverursachenden Wirkung verschiedener Salzionen in Mauerwerkskörpern (Angaben in M.-%) [nach WTA-Merkblatt 4-5-99/D]

Chloride [1]	< 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5
Nitrate	< 0,1	0,1 – 0,3	> 0,3
Sulfate [2]	< 0,5	0,3 – 1,5	> 1,5
Bewertung [3]	Belastung gering – Maßnahmen im Ausnahmefall erforderlich	Belastung mittel – Weitergehende Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt (Salzverbindung, Kationenbestimmung) erforderlich Maßnahmen im Einzelfall erforderlich	Belastung hoch – Weitergehende Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt (Salzverbindung, Kationenbestimmung) erforderlich Maßnahmen erforderlich

[1] Bei tragwerksichernden Maßnahmen, wie dem Einbau von Ankern/Nadeln, ist bei Chloridbelastungen > 0,1 M.-% auf die Auswahl besonderer Stahlgüten und speziell rezeptierter Verpreß-/Verfüllmörtel zu achten.

[2] Beurteilung bezogen auf leicht lösliche Sulfate; besonders zu bewerten sind sulfathaltige Baustoffe.

[3] Für die Entscheidung über das Erfordernis von Maßnahmen sind nicht allein die Ergebnisse der Salzuntersuchung ausschlaggebend.“

Ausgehend von diesen Erfahrungen werden deshalb Zusätze der 10 oder 20fachen Wassermenge zum getrockneten Probenmaterial zur Elution empfohlen.

Aus Untersuchungen zum Lösungsverhalten von Gips kann abgeleitet werden, dass durch Verkürzung der Elutionszeiten keine selektive Gewinnung der leichter löslichen Salze möglich ist. Beim Auflösen von gipshaltigen Materialien wird bereits nach kurzer Zeit (wenige Minuten) die Löslichkeitsgrenze erreicht und bei erforderlicher oder gewünschter vollständiger Lösung des Gipses müssen höhere Mischungsverhältnisse Wasser / Feststoff gewählt werden.

Für eigene Untersuchungen werden Eluate aus getrocknetem Probematerial in der Regel durch Zusatz der 20fachen Mengen entionisierten Wassers und mehrmaligem Aufschütteln (3 bis 5 mal) über einen Zeitraum von 24 Stunden hergestellt. Die Trennung von fester und flüssiger Phase erfolgt anschließend durch Filtration.

3.2 Bestimmung von Gesamtsalzgehalten

Für die einfache Bestimmung von Gesamtsalzgehalten sollen hier nur zwei Beispiele angeführt werden.

Nach der ÖNORM B3355-1 (1995) kann die Gesamtsalzkonzentration nach dem zuvor beschriebenen Aufschluss entweder

„- gravimetrisch als Verdampfungsrückstand des Filtrates der Aufschlämmung oder

- indirekt über die Messung der spezifischen Leitfähigkeit des Filtrates“ bestimmt werden.

Von MEISEL (1988) wird eine Methode, nach der der zu untersuchende Stein fein gemahlen und anschließend etwa 10 Minuten in destilliertem Wasser gekocht wird, beschrieben. Das Steinmehl wird vor dem Kochen und nach dem Kochen sowie anschließender Trocknung gewogen. „Die Gewichtsdifferenz gibt die Menge herausgelöster Salze und Bindemittel an.“

Mit der letzten Ausführung deuten sich bereits Fehlermöglichkeiten dieser Methoden an. Es können neben Salzen auch andere Bestandteile aus dem Gestein herausgelöst werden. Auch eine Bewertung der Salzart und somit der bauschädlichen Wirkung ist nicht möglich.

3.3 Bestimmung von Anionen mit Teststäbchen

Zur Ermittlung von Salzarten in Eluaten werden häufig Teststäbchen für orientierende Untersuchungen eingesetzt.

REUL (1991) beschreibt, dass bereits durch die Prüfung des pH-Wertes Informationen über Salze erhalten werden können:

- pH–Werte über 9 können die Anwesenheit von Soda oder Pottasche anzeigen,

- pH-Werte um 7 lassen Natrium- oder Kaliumsulfat vermuten,

- pH-Werte über 9,5 bis 10 können höhere Soda- oder Kalkhydratkonzentrationen bedeuten.

Nach eigenen Erfahrungen kann die ausschließliche Bewertung über den pH-Wert jedoch leicht zu Fehlinterpretationen führen. Die Methode sollte deshalb nur zur ersten groben Bewertung der Eluate und zur Ermittlung von notwendigen Maßnahmen für andere Aufschlüsse, wie die Einstellung des pH-Wertes für den Einsatz von Teststäbchen für die halbquatitative Anionenbestimmung, dienen.

Als einfache chemische Untersuchungsverfahren für die halbquantitative Bestimmung von Anionen geben z. B. SCHMITZ, BÖHNING & KRINGS (1991) Teststäbchen für Nitrat, Chlorid und Sulfat an.

In der Praxis werden mit Teststäbchen halbquatitativ ermittelte Ergebnisse gelegentlich als quantitative Aussagen, ohne Hinweis auf die Grenzen dieser Tests, ausgegeben.

Aus diesem Grund sollen nachfolgend die Anwendungsgrenzen dieser Teststäbchen an Beispielen aufgezeigt werden.

Für Versuche sind neue Analysestäbchen für den Nachweis von Chlorid-, Nitrat- und Sulfationen vom Typ Merkoquant® der Fa. Merck ausgewählt worden. In der Tabelle 3.3.1 sind die Nachweisstufen für mögliche Bestimmungen zusammengestellt.

Vor dem Einsatz der Teststäbchen muss der pH-Wert der Eluate überprüft und gegebenenfalls durch Zugaben geeigneter Chemikalien eingestellt werden.

Die Nachweisstufen weisen die Größenordnungen der im Eluat bestimmbaren Anionen aus.

Zur Ermittlung der Einsatzgrenzen wird von in Tabelle 2.2 angegebenen Wertungen zur Größe von Belastungen mit wasserlöslichen Anionen in Baustoffen ausgegangen und verschiedene Aufschlussvarianten simuliert (Tabelle 3.3.2).

Ein Vergleich der hier simulierten Eluate mit den Nachweisstufen weist bereits einige Einsatzgrenzen für die Teststäbchen aus.

Eine beginnende Sulfatbelastung ist bei Aufschlüssen mit der 10fachen Wassermenge theoretisch gerade noch erfassbar; bei höheren Verdünnungen nicht mehr.

Nitrate sind über die hier dargestellten Bereiche mit den Teststäbchen gut erfassbar. Bei beginnenden hohen Belastungen ist eine Differenzierung zur Größenordnung bei Aufschlüssen unterhalb der 10fachen Wassermenge des Probegutes nicht mehr möglich.

Chloride sind nur in Aufschlüssen mit sehr geringen Wasser/Feststoff-Verhältnissen unter 5 in differenzierbaren Anteilen nachweisbar.

Auch wenn die Untersuchungen mit Teststäbchen unter Einhaltung aller erforderlichen Randbedingungen durchgeführt werden, können nur orientierende Größenordnungen für die Anionengehalte angegeben werden.

Tabelle 2.5: Wertung von Anionenkonzentrationen [nach ÖNORM B3355-1 (1995)]

Anionen	Belastung in % der Masse		
Chloride	unter 0,03	0,03 – 0,1	über 0,1
Nitrate	unter 0,05	0,05 – 0,15	über 0,15
Sulfate	unter 0,1	0,10 – 0,25	über 0,25
	keine Maßnahmen erforderlich	Maßnahmen im Einzelfall zu entscheiden	Maßnahmen dringend erforderlich

Tabelle 2.6: Löslichkeiten von Salzen in Wasser bei 20 °C in Abhängigkeit von der Zusammensetzung [nach RAUSCHER (1972)] (Angaben in g/100g Wasser)

Anion / Kation	Calcium	Magnesium	Natrium	Kalium
Chlorid	74,5	54,3	35,9	34,4
Nitrat	127,0	70,5	88,0	31,5
Sulfat	0,2	35,6	19,1	11,2
Carbonat	$1{,}5*10^{-3}$	$1{,}1*10^{-2}$	21,6	115,5

Tabelle 3.3.1: Nachweisstufen für Analysestäbchen

Analysestäbchen	Sulfat	Nitrat	Chlorid
Nachweisstufen im Eluat	unter 200, über 400, über 800, über 1200 mg/l Sulfat	10, 25, 50, 100, 250, 500 mg/l Nitrat	500, 1000, 1500, 2000, 3000 mg/l Chlorid
erforderlicher pH-Bereich	4 bis 8	1 bis 12	5 bis 8

Tabelle 3.3.2: Konzentrationen von Anionen im Eluat in Abhängigkeit vom Aufschluß

Anion	Sulfat		Nitrat		Chlorid	
Belastung	mittel	hoch	mittel	hoch	mittel	hoch
g/kg	2,4	7,7	1,6	5,0	0,9	2,8
Wasser/ Feststoff	Konzentration im Eluat in Abhängigkeit vom Aufschluß (in mg/l)					
1	2400	7700	1600	5000	900	2800
5	480	1540	320	1000	180	560
10	240	770	160	500	90	280
20	120	385	80	250	45	140
50	48	154	32	100	18	56
Nachweisstufen	unter 200, über 400, über 800, über 1200 mg/l		10, 25, 50, 100, 250 und 500 mg/l		500, 1000, 1500, 2000 und 3000 mg/l	

Tabelle 3.3.3: Ergebnisse von Vergleichsuntersuchungen zu Anionenbestimmungen

Probe	pH-Wert	Sulfationen (Gew.-%)		Nitrationen (Gew.-%)		Chloridionen (Gew.-%)	
		Test	AC	Test	AC	Test	AC
GREO2.1M	7,79	> 2,4	8,20	1,0	0,77	< 1,0	0,27
GREO2.5M	8,11	> 2,4	8,00	0,02	0,10	0	0
GREW4.1M	7,51	> 3,2	7,98	0,1	0,48	< 1,0	0,02
GREW4.2M	7,48	< 0,4	1,00	1,0	1,15	1,0	0,49
GRKO3.1	7,82	> 2,4	5,47	0,5	0,28	1,0	0,42
WRK1	7,99	> 2,4	5,58	0,5	0,21	< 1,0	0,2
WRK2	8,03	< 0,4	4,83	1,0	0,68	2,0	1,42
WRK5	8,09	< 0,4	2,17	1,0	1,31	2,0	1,02

Test = Nachweis mit Teststäbchen, AC = Nachweis mit Anionen-Chromatographie

Tabelle 3.4.1: pH-Werte und elektrische Leitfähigkeiten (bei 25°C) in Eluaten und Anionen im trockenen Feststoff von Proben der Kirch St. Johannis in Gera

Probe	pH-Wert	Leitfähigkeit in mS/cm	Sulfat in Gew.-%	Chlorid in Gew.-%	Nitrat in Gew.-%
GJT1OB3.2	10,41	1,027	0,54	0,128	0,484
GJT1SK2	7,95	2,054	3,17	0,086	0,187
GJT1SB3.2	11,04	3,230	2,49	0,673	0,999
GJT1WB3.2	9,53	1,269	1,01	0,188	0,315
GJT2NB1.3	11,73	3,130	0,21	0,467	2,362
GJT2NB1.4.1	11,82	2,871	0,20	0,434	2,107
GJT2NB1.4.2	11,34	2,638	0,26	0,419	2,406
GJT3BN1.2	12,84	5,830	0,11	0,206	1,015
GJT3BN1MD	12,88	6,030	0,15	0,220	1,102
GJT3BN1MH	12,85	5,600	0,13	0,217	1,323

Die Tests selbst können außerdem durch Fremdstoffe gestört werden. Zum Beispiel werden die Chlorid- und Nitrattests bis zu Sulfatgehalten von 1000 mg/l nicht gestört. Wird davon ausgegangen, dass in Baustoffen oder an deren Oberflächen häufig Gips anzutreffen ist, wird diese Sulfationenkonzentrationen deutlich überschritten und mit Einflüssen auf die Tests muss gerechnet werden.

Einige Beispiele von Vergleichsmessungen - die Proben stammen von zwei Objekten mit salzbelastetem Mauerwerk - sind in Tabelle 3.3.3 zusammengestellt. Die Ergebnisse von Messungen mit Teststäbchen sind denen von Messungen mittels Anionen-Chromatographie an gleichen Eluaten gegenübergestellt. Die Eluierung erfolgte mit der 20fachen Wassermenge über 24 Stunden unter dreifachem aufschütteln. Nach der Filtration wurden die Untersuchungen an der flüssigen Phase durchgeführt und die Werte auf das getrocknete Ausgangsmaterial bezogen.

Die aufgeführten Beispiele zeigen, dass teilweise hinreichende Übereinstimmungen zwischen den Ergebnisse bestehen und häufig aber auch große Unterschiede. Auf mögliche Ursachen war zuvor hingewiesen worden.

Der Vergleich verdeutlicht, dass Untersuchungen mit Teststäbchen nur orientierenden Charakter haben können. Für exakte Konzentrationsangaben ist die Genauigkeit nicht ausreichend und es muss auf andere Analysenverfahren zurückgegriffen werden.

3.4 Bewertung von Salzbelastungen mit elektrochemischen Messungen

An einigen Stellen ist zuvor bereits auf die Möglichkeit von Leitfähigkeitsmessungen zur Ermittlung von Salzgehalten (ÖNORM B3355-1, DIN 38414) hingewiesen worden. In diesen Normen finden sich aber keine Hinweise zur Bewertung.

Leitfähigkeitsmessungen werden in vielen Nachweismethoden der analytischen Chemie eingesetzt. Für die Bewertung von Salzgehalten in Baustoffen kann nach FRIESE (1991) die Abhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit von Elektrolyten in wässrigen Lösungen von der Ladung und der Konzentration der einzelnen Ionen sowie von der Ionenbeweglichkeit, diese ist wiederum temperaturabhängig, genutzt werden. Als Beispiel wird die Abhängigkeit der Konzentrationen von Salzlösungen (Calciumnitrat, Kaliumnitrat, Natriumsulfat, Natriumcarbonat, Natriumchlorid) in Masse-% über der spezifischen Leitfähigkeit in mS/cm und die Einordnung der Messwerte aus verschiedenen Baustoffproben dargestellt.

LEVELT & VAN LEEUWENSTIJN (1992) zeigen Abhängigkeiten der Leitfähigkeit von der Salzkonzentration von Modelllösungen (in mmol/l) mit Natriumnitrat und Kaliumsulfat auf. Sie wiesen außerdem darauf hin, dass es wegen der hohen molaren Leitfähigkeit der Hydroxylionen notwendig ist, von den Proben mit hohen Leitfähigkeiten, auch den pH-Wert zu untersuchen.

In beiden hier angeführten Literaturquellen wird aufgezeigt, dass prinzipiell die Ermittlung von Salzgehalten mittels Leitfähigkeitsmessungen möglich ist. Bei Vorhandensein eines einzelnen Schadsalzes besteht eine direkte lineare Korrelation zwischen dem Gehalt im Material bzw. dem Eluat aus dem Material und der elektrischen Leitfähigkeit im Eluat.

Bei Vorhandensein mehrerer Salze nebeneinander müssen jedoch einige Randbedingungen, auf die nachfolgend eingegangen werden soll, berücksichtigt werden.

Als Beispiel sollen Untersuchungen an Proben von der Kirche St. Johannis in Gera dienen. In diesen Proben waren hohe Gehalte mit stark wechselnden Anteilen an verschiedenen Anionen und auch hohe pH-Werte im Eluat nachweisbar (Tabelle 3.4.1)

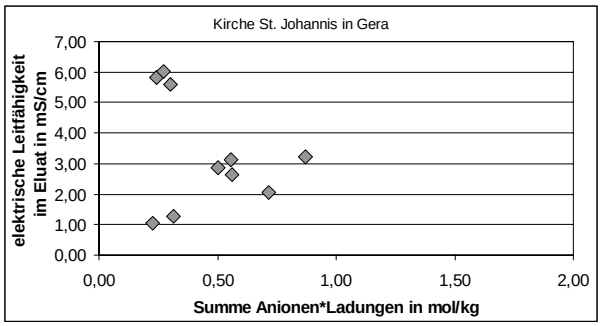


Abbildung 3.4.1: Elektrische Leitfähigkeit im Eluat in Abhängigkeit von der Summe der wasserlöslichen Anionen im Feststoff – unter Berücksichtigung der Anzahl der Landungsträger

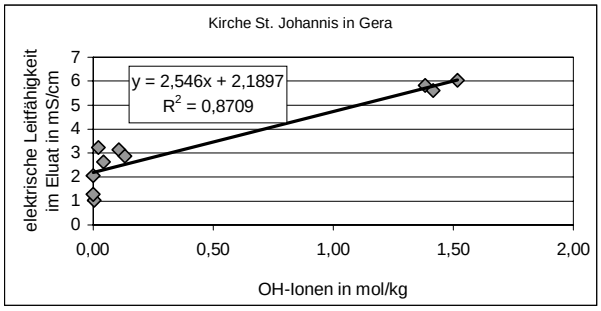


Abbildung 3.4.2: Elektrische Leitfähigkeit im Eluat in Abhängigkeit von der Summe der OH-Ionen – unter Berücksichtigung der Anzahl der Landungsträger

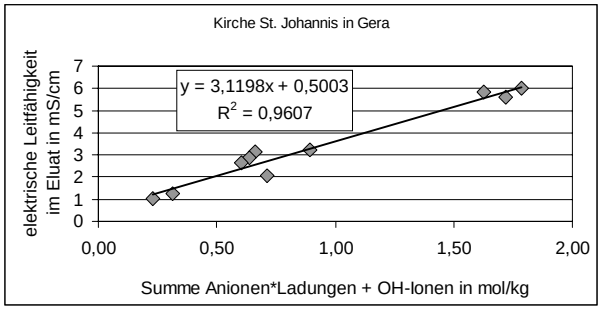


Abbildung 3.4.3: Elektrische Leitfähigkeit im Eluat in Abhängigkeit von der Summe der wasserlöslichen Anionen und OH-Ionen im Feststoff – unter Berücksichtigung der Anzahl der Landungsträger

Werden die elektrischen Leitfähigkeiten in nur Abhängigkeit von der Summe der Anionen dargestellt, so kann in diesem Beispiel kein mathematischer Zusammenhang zwischen beiden Größen festgestellt werden.

Moleküle Anionen und Kationen multipliziert mit der Anzahl der Ladungsträger je Molekül.

OH-Ionen verhielten sich bei den Leitfähigkeitsmessungen wie die Anionen und für die messtechnische Erfassung müssen Werte im pH-Wertbereich >11 mit hinreichend genau arbeitenden Elektroden gemessen werden.

Über mehrere Jahre sind an der MFPA Weimar Paralleluntersuchungen bei der Bewertung von Salzbelastungen, wie am vorgestellten Beispiel gezeigt, durchgeführt worden. Vor der Ermittlung von Anionen- und teilweise Dagegen besteht zwischen der Anzahl der OH-Ionen (möglich wäre auch die Darstellung des pH-Wertes) und der elektrischen Leitfähigkeit bereits ein wesentlich besserer Zusammenhang (Abbildung 3.4.2).

Werden beide Größen als Summe zusammengefasst, erhöht sich die Korrelation nochmals deutlich (Abbildung 3.4.3).

Nach dem Auflösen liegen die Salze als Anionen und Kationen im Eluat vor. Beiden Ionenarten können Ladungsträger zugeordnet werden. Die Gesamtzahl der Ladungsträger ergibt sich somit aus der Summe der auch Kationengehalten in Eluaten wurden pH-Wert- und Leitfähigkeitsmessungen an wässrigen Eluaten durchgeführt und Zusammenhänge zwischen beiden Untersuchungsverfahren überprüft. Allein in den Jahren 1998 und 2001 sind mehrere hundert Messungen an Proben von etwa 30 Objekten und verschiedensten salzbelasteten Materialien, wie Putze, Mauermörtel, Ziegel, Natursteine und Kompressenmaterial, durchgeführt worden (Abbildung 3.4.4).

Dabei bestätigte sich die dominate Rolle von Sulfaten (vor allem Gips) in Oberflächenproben, die der Umwelt ausgesetzt waren. Bei Erreichen der Grenze der Löslichkeit von Gips stellte sich eine elektrische Leitfähigkeit von etwa 2,3 mS/cm (bei 25°C) ein.

Als Beispiel ist der Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit und der Summe der Anionen für Proben von der Nikolaikirche in Unterwellenborn mit dargestellt (Abbildung 3.4.5)

Obwohl die angegebene Funktion eine recht hohe Korrelation ausweist, muss hier von zwei Einflußfaktoren ausgegangen werden. Für elektrische Leitfähigkeiten unter 1,5 mS/cm kann im vorliegenden Fall sicherlich ein linearer Zusammenhang mit hoher Korrelation angenommen werden. Bei höheren Werten erfolgt ein Übergang zu einem scheinbar nichtlinearen Zusammenhang. Die Ursache dafür ist das Erreichen der Löslichkeitsgrenze von Gips. Trotz nachgewiesener höherer Gipsgehalte in der Ausgangsprobe erhöht sich die Leitfähigkeit im Eluat beim Erreichen der Löslichkeitsgrenze von etwa 2 g/l nicht mehr. Höhere Leitfähigkeitswerte können dann nur noch durch das Vorhandensein anderer löslicher Salze (hier Magnesiumsulfate, Alkalichloride und -nitrate) begründet werden.

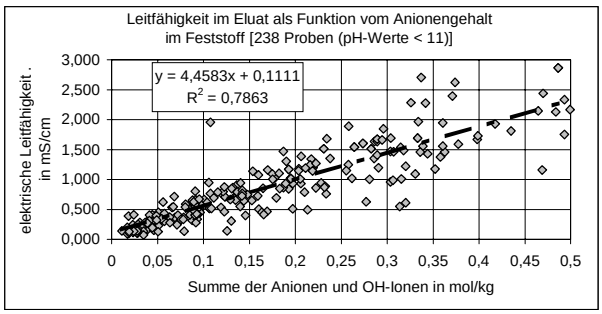


Abbildung 3.4.4: *Elektrische Leitfähigkeit im Eluat in Abhängigkeit von der Summe der wasserlöslichen Anionen und OH-Ionen im Feststoff – hier Proben mit pH-Werten <11 -*

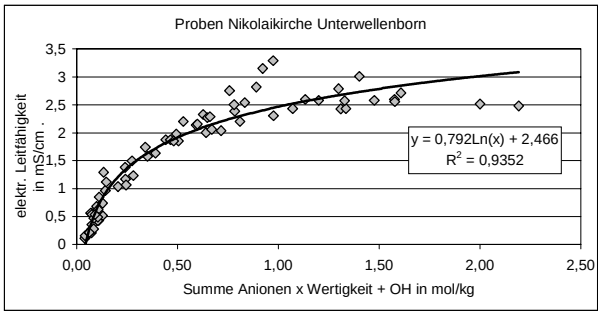


Abbildung 3.4.5: *Elektrische Leitfähigkeit im Eluat in Abhängigkeit von der Summe der wasserlöslichen Anionen und OH-Ionen im Feststoff – hier Proben von der Nikolaikirche in Unterwellenborn*

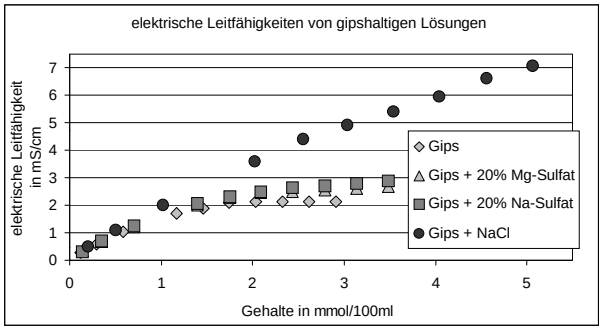


Abbildung 3.4.6: *Elektrische Leitfähigkeit im Eluat in Abhängigkeit von der Summe der wasserlöslichen Anionen und OH-Ionen im Feststoff*
– Modellansätze mit gipshaltigen Eluaten

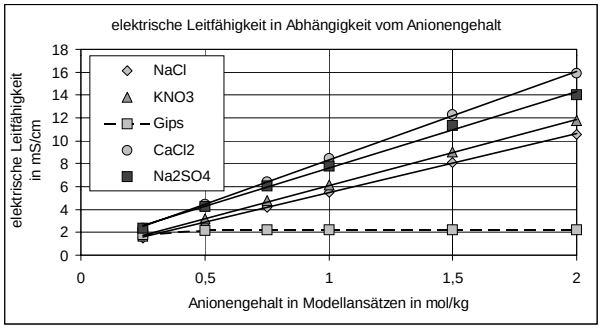


Abbildung 3.4.7: *Elektrische Leitfähigkeit im Eluat in Abhängigkeit von der Summe der wasserlöslichen Anionen und OH-Ionen im Feststoff – Modellansätze -*

Die Anwendung dieser Zusammenhänge erlaubt die schnelle Identifizierung von gipshaltigen Baustoffen bzw. eine schnelle Kontrolle auf andere wasserlösliche Salze in Baustoffen mit bekanntem Gipsgehalt. Ein Modellversuch (Abbildung 3.4.6), bei dem Eluate verschiedener Mischungen aus Gips und leichter löslichen Salzen untersucht wurden, soll diesen Zusammenhang zusätzlich verdeutlichen.

Es konnte festgestellt werden, dass bei geringeren Gipsgehalten (deutlich unter der Löslichkeitsgrenze) nahezu kein Unterschied zu anderen Sulfaten (Alkali- und Magnesiumsulfate) auftritt. Auch Mischungen aus diesen Salzen führten zu vergleichbaren Zusammenhängen zwischen Leitfähigkeiten und Anionengehalten. Bei der Sättigungskonzentration von Gips werden dann in Salzmischungen dominant Anionen leichter löslicher Salze wirksam.

In weiteren Simulationsversuchen (Abbildung 3.4.7) wurden höher konzentrierte Lösungen verschiedener Salze untersucht.

Es kann eine gewisse Differenzierung in Abhängigkeit von der Salzart festgestellt werden. Bei Berücksichtigung von Größenordnungen realer Schadsalzgehalte in Baustoffen und deren Konzentration in Eluaten, kann aber eine Zusammenfassung als Summe der Anionen unter Berücksichtigung der Anzahl der Landungsträger als hinreichend genau für die Bewertung der Salzbelastung angenommen werden.

Aus diesen Experimenten war abzuleiten, dass die oben genannten Zusammenhänge bei vollständig gelösten Salzen (unter der Grenze ihrer Löslichkeit) linear sind.

Ausgehend von den hier aufgezeigten Beispielen und vielen anderen Untersuchungen können die bisherigen Ergebnisse in folgender Gleichung zusammengefasst werden.

(1) $Lf = a*x + b$

[Lf = elektrische Leitfähigkeit; a = f (Verdünnung und Salzart); b = Leitfähigkeit des Wassers]

Der Faktor „a“ kann, nach den Ergebnissen konkreter Anwendungen, bei geringen Salzkonzentrationen als unabhängig von der Salzart angenommen werden.

Die Funktion gilt unter der Bedingung konstanter Temperatur.

(2) $x = \Sigma\ (\text{Anionen}) = \Sigma\ n*c_A^{n-} + c_{OH^-}$

[n = Anzahl der Ladungen; c_A = Anionengehalt in mol/kg]

(3) c_{OH^-} = (10 Potenz-14 / 10 Potenz-pH)*D

[D = Verdünnungsverhältnis Eluat/Einwaage]

Nach den aufgeführten Zusammenhängen kann die elektrische Leitfähigkeit als Maß für die Bewertung von Salzbelastungen verwendet werden. Eine qualitative Unterscheidung von Salzarten, ausschließlich über Leitfähigkeitsmessungen, ist nicht möglich. Bei Unkenntnis der qualitativen Zusammensetzung der Salzart können keine konkreten Salzmengen berechnet werden.

4 Schlussfolgerungen für praktische Anwendungen

Die aufgeführten einfachen Nachweise für wasserlösliche Salze erfordern immer die vorherige Herstellung von Eluaten. Mit der Exaktheit der Eluatherstellung entscheidet sich bereits der Wert der Aussagen der anschließend angewendeten Nachweismethoden.

Deshalb sind folgende Angaben vor und während der Eluatherstellung unbedingt zu erfassen:

- Angaben zur Aufbereitung des Probenmaterials (z. B. Trocknung, Zerkleinerung der Proben; Trennung nach Materialarten)
- Angaben zum Aufschlussverfahren (z. B. Verhältnis Wasser / Feststoff, Temperatur, Elutionsdauer, Art und Häufigkeit des Schüttelns)

Bei der gravimetrischen Ermittlung des Gesamtsalzgehaltes aus dem Eluat müssen Waagen mit ausreichender Genauigkeit eingesetzt werden. Die Methode lässt nur eine grobe Ermittlung des Salzgehaltes zu. In der Regel müssen ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung der Salzarten vorgenommen werden.

Für eine halbquantitative Bestimmung von Anionenarten gelöster Salzen sind Teststäbchen prinzipiell geeignet. Die Nachweisgrenzen lassen aber oft keine Bewertung in kritischen Grenzbereichen von Salzbelastungen zu. Hohe bis sehr hohe Anionengehalte können orientierend bestimmt werden.

Gute Korrelationen zum Salzgehalt in Eluaten werden durch die kombinierte Anwendung von pH-Wert-Messungen und Messungen der elektrischen Leitfähigkeit erhalten. Bei den Leitfähigkeitsmessungen werden in der Summe die in der Lösung befindlichen Ladungsträger (Anionen, Kationen) erfasst. Die pH-Wert-Messung ist zu Ermittlung der OH-Ionen erforderlich. Bei pH-Werten > 11 haben die OH-Ionen einen erheblichen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit.

Bei Vorhandensein nur einer Salzart können mit Leitfähigkeitsmessungen auch direkte quantitative Salzbestimmungen durchgeführt werden.

Insgesamt erfordert auch die Anwendung der einfachen Methoden zur Bestimmung der Salzarten und –gehalte ausreichende Sachkenntnis und eine Berücksichtigung der Grenzen der Methoden.

Für die Abschätzung der Belastungssituation können Grenzwerte aus der Literatur genutzt werden. Diese Werte haben aber nur einen orientierenden Charakter. Im Einzelfall muss objektspezifisch und unter Berücksichtigung weiterer Faktoren über die Belastungssituation entschieden werden.

Ein wichtiger dieser weiteren Faktoren ist die Berücksichtigung des Wassers als Transport- und Reaktionsmedium für Salze.

5 Literaturquellen

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

Friese, P. & Pohlmann, L. „Zustandsanalyse von Mauerwerk mit aufsteigender Feuchtigkeit“ .- In: Bauphysik, Berlin (1986) H.1, S.: 7-10

Friese, P. „Die Anwendung von Leitfähigkeitsmessungen an salz- und feuchtegeschädigtem Mauerwerk, Teil 1“ .- In: Bautenschutz und Bausanierung 14(1991) S.: [125-127]

Friese, P. „Die Anwendung von Leitfähigkeitsmessungen an salz- und feuchtegeschädigtem Mauerwerk, Teil 2“ .- In: Bautenschutz und Bausanierung 14(1991) S.: [134-135]

Knöfel, D. & Schubert, P. „Mörtel und Steinergänzungsstoffe in der Denkmalpflege“ .- Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT-Verbundforschung zur Denkmalpflege, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1993

Levelt, F. J. & Leeuwenstijn van, J.H.M. "Die schnelle Beurteilung der Salzbelastung von Mauerwerk" .- In: Bautenschutz und Bausanierung 15(1992) S.: [56-57]

Meisel, U. „Naturstein – Erhaltung und Restaurierung von Außenbauteilen“ .- Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1988

Rauscher, K. u. a. „Chemische Tabellen und Rechentafeln für die analytische Praxis“ .- VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1972

Reul, H. „Handbuch Bautenschutz Bausanierung – Leitfaden für die Sanierungsbranche“ .- Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH, Köln, 1991

Schmitz, H., Böhning, J. & Goerdt-Hofacker, H.: „Verminderung von Kellerfeuchtigkeit in Altbauten“ .- Landesinstitut für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung (LBB), Aachen, 1991

Schmitz, H., Böhning, J. & Krings, E. „Verfahren/Geräte zur Erfassung von Bauschäden“ .- Landesinstitut für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung (LBB), Aachen, 1991

Steiger, M., Neumann, H.-H., Grodten, T., Wittenburg, C. & Dannecker, W. „Salze in Natursteinmauerwerk – Probenahme, Messung und Interpretation“ .- In: Denkmalpflege und Naturwissenschaft – Natursteinkonservierung II, Fraunhofer IRB Verlag, 1998, S.: 61-91

ÖNORM B3355-1 vom 01. Oktober 1995 „Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk – Bauwerksdiagnostik und Planungsgrundlagen“

WTA-Merkblatt 4-5-99/D „Beurteilung von Mauerwerk – Mauerwerksdiagnostik“

DIN 38414 Teil 4 Oktober 1984 „Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4)“

Michael Auras und Gabriele Melisa

Kompressenentsalzung – Wirkungsprinzip, Materialien, Anwendung, Fallbeispiele

Bei der Kompressenentsalzung wird auf die salzbelastete Oberfläche eines porösen Baustoffs für einige Tage oder Wochen eine nasse Kompresse aufgebracht. Ziel ist die Reduzierung der Salzbelastung des Baustoffs durch das Einwandern von Salzen in die Kompresse, die anschließend mitsamt ihrer Salzfracht abgenommen wird. Kompressen haben im Gegensatz zu Putzen weder gestaltende noch schützende Funktion, sie werden temporär angewendet und sind reversibel.

Mit der Kompressenentsalzung wird in der Regel nur ein oberflächennaher Bereich von einigen Zentimetern erreicht. Eine dauerhafte Reduzierung der Salzbelastung kann also nur erreicht werden, wenn die Salze zuvor in dieser oberflächennahen Zone angereichert waren und wenn kein nennenswerter Salznachschub erfolgt. Entsprechende Voruntersuchungen zu Art, Verteilung und Konzentration der salze im Mauerwerk sind daher unabdingbar.

Andererseits kann auch eine temporäre Entsalzung der Oberflächenzone sinnvoll sein, um konservierende Maßnahmen durchführen zu können. Dies kann notwendig werden, da beispielsweise Steinfestiger auf Kieselsäureesterbasis bei hoher Salzbelastung nicht richtig ausreagieren (Grassegger & Adam, 1994), weshalb die Festigungswirkung bei hohen Salzgehalten ausbleibt (Sattler, 1992). In Laborversuchen war eine starke Beeinträchtigung der Kieselgelbildung bei Salzgehalten von einigen Ma.% zu beobachten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass am Bauwerk schon bei geringeren Salzgehalten Probleme auftreten können, da hier Salzbe lastungen üblicherweise mit erhöhten Feuchtegehalt verbunden sind.

Als sonstige Verfahrung zur Salzminderung sind in erster Linie die Lagerung abbaubarer Teile im Wasserbad

und verschiedene Varianten zur Durchspülung von Mauerwerk mit Wasser zu nennen (Windsheimer et al. 1991, Goretzki, 1996). Elektrophysikalische Verfahren zur Entsalzung von Mauerwerk sind bezüglich Wirkung und Nebenwirkungen sehr umstritten und wegen der erheblichen baulichen Eingriffe für denkmalgeschützte Objekte kaum geeignet (z.B. Venzmer et al., 1999). Allerdings bietet die unten am Fallbeispiel der Augustinerkirche Trier dargestellte Variante einer elektrochemisch unterstützten Kompressenentsalzung zumindest für weniger sensible Untergründe aussichtsreiche Ansätze. Von den chemischen Verfahren zur Umwandlung leichtlöslicher in schwerlösliche Salze findet nur das Bariumhydroxid-Verfahren im restauratorischen Bereich gelegentliche Anwendung (z.B. Friese & Protz, 1999). Noch in der Entwicklung befinden sich Verfahren zur mikrobiellen Umwandlung von Nitraten in Stickoxide (Wilimzig, 1996, Drobig et al., 2001).

Bislang wird die Kompressenentsalzung fast ausschließlich von Restauratoren ausgeführt. Aufgrund ihrer langen Standzeit verzögert sie den Baufortschritt merklich, weshalb sie häufig nicht in zeitlich straffe Bauabläufe passt. Auch ist das Verfahren bei den meisten Architekten und Handwerkern unbekannt und findet deshalb nur selten Anwendung. Schließlich zeigt das Verfahren bei nicht optimaler Anwendung eine geringe Effizienz. Allerdings lässt eine auf Voruntersuchungen gestützte natur-

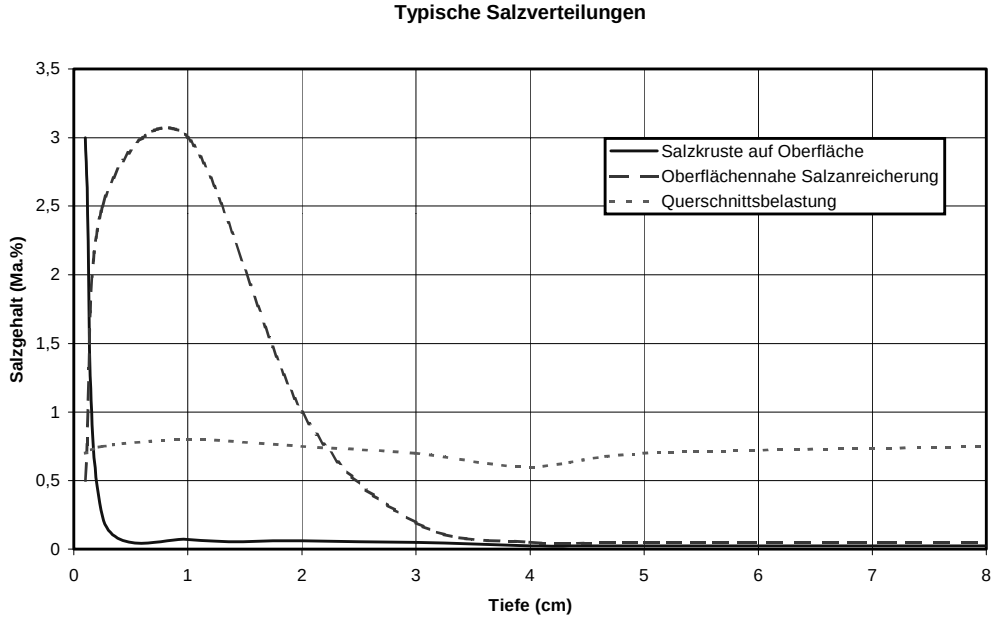


Abb. 1: Typische Salzverteilungen im Mauerwerk

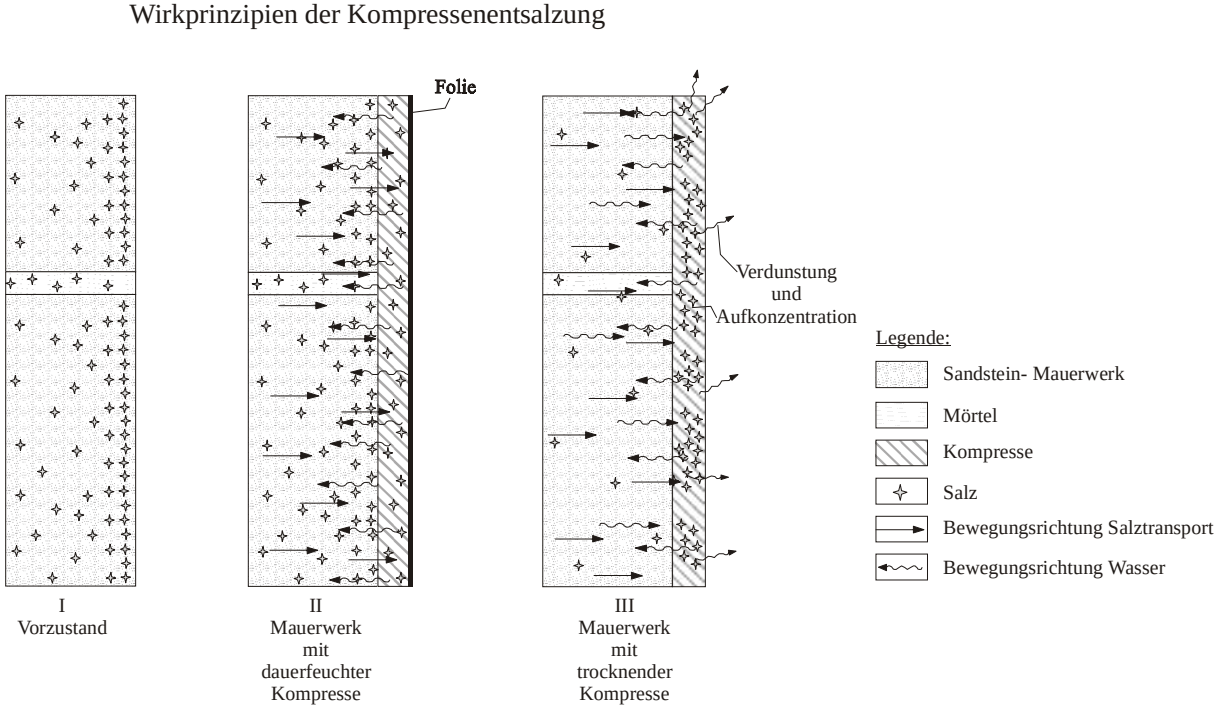


Abb. 2: Wirkprinzip trocknender und dauerfeuchter Kompressen

wissenschaftliche Begleitung, die Wahl der richtigen Verfahrensvariante und die sachgemäße Ausführung in vielen Fällen deutliche Effizienzsteigerungen zu. Einen guten Überblick über das Verfahren mit konkreten Ausführungsanleitungen gibt das gerade im Entwurfsstadium erschienene WTA-Merkblatt 3-13-01/D.

Mit diesem Merkblatt, mit der Möglichkeit maschineller und somit zeit- und kostensparender Verarbeitung sowie mit dem Angebot konfektionierter Kompressenmaterialien sind die Grundlagen geschaffen, das Verfahren in breiterem Rahmen in die Baupraxis einzuführen.

Wirkprinzip

Zwei Ausführungsvarianten und die ihnen zugrundeliegenden Wirkprinzipien sind zu unterscheiden. Bei beiden Verfahren wird zunächst durch (schwaches) Vornässen und durch die Kompresse Wasser in den Baustoff eingebracht. Dort vorhandene kristalline Salze gehen in Lösung und können nun mit dem Wasser transportiert werden. Detaillierte Kenntnisse der Salzverteilung sowie der Feuchtetransportparameter des behandelten Baustoffs sind notwendig, um abschätzen zu können, welche Wassermenge sinnvoll ist, um den zu entsalzenden Bereich zu befeuchten. Zu starker Wassereintrag ist unbedingt zu vermeiden, damit die Salze nicht mit der eindringenden Feuchtefront tief in den Untergrund getrieben werden und erst nach langer Zeit wieder an die Oberfläche zurückwandern.

Dauerfeuchte Kompressen werden mit Folien abgedeckt, um eine Verdunstung des Wassers zu vermeiden. Gelöste Salzionen diffundieren aus der Porenflüssigkeit des Baustoffs in das in der Kompresse gespeicherte, zunächst salzfreie Wasser bis ein Konzentrationsausgleich erreicht ist. Die entzogene Salzmenge hängt also zunächst vom Verhältnis der Volumina der Porenflüssigkeiten von Baustoff und Kompresse ab.

Bei trocknenden Kompressen wird die Trocknungsfront und damit der Ort der Salzkristallisation aus dem Baustoff in die Kompresse verlegt. Der Salzeintrag in die Kompresse dauert in der Trocknungsphase solange an, bis der Kapillarstrom in die Kompresse unterbrochen wird. Dann findet die Salzkristallisation wieder im Porenraum des Baustoffs statt, ein weiterer Verbleib der Kompresse ist dann sinnlos.

Entsalzungskompressen sollten idealerweise eine bimodale Porenverteilung aufweisen: Einerseits sind Luftporen notwendig, die eine Trocknung begünstigen und Raum für die Salzkristallisation bieten. Andererseits sollte die Kompresse auch einen hohen Anteil kleiner Poren besitzen, die eine hohe Saugspannung entwickeln und damit den Kapillartransport in die Kompresse lange aufrecht erhalten. Die Kompresse darf nicht zu schnell durchtrocknen, damit möglichst lange ein Kapillarverbund zwischen Kompresse und Untergrund erhalten bleibt. Darüber hinaus muss zwischen Kompresse und Baustoff ein möglichst guter Kapillarkontakt bestehen (Ettl & Krus, 2001), um die Einwanderung der Salzlösungen in die Kompresse zu begünstigen.

Materialien und Verfahrensvarianten

Meist werden als Kompressenmaterialien entweder Zellulosefasern oder Gemische aus Tonmineralen, Zuschlagsstoffen und z.T. Zellulosefasern verwendet. Bei der zweiten Gruppe sind sowohl Eigenmischungen als auch Produkte verschiedener Anbieter von Restaurierungsmaterialien im Einsatz (s.a. Egloffstein & Auras,

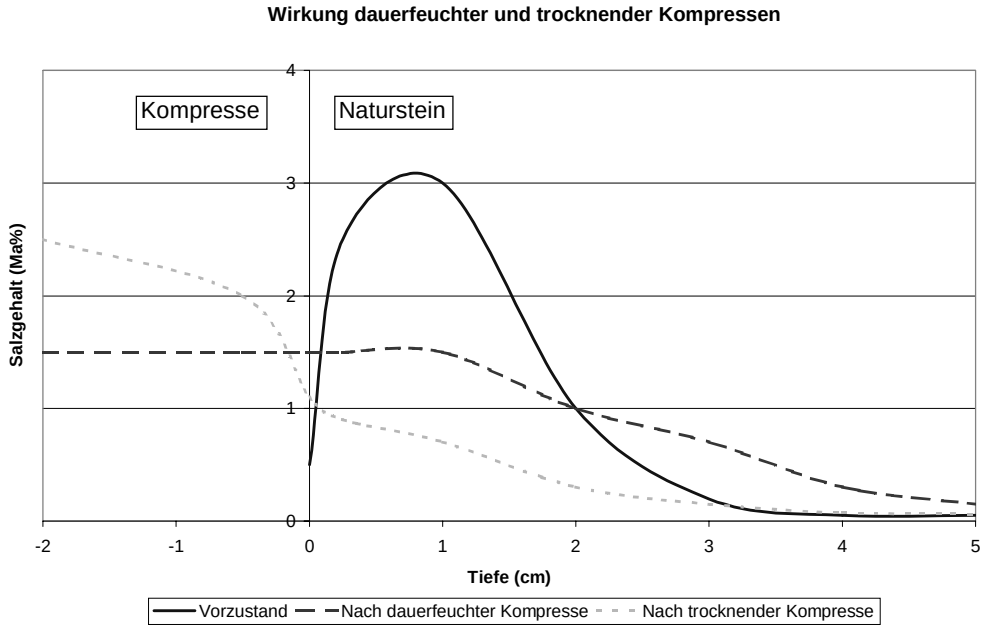
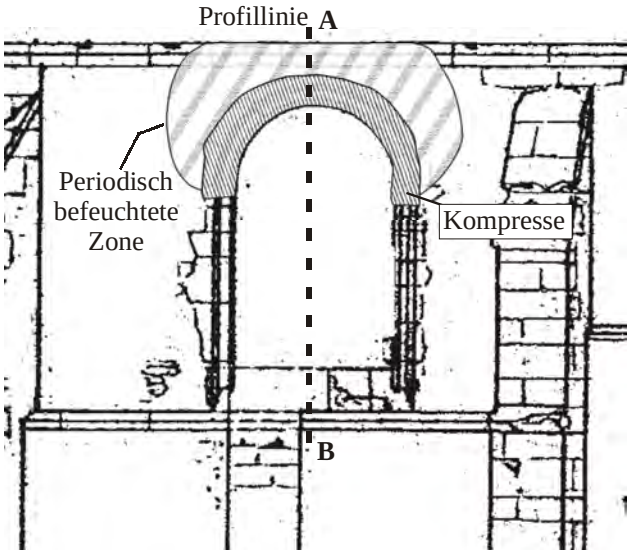
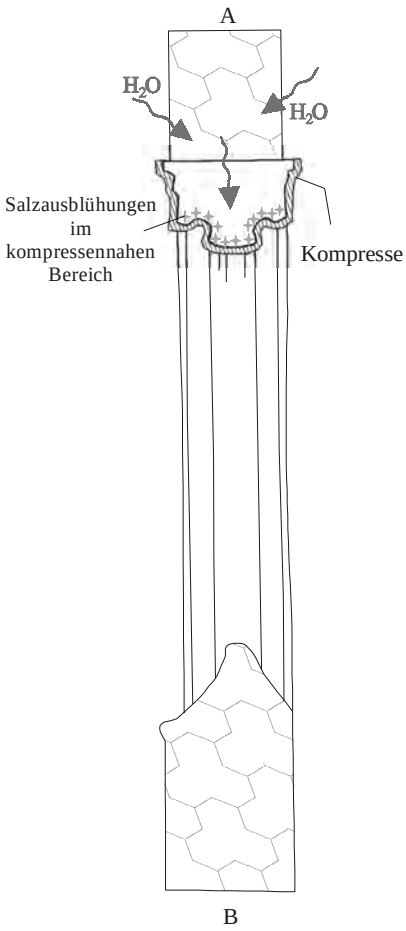


Abb. 3: Schematische Salzprofile vor und nach der Entsalzung mit einer dauerfeuchten und einer trocknenden Kompresse



Frontansicht mit Lage der Kompresse, des Bewässerungs-bereichs, sowie der Profillinie



Seitenansicht (Schnitt A - B) mit Wasserführung

Abb. 4: Kompresse am Rundbogenfenster der Augustinerkirche Trier

2000). Als wiederverwendbare Materialien werden Schaumstoffe oder Textilien angewandt. Einen Überblick über die verschiedenen Materialgruppen und ihre relevanten Eigenschaften gibt das bereits erwähnte WTA-Merkblatt.

Zu den genannten Verfahren der Kompressenentsalzung gibt es verschiedene Varianten, die auf Effizienzsteigerung abzielen. Bei den trocknenden Kompressen sind dies in erster Linie verschiedene Möglichkeiten der Feuchtezufuhr, um einen gerichteten Feuchtestrom durch den zu entsalzenden Baustoff in die Kompresse einzustellen (Ettl & Schuh, 1992; s.a. Abb. 4).

Andere Varianten zielen auf eine Beeinflussung des Trocknungsverhaltens der Kompresse, z.B. durch entsprechende Rezepturmodifikationen, Verwendung von Zweischichtkompressen oder durch die Abdeckung mit speziellen Folien.

Bei den dauerfeuchten Kompressen ist besonders die Variante mit elektrochemischer Unterstützung erwähnenswert, wie sie im Folgenden bei den Fallbeispielen beschrieben wird.

Bewertungskriterien

Zur Bewertung des Entsalzungserfolgs ist es sinnvoll, vor und nach der Kompressenanwendung die Salzverteilung im Baustoff zu analysieren und den Salzentzug zu bilanzieren. Wenn eine Probenahme nicht oder nur in sehr eingeschränktem Maß möglich ist, kann aus dem Salzgehalt der abgenommenen Kompresse bei Kenntnis ihrer Trockenrohdichte und der Auftragsstärke die dem Baustoff entzogene Salzmenge abgeschätzt werden. Als Bezugsgröße ist dann die entzogene Salzmenge, bezogen auf die behandelte Fläche, anzugeben. Bei beiden Verfahren wird in der Regel eine Messung an kleinen Proben auf eine große Fläche oder ein großes Baustoffvolumen hochgerechnet. Zudem wird meist von annähernd homogenen Salzverteilungen sowohl im Baustoff als auch in der Kompresse ausgegangen. Entsprechende Effizienzbewertungen dürfen daher nicht überbewertet werden.

Ein ganz wesentliches Beurteilungskriterium liegt natürlich in der Belastung des Baustoffs durch die Entsalzungsmaßnahme. Diesbezüglich sind folgende Fragen vor der Anwendung zu klären, z.B. über die Anlage von Musterflächen:

- Ist die starke Feuchtezufuhr vertretbar?
- Ist die Oberfläche des zu behandelnden Werkstücks stabil genug, die Kompresse zu tragen?
- Ist die Abnahme der Kompresse ohne Beschädigung des Untergrunds möglich?
- Hat die Kompressenanwendung bleibende optische Veränderungen der Baustoffoberfläche zur Folge?

Einige tonmineralhaltige Kompressen werden sehr fest, andere haften stark an der Oberfläche, manche lassen sich nicht rückstandsfrei entfernen. Häufig können derartige Probleme durch die Wahl eines entsprechenden Kompressenmaterials und durch die Kombination mit trennenden Zwischenschichten (z.B. Japanpapier, Zellulosefasern) gemindert werden.

Fallbeispiele

I. Materialvergleich trocknender Kompressen an der ehemaligen Augustinerkirche Trier

Die ehemalige Augustinerkirche ist ein Bau aus dem 13/14 Jahrhundert, von dem heute der Chor aus vier Jochen und ein Teil des nördlichen Seitenschiffs erhalten sind. Das Langhaus wurde in Bruchsteinmauerwerk errichtet, der überwiegende Teil des Chores sowie die Strebepfeiler bestehen aus Sandsteinquadern (DEHIO, 1984).

Gebunden an Abschnitte mit stärkeren Verwitterungsschäden weisen die Mauern eine hohe Salzbelastung auf. Untersuchungen ergaben vor allem hohe Gehalte an Magnesiumsulfaten, die aus hier verbauten Dolomitkalkmörteln und –putzen stammen. Hinzu kommen Gips, Alkalinitrate und –chloride. Die Tiefenverteilung der Salze im Sandstein, dargestellt in Abbildung 5, zeigt deutlich ihre Aufkonzentrierung nahe der Gesteinsoberfläche. Folglich bestehen gute Voraussetzungen für eine erfolgreiche Kompressenentsalzung.

Musterflächen

Für die Erprobung der Entsalzungswirkung verschiedener Materialien wurden an einem Strebepfeiler des Kirchenchores drei Musterflächen angelegt (Abb. 6). In zwei Zyklen wurden bis in eine Höhe von 1,5 m eine Kaolin-Cellulose-Sand-, eine Cellulose-Sand- und eine Bentonit-Cellulose-Sand-Mischung auf einen vorgenässten Untergrund aufgetragen. Bis auf die Kaolin- und Cellulose-Sand-Kompresse des ersten Zyklus erfolgte das Auftragen im Spritzverfahren. Die Standzeiten betrugen 9 und 12 Wochen. Ein Schlagregenschutz sorgte dafür, daß die Kompresse ungehindert trocknen konnte.

Die jeweiligen Mengen-, Produkt- und Herstellerangaben der Kompressen sind in Tabelle 1 zusammengefaßt; die Lage der Musterflächen zeigt Abbildung 6.

Ergebnisse

Am Ende beider Zyklen wurden den Kompressen jeweils in drei Höhenniveaus definierte Probestücke entnommen. Der aufgrund ihrer Salzgehalte bestimmte Salzentzug ist in Abbildung 7 dargestellt. Der Vergleich zeigt, daß die Kaolin-Kompresse im ersten Zyklus eine etwa 8-fach höhere und im zweiten noch eine 2,5-fach höhere Wirksamkeit aufweist als die übrigen Kompressen, mit denen ein nahezu gleiches Ergebnis erzielt wurde.

Die Salzgehalte im Sandstein sanken oberflächennah um durchschnittlich 0,57 Ma.% und in Tiefen von 1-2 cm

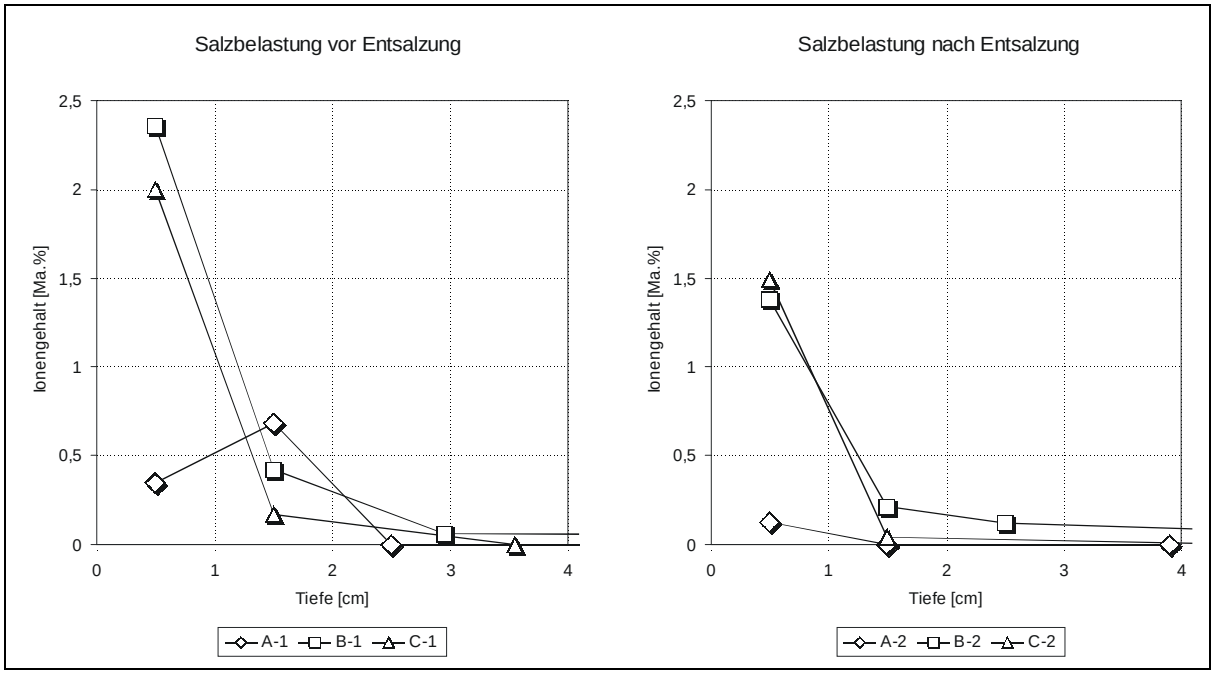


Abb. 5: Gesamtgehalte wasserlöslicher Ionen im Tiefenprofil der Sandsteine vor und nach der Entsalzung. A, B und C kennzeichnen Proben, die im Bereich entsprechender Musterflächen entnommen wurden.

Tab. 1: Untersuchte Kompressenmaterialien.

Feld	Kompressenmaterial	Produkt	Hersteller
A	1RT (Raumteil) Kaolin, 1RT Cellulose, 4RT Sand	IFS-Mischung (nach EGLOFFSTEIN)	Baustellenmischung IFS
B	2RT Cellulose, 1RT Sand	IFS-Mischung	s.o.
C	Bentonit, Cellulose, Sand	1. Zyklus: Spezialsanierung Kompresse 2. Zyklus: Funcosil Entsalzungskompresse	Fa. Schulze Spezialsanierung Fa. Remmers

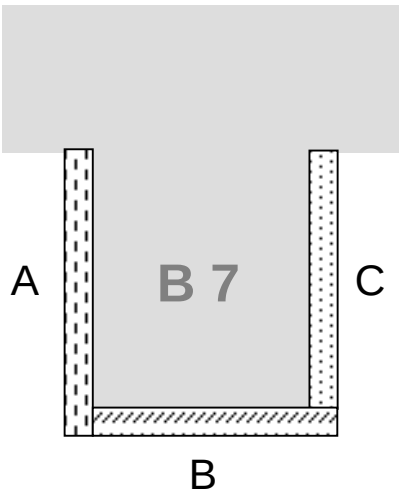


Abb. 6: Schema der angelegten Musterflächen im Querschnitt des Strebepfeilers B7. Feld A: Kaolin-Cellulose-Sand-, Feld B: Cellulose-Sand-, Feld C: Bentonit-Cellulose-Sand-Kompresse.

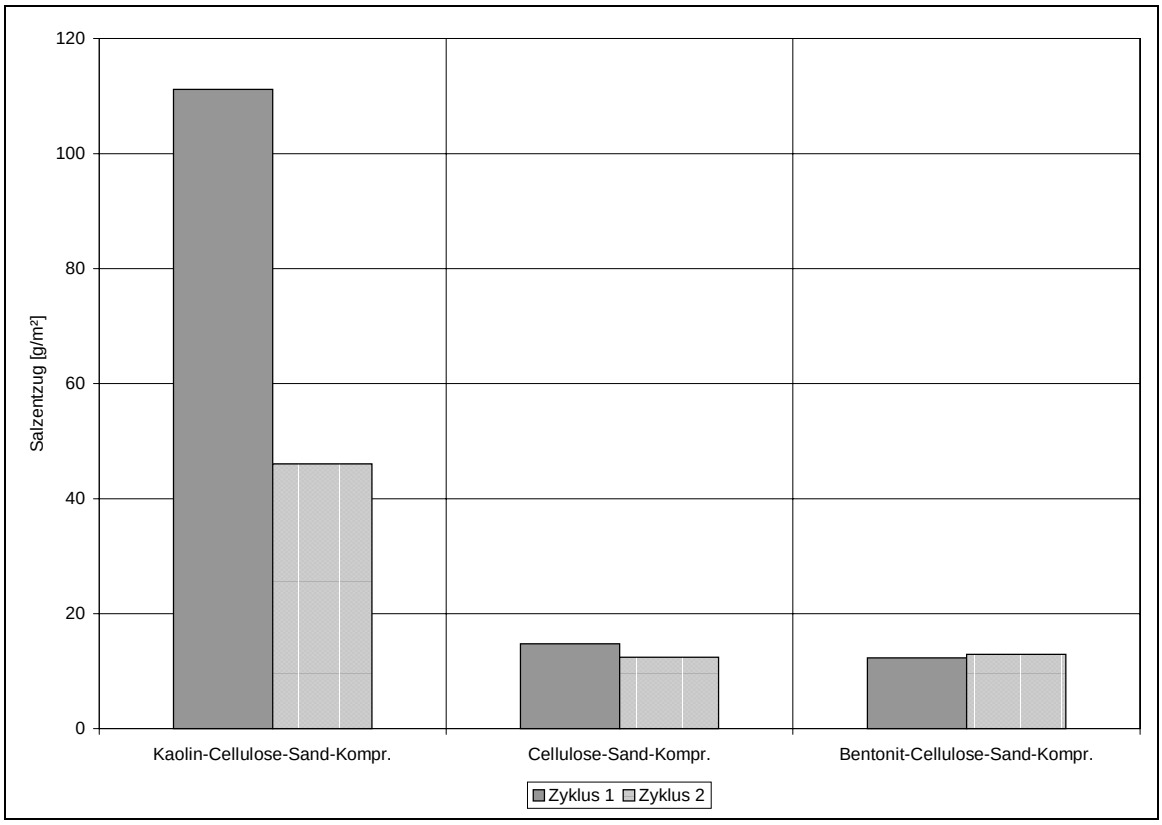


Abb. 7: Die dem Mauerwerk nach erstem und zweitem Kompressenauftrag entzogene Salzmenge im Vergleich. Dargestellt sind Durchschnittswerte aus drei Höhenniveaus der Musterflächen.

um 0,17 Ma.% (Abb. 5). Im Besonderen konnte die Salzbelastung, die sich im Bereich der Kaolin-Kompresse unter der Oberfläche konzentrierte (s. Proben A-1 und -2), nahezu vollständig beseitigt werden.

Bewertung

Am leichtesten und mit nur minimalen Rückständen auf dem Mauerwerk ließ sich die Bentonit-Kompresse abnehmen. Sie zeigte auch hinsichtlich der maschinellen Verarbeitung mit Abstand die besten Eigenschaften. Die beiden anderen Materialien (Tab. 1) bedürfen der Optimierung bezüglich Sieblinie, Mischungsverhältnis und Zuschlagsart.

Die größte Menge Salz wurde dem Mauerwerk mit der Kaolin-Cellulose-Sand-Kompresse entzogen. Dieses Ergebnis stimmt mit Versuchen am Rathaus von Bruttig-Fankel (EGLOFFSTEIN und AURAS, 2000) überein. Probleme bereitet die Kompresse jedoch beim Abnehmen, und sie lässt eine starke Weißfärbung – bedingt durch Kaolinrückstände – auf der Gesteinsobefläche zurück (Abb. 8).

Zur Zeit kann nur die Bentonit-Kompresse zur Anwendung empfohlen werden. Die Kaolin-Kompresse bietet jedoch mit ihrer hohen Entsalzungswirkung ein hohes Potential, sofern die Verarbeitungsprobleme - bessere Maschinengängigkeit durch Optimierung der Mischung und geringere Rückstände auf der Mauerwerksoberfläche z.B. durch Aufbringen einer Cellulose-Zwischenschicht - behoben werden können.

Abb. 8: Mauerwerksoberfläche nach Abnahme der Kaolin-Cellulose-Sand-Kompresse. Die Seitenlänge des Pfeilers beträgt etwa 1 m.

II. Elektrochemisch unterstützte Kompressenentsalzung an der ehemaligen Augustinerkirche Trier und am Kamin der Eisenhütte von Schloss Weilerbach

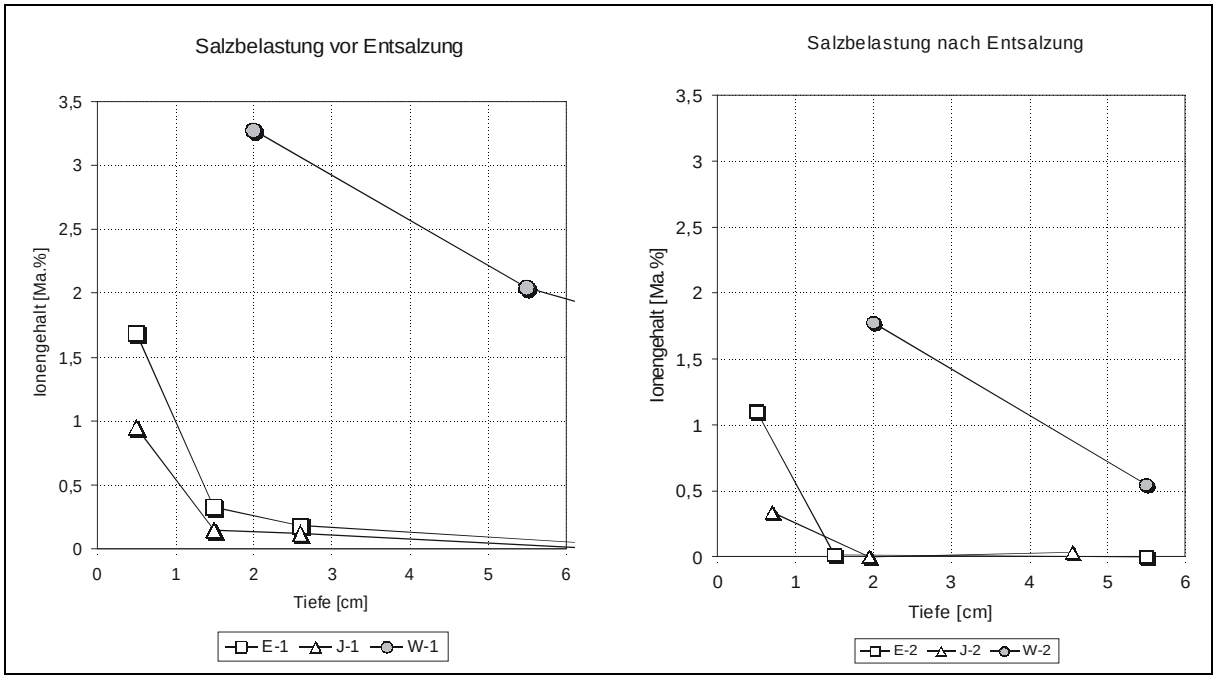


Abb. 9: Gesamtgehalte wasserlösliche Ionen [in Ma.%] im Tiefenprofil der Sandsteine der Augustinerkirche (Proben E und J) und des Ziegelmauerwerks des Kamins in Weilerbach (Probe W) vor und nach der Entsalzung.

Neben dem Materialvergleich der Kompressen wurde an der Augustinerkirche die Kompressenentsalzung mit elektrochemischer Unterstützung untersucht. Parallel erfolgte die Anlage einer zweiten Musterfläche am Kamin der ehemaligen Eisenhütte in Weilerbach (Kreis Bitburg-Prüm). Ähnlich wie die Augustinerkirche war das Ziegelmauerwerk neben Alkalinitraten und –chloriden stark mit Magnesium- und Calciumsulfaten belastet (Abbildung 9).

In die Kompresse aus Bentonit, Cellulose und Sand wurden Gitterelektroden aus Titan eingebettet und an eine externe Spannungsquelle angeschlossen. Bei der angelegten Gleichspannung von rund 97 V stellte sich ein Strom von etwa 750 (Augustinerkirche) bzw. 450 mA(Kamin, Weilerbach) ein und sank gegen Ende der ca. 6-wöchigen Standzeit auf Werte unter 300 mA. Beide Größen wurden per Datenfernübertragung überwacht.

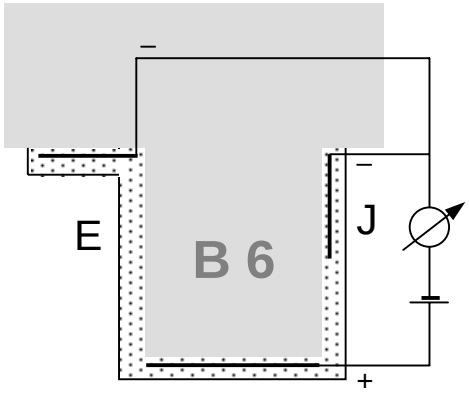


Abb. 10: Schema der Musterfläche zur elektrochemischen Kompressenentsalzung an der Augustinerkirche im Querschnitt des Strebepfeilers B 6.

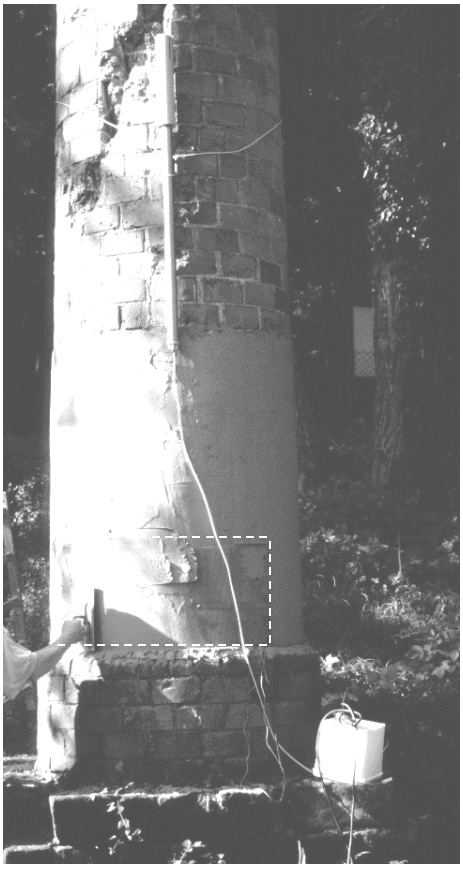


Abb. 11: Kamin der ehemaligen Eisenhütte in Weilerbach. Die Kompresse wurde ringsum auf das Mauerwerk aufgetragen. Der gestrichelte Bereich kennzeichnet die in der Kompresse eingebettete Kathode. Die Anode wurde auf der gegenüberliegenden Seite des Kamins platziert. Oberhalb der Kompresse ist die Antenne zur Datenfernübertragung angebracht.

Die Lage der Musterfläche und die Anordnung der Elektroden an der Augustinerkirche sind in Abbildung 10 schematisch dargestellt. Abbildung 11 zeigt den Kamin mit der angebrachten Kompresse.

Die Wirkungsweise dieses Verfahrens beruht auf der Wanderung der im Wasser gelösten An- und Kationen, die sich unter dem Einfluss des elektrischen Feldes aus dem Mauerwerk in die Kompresse zu den entsprechenden Elektroden bewegen. Um die hierfür notwendige Mindestfeuchte in der Kompresse zu erhalten, wurde sie mit einer Folie luftdicht abgedeckt.

Ergebnisse

Im Bereich der Anode wies die Bentonit-Kompresse bereits nach zwei Wochen zentimetergroße weiße Knoten auf (Abbildung 12). Die röntgenographische Untersuchung dieser Ausblühungen ergab, dass sie ausschließlich aus Titandioxid bestanden. Ihre Herkunft ist demnach auf die Oxidation des Titan-Elektrodengitters zurückzuführen, was durch das sichtbar angegriffene Metall bestätigt wurde. Um die Knoten herum bildeten sich gelbliche und im Randbereich der Elektrode braune Verfärbungen. Dagegen zeigte die Kompressenoberfläche einen weißen Schleier im Bereich der Kathode und um sie herum eine etwa 10 bis 20 cm breite weiße Kruste (Abbildung 13).

Aus der Analyse der Kompressenproben geht hervor, dass höhere Salzmengen dem Mauerwerk nur im Bereich der Elektroden entzogen wurden (Abbildung 14). Sehr unterschiedlich waren ebenfalls die pH-Werte der untersuchten Eluate. Sie reichten von pH 3 im Bereich der Anoden bis pH 10 an den Kathoden.

Generell kommt es an den Elektroden zu einem elektrischen Ladungsaustausch, bei dem z.B. aus Metallkationen Metallatome entstehen, die sich direkt an der Kathode abscheiden können. Bei der Entladung von Anionen, können sich die entsprechenden Elemente (z.B. Chlorgas aus Cl^- -Ionen) bilden und im Falle komplexer Anionen Folgeprodukte entstehen, die sofort zerfallen oder weiterreagieren (u.a. NÄGELE, 1991).

Die Verteilung der Ionen in den Kompressenproben unterscheidet sich zwar je nach Entnahmestelle, jedoch nicht ganz so, wie vielleicht erwartet. In der Nachbarschaft der Kathoden wurden hauptsächlich Ionen der Alkalimetalle und nur geringe Gehalte an Magnesium- und Calciumionen festgestellt. Untergeordnet treten Ionen der Sulfate und Chloride auf. In den Proben der Augustinerkirche wurde zudem Nitrit, das durch Reduktion von Nitrat entstanden ist, nachgewiesen (Abbildungen 15, 16).

Die Kompresse aus dem Anodenbereich enthält erwartungsgemäß höhere Gehalte an Chlorid- und Nitrationen, aber auch höhere Mengen der Kationen des Calcium und Magnesium. In der Betrachtung der Sulfationengehalte zeichnet sich zwischen den beiden Objekten ein deutlicher Unterschied ab. Während an der Augustinerkirche dem Mauerwerk keine nennenswerten Mengen entzogen werden konnten, betrug der Sulfatanteil am Gesamtionengehalt in der Kompresse aus Weilerbach etwa 55 %.

An der Augustinerkirche sanken die Salzgehalte im Sandstein oberflächennah um etwa 0,6 Ma.%, und ab

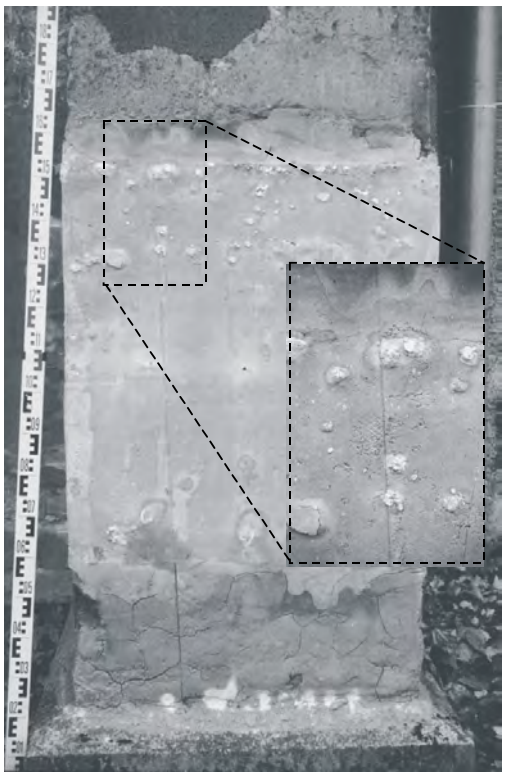


Abb. 12: Kompresse mit elektrochemischer Unterstützung im Bereich der Anode (Beschreibung im Text).

Abb. 13: Kompresse mit elektrochemischer Unterstützung im Bereich der Kathode.

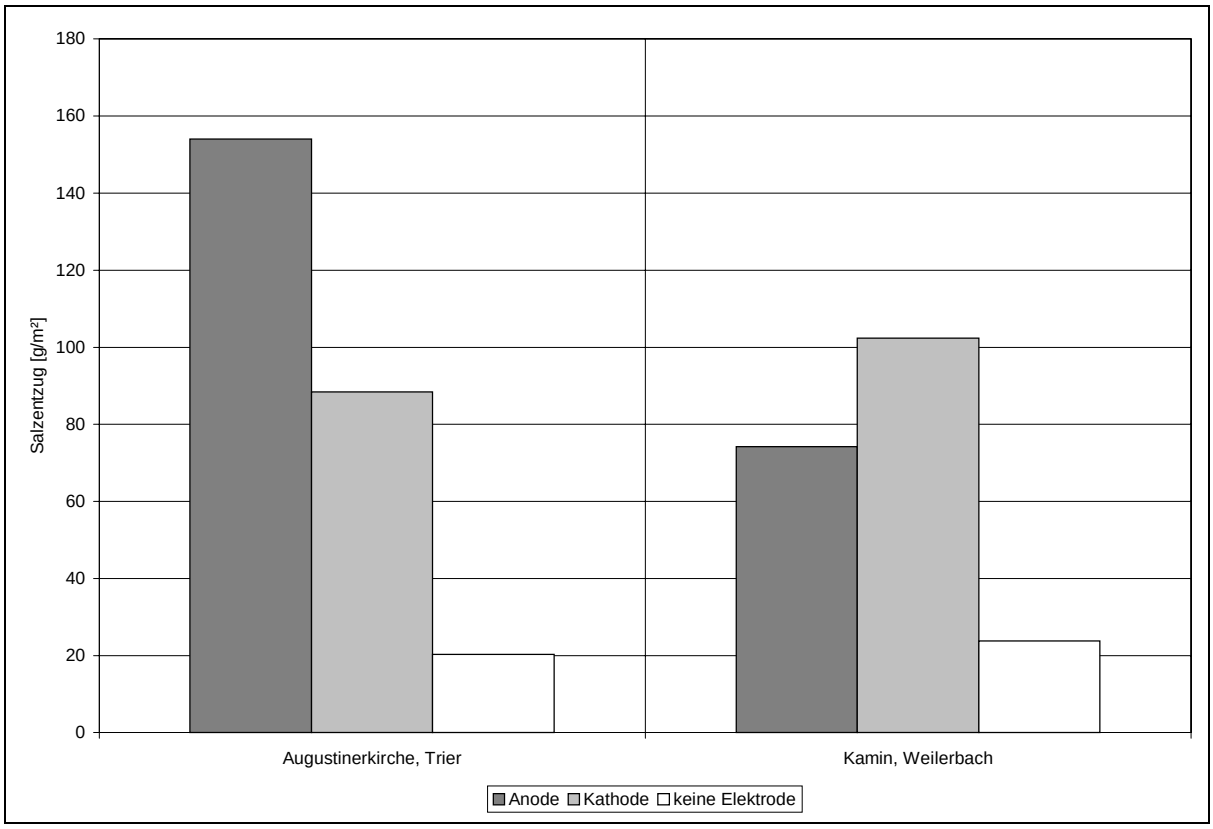


Abb. 14:Salzentzug durch die elektrochemisch unterstützte Kompresse.

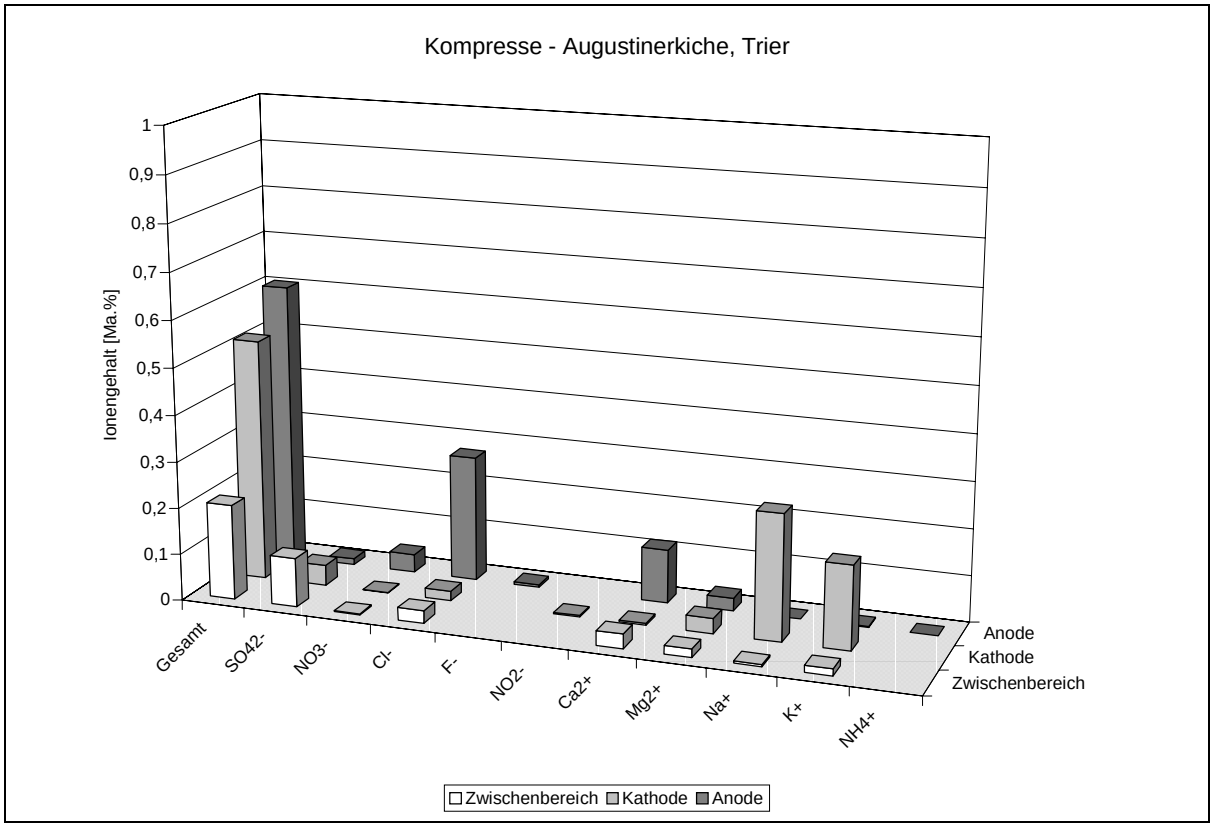


Abb. 15: Durchschnittliche Ionengehalte der Kompressenproben von der Augustinerkirche in Trier entnommen aus dem Bereich beider Elektroden sowie den Zwischenräumen.

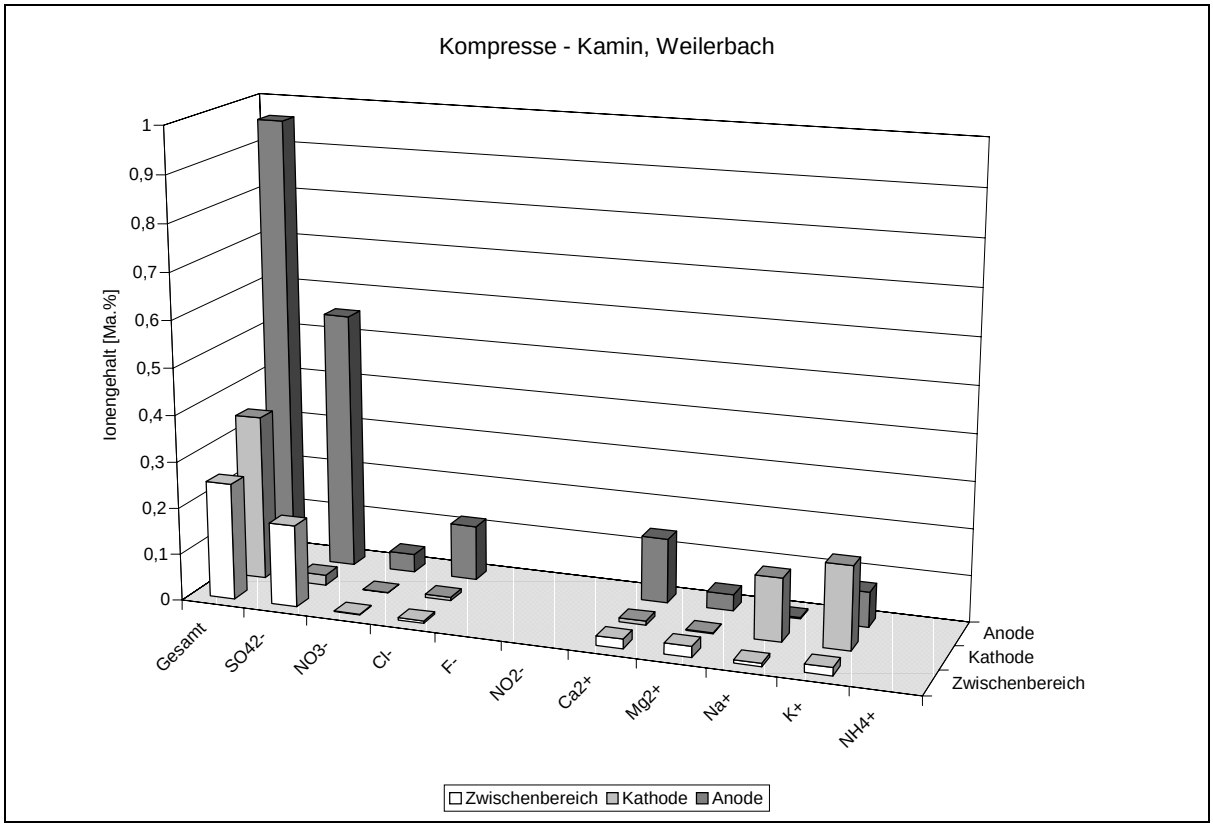


Abb. 16: Durchschnittliche Ionengehalte der Kompressenproben des Kamins in Weilerbach aus dem Bereich beider Elektroden und den Zwischenräumen.

einer Mauerwerkstiefe von 2 cm um 0,17 Ma.% auf Werte unterhalb 0,05 Ma.%. Die Salzbelastung im Ziegel des Kamins konnte bis zu einer Tiefe von 7 cm durchgehend um 1,5 Ma.% reduziert werden (Abbildung 9).

Bewertung

Die Entsalzungswirkung der elektrochemisch unterstützten Bentonit-Kompresse ist gegenüber einer trocknenden Bentonit-Kompresse deutlich höher. In größeren Mengen konnten dem Mauerwerk insbesondere Natrium-, Kalium- und Chloridionen entzogen werden. Die stärkste Salzanreicherung fand im Bereich der Elektroden statt. Im Gegensatz zu der entsprechenden Musterfläche in Trier, wurden in Weilerbach höhere Gehalte an Calcium-, Magnesium- aber vor allem an Sulfationen in der Kompresse nachgewiesen. Zurückzuführen ist dieser Effekt höchstwahrscheinlich auf die deutlich höhere Porosität des Ziegels gegenüber dem Sandstein. Hinzu kommt ebenfalls, dass die Musterfläche am Kamin wirksamer vor dem Austrocknen geschützt werden konnte.

Die hohe Treibspannung und das Vorhandensein von Sulfat im Mauerwerk verursachte im Bereich der Elektroden die Zersetzung von Wasser in H^+ und OH^- -Ionen (NÄGELE, 1991). Dadurch veränderte sich der pH-Wert der Kompressen in den stark sauren (pH 3) beziehungsweise stark alkalischen Bereich (pH 10). Bei säure- oder laugenempfindlichen Untergründen (Mörtel, Farbfassungen) muss daher mit Substanzschäden gerechnet werden. Zudem können durch die sauren Lösungen schwer lösliche Verbindungen im Mauerwerk mobilisiert werden.

An der Augustinerkirche traten im Bereich der Elektroden lokal braune und weiße Verfärbungen des Mauerwerks auf. Die Braunverfärbung des Sandsteins ist vermutlich auf die Mobilisierung seiner eisenhaltigen Bestandteile zurückzuführen. Bei den weißen Verfärbungen dürfte es sich um Titandioxid handeln, wie es sich an der Anode durch Oxidation des Elektrodenmaterials bildete. Auf materialsichtigen Untergründen sind diese Verfärbungen nicht akzeptabel.

Das Verfahren birgt ein Potential, den hohen Zeitaufwand von Kompressenentsalzungen zu reduzieren. Die verwendete Kompresse ist gut verarbeit- und abnehmbar. Der Einsatz von Datenfernübertragung ermöglicht eine Überwachung der Anlage aus der Ferne. Um jedoch auf sicht- und messbare Veränderungen in und auf der Kompresse sofort reagieren zu können, ist eine regelmäßige Kontrolle vor Ort unerlässlich.

III. Einfluss des Untergrundes, dargestellt am Beispiel der Säulen in der Krypta der Stiftskirche von St. Goar

Die romanischen Säulen der Krypta der Stiftskirche St. Goar wurden aus verschiedensten Natursteinarten hergestellt. Die beiden östlichen Säulen, beide aus Basen aus Nahesandstein, Schäften aus Granit und Kapitellen

aus Kalkstein gearbeitet, waren stark salzbelastet und zeigten entsprechende Verwitterungsschäden. Basen und Kapitelle wiesen starke Salzausblühungen auf, an einer Basis wurden diese als Epsomit ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) identifiziert. Die Granitschäfte wiesen vor allem im unteren Teil im Anschluss an die Sandsteinbasen Ablösung dünner oberflächenparalleler Schalen auf.

Im Zuge ihrer Restaurierung wurden drei Entsalzungszyklen mit Bentonitkompressen mit Standzeiten von je 4-6 Wochen durchgeführt. Vor dem ersten Zyklus wurde nur wenig vorgenässt, um eine Verfrachtung oberflächennah aufkonzentrierter Salze in das Gesteinsinnere zu vermeiden. Vor dem zweiten Zyklus wurde hingegen intensiv vorgenässt, um nun auch tiefergelegene Schadsalze mobilisieren und entfernen zu können. Da zwischenzeitlich die Raumheizung in Betrieb genommen war, wurde vor dem dritten Zyklus ebenfalls intensiv vorgenässt und zur Regulierung der Trocknungsgeschwindigkeit eine feuchteadaptive Folie aufgebracht (vgl. Ettl & Krus, 2001). Diese Folie ist nicht wasserdampfdicht, sondern verändert ihren sd-Wert (ein Maß für die Diffusionsoffenheit) in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte. Ist der Untergrund nass, so lässt sie eine schnelle Trocknung zu, nimmt der Feuchtegehalt der Kompresse jedoch ab, so erhöht sich ihr sd-Wert und die weitere Trocknung wird verzögert. Damit sollte ein vorschnelles Durchtrocknen der Kompresse vermieden und der Kapillarkontakt zwischen Kompresse und Stein möglichst lange aufrecht erhalten werden. Die Ergebnisse des ersten und zweiten Zyklus sind in Tabelle 2 dargestellt, der dritte Zyklus läuft noch.

Es wird deutlich, dass die Bauteilhöhe und die Feuchtetransporteigenschaften der Substrate wesentlichen Anteil auf den Entsalzungserfolg haben. Es ist anzunehmen, dass auch auf die Salzbelastung im Vorzustand sehr unterschiedlich war. Die quantitative Analyse eines Kompresseneluats vom Kapitell zeigte, dass dem Kalkstein insbesondere sehr viel Nitrat, Chlorid und Natrium entzogen wurde, obwohl aufgrund der röntgenographischen Untersuchung im wesentlichen mit Magnesiumsulfaten gerechnet worden war. Auch an diesen Säulen lag also eine Vertikalzonierung (s. Tab. 3) der Salze vor.

Schlussfolgerungen

Für die Durchführung von Kompressenentsalzungen sind einige Voraussetzungen zu beachten:

- Ohne Vor- und Begleituntersuchung zu Art, Konzentration und Verteilung der Schadsalze, ohne Kenntnis der Feuchtetransporteigenschaften und der Belastbarkeit des behandelten Materials können Entsalzungsmaßnahmen nicht erfolgversprechend durchgeführt werden.
- Bei der Bearbeitung sensibler Oberflächen ist eine restauratorische Begleitung der Maßnahme unumgänglich.
- Frühzeitig ist klarzustellen, ob eine temporäre oder eine dauerhafte Entsalzung erreicht werden soll beziehungsweise erreichbar ist.
- Die Kompressenentsalzung ist in das Gesamtkonzept der Erhaltungs- oder Restaurierungsmaßnahmen einzubeziehen. Ihre besonderen Anforderungen, insbesondere die notwendigen Standzeiten sind zu berücksichtigen. Bei trocknenden Kompressen sind mindestens zwei Entsalzungszyklen mit je 4 Wochen Standzeit einzurechnen. Bei dauerfeuchten Kompressen ist eine höhere Anzahl von Entsalzungszyklen von jeweils kürzerer Standzeit einzuplanen.
- Auf Grundlage der Ergebnisse der Voruntersuchungen sind Kompressenmaterial, anzuwendendes Wirkprinzip, Anzahl der Zyklen, Wahl von Anwendungsvarianten (Zwischenschichten, Mehrschichtkompressen, gerichtete Feuchteströme, etc.), Art der Verarbeitung (maschinell, manuell) festzulegen.
- Ausschlaggebend für den Entsalzungserfolg ist der kapillarleitende Kontakt der Kompresse zum Untergrund. Löst sich die Kompresse vom Untergrund ab, so ist der kapillare Zustrom von Salzlösungen in die Kompresse unterbrochen, es kann kein weiterer Salzeintrag stattfinden.

Tab. 2: Einfluss des Untergrundes auf die Kompressenentsalzung der südöstlichen Säule der Krypta der Stiftskirche St. Goar. Bestimmung der Salzgehalte mittels Leitfähigkeitsmessung an Kompresseneluaten.

Probe	Bauteil	Untergrund	Höhe über OKF (m)	Auftragsstärke (cm)	Salzgehalt der Kompresse (Ma%)	Salzentzug (g/m^2)
I. Zyklus						
GOA-1	Basis	Sandstein	0,4	2	0,45	112
GOA-2	Schaft	Granit	0,7	2	0,01	3
GOA-3	Kapitell	Kalkstein	2,1	2	2,69	672
II. Zyklus						
GOA-11	Basis	Sandstein	0,4	1,5	0,41	78
GOA-12	Schaft	Granit	1,1	1,5	0,01	2
GOA-13	Kapitell	Kalkstein	1,9	1,5	3,10	581

Tab. 3: Gehalte wasserlöslicher Ionen einer Kompresse vom Säulenkapitell (2. Zyklus)

SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	F^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	NH_4^+	Summe
0,01	0,85	0,49	n.n.	0,18	0,06	0,29	0,07	n.n.	1,97

- Ist eine Kompresse durchgetrocknet, so finden Verdunstung des Porenwassers und damit die Kristallisation von Salzen wieder im Untergrund statt. Ohne erneute Feuchtezufuhr findet also kein weiterer Salzeintrag statt.

Wirksamkeitsunterschiede von Materialien und Methoden

Bezüglich der Entsalzungseffizienz sind tonmineralisch gebundene Kompressen wirksamer als reine Zellulosekompressen. Es scheinen charakteristische Unterschiede zwischen den eingesetzten Tonmineralen zu bestehen, die vermutlich im Wesentlichen auf das sich in den Kompressen bildende Porensystem zurückzuführen sind. Labortests zur Entsalzungswirkung kaolin- und bentonitgebundener Kompressen laufen zur Zeit.

Aufgrund der Möglichkeit, Salze im Zuge der Trocknung aufzukonzentrieren, sind trocknende Kompressen (je Zyklus gerechnet) in der Regel effektiver als dauernasse Kompressen.

Der Wirkungsgrad von Kompressen kann insbesondere dann sehr hoch werden, wenn es möglich ist, einen gerichteten Feuchtestrom vom zu entsalzenden Baustoff in die Kompresse einzustellen und aufrecht zu erhalten.

Auch die Anwendung elektrischer Felder kann die Effizienz deutlich steigern und damit die Behandlungszeiten und Zyklenanzahl reduzieren. Allerdings wirkt sie teils ionenselektiv und ist nicht frei von gravierenden Nebeneffekten (pH, Verfärbungen). Zudem bedarf sie ebenso wie dauerfeuchte Kompressen einer kontinuierlichen Kontrolle, während bei trocknenden Kompressen in der Regel wöchentliche Kontrollen ausreichen.

Literatur

Drobig, A., Lesnych, N. & Venzmer, H. (2001): *Bakterieller Nitratabbau an Ziegeln im Labor – Basis für eine umwelt- und substanzschonende Methode der Mauerwerksentsalzung?* In: Venzmer, H. (Hrsg.): Altbauinstandsetzung - Mikroorganismen und Bauwerksinstandsetzung. Sonderheft Dahlberg-Kolloquium. Verlag Bauwesen Berlin. S. 25-33.

Egloffstein, P. & Auras, M. (2000): *Kompressenentsalzung – Ein Materialvergleich.* Festschrift 10 Jahre Institut für Steinkonservierung e.V., Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz, S. 63 – 74.

Ettl, H. & Krus, M. (2001): *Salzreduzierung mit verschiedenen Kompressen am Schloss Frankenberg und begleitende rechnerische Untersuchungen*. In: Venzmer, H. (Hrsg.): Altbauinstandsetzung 2. FAS-Schriftenreihe, Heft 12, Verlag Bauwesen Berlin, S. 187 - 196.

Ettl, H. & Schuh, H. (1992): *Entsalzungsversuche an Sandsteinen - Umweltbedingte Gebäudeschäden am Zisterzienserkloster Eberbach.* Die Geowissenschaften 10, S. 285 – 287.

Friese, P. & Protz, A. (1999): *Salze im Mauerwerk – Möglichkeiten zur Entsalzung und Salzumwandlung.* In: Venzmer, H. (Hrsg.): Entfeuchtung – Entsalzung. FAS-Schriftenreihe H. 10, Verlag Bauwesen, Berlin.

Goretzki, L. (1996): *Verfahren zum Entsalzen von Naturstein, Mauerwerk und Putz.* WTA-Schriftenreihe Heft 8. Aedificatio Verlag, Freiburg.

Grassegger, G. & Adam, S. (1994): *Untersuchungen zur Entwicklung der mikroskopischen Gefüge von Kieselsäureester-Gelen in Porenräumen mit und ohne Salz,- Feuchtestöreffekte.* In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall - Steinkonservierung, Band 4 - 1992, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 127 - 133.

Nägele, E. (1991): *Praktische Aspekte der elektrischen Trocknung und Entsalzung poröser mineralischer Baustoffe, Teil 1.* Bautenschutz und Bausanierung 17, 7/91, S. 128-129.

Sattler, L. (1992b): *Steinfestigung an salzbelasteten Gesteinen.* In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall - Steinkonservierung, Band 2 - 1990, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 165-168.

Venzmer, H., Lesnych, N. & Wolko, F. (1999): *Positive und negative Argumente zum Einsatz der Kerasan-Entsalzung am Schnickmannspeicher in Rostock.* In: In: Venzmer, H. (Hrsg.): Entfeuchtung/Entsalzung. FAS-Schriftenreihe, Heft 10. Verlag Bauwesen Berlin. S. 231-240.

Wilimzig, M. (1996): *Desalting of nitrates by denitrification.* In: Le dessalement des materiaux poreux. 7es Journees d´etudes de la SFIIC, Poitiers, 9-10 mai 1996.

Windsheimer. B., Snethlage, R. & Wihr, R. (1991): *Die Entsalzung von Steindenkmälern.* Bayer. Landesamt für Denkmalpflege, München, Forschungsbericht 4.

WTA-Merkblatt E 3-13-01/D (2001): *Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen*. WTA Publications, Freiburg.

Danksagung

Für die Förderung der Untersuchungen an den Objekten in Trier und Weilerbach danken wir der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.

Horst Schuh

Putz- und Fugenmörtel für salzbelastetes Mauerwerk, ein Praxisbericht

1 Vorbemerkung

Die Instandsetzung von historischem Mauerwerk stellt immer eine Auseinandersetzung mit Salzen und Feuchtigkeit dar. Selbst wenn sogenannte aufsteigende Feuchtigkeit keine Rolle spielt, so verändert sich durch die Salze die Ausgleichsfeuchte der Baustoffe und ein durch kapillaren Wassertransport belastetes, feuchtes Mauerwerk wird vorgetäuscht. Somit müssen bei der Wahl eines Mörtels für Verputz- oder Verfugarbeiten immer beide Belastungsarten in der Planung berücksichtigt werden.

Als Putzmörtel werden generell baustellengemischte Mischungen mit individueller Wahl des Zuschlages und Fertigprodukte (Werktrockenmörtel) jeweils mit mineralischen Bindemitteln angewendet. Bei beiden Sorten gibt es reine Kalkmörtel bis hin zu hydraulischen oder zementhaltigen Kalkmörteln. Mit der Erhöhung des hydraulischen Anteils im Bindemittels wird der Festmörtel fester, widerstandsfähiger und weniger saugfähig. Nur als Werktrockenmörtel werden Leichtputze, das sind hydraulische Mörtel mit Leichtzuschlag, Sanierputze oder Kompressenputze geliefert. Der Sanierputz, „genormt“ in den Merkblättern der WTA [1], verhindert durch die Luftporen und die hydrophoben Porenwandungen die Wanderungen von Salzen an die Putzoberfläche. Dieses System gewährleistet bei richtiger Anwendung eine hohe schadensfreie Lebensdauer von > 10 Jahren. Bei den Kompressenputzen wird durch Herabsetzung der hydrophoben Ausrüstung des Sanierputzes eine bessere Trocknung des Mauerwerkes erreicht bei gleichzeitig hoher Speicherfähigkeit für Salze. Aus diesen grundsätzlich im Bereich der Baudenkmalpflege zur Verfügung stehenden Mörteln kann der Planende abhängig vom Vorzustand und der speziellen Situation objektspezifisch auswählen.

Im Folgenden werden einige Objekte und Maßnahmen vorgestellt, wie sie zu den fast täglichen Aufgaben eines Planers gehören. An dieser Stelle werden neben Forschungsergebnissen mit aufwändigen Vor- und Nachuntersuchungen und Langzeitkontrollen auch die praktische Arbeit vorgestellt, die meistens kurzfristig geplant, entschieden und durchgeführt werden muss.

2 Frühere Maßnahmen

Bei der Voruntersuchung aktueller Instandsetzungsobjekte werden immer wieder Baustoffe und -konstruktionen sichtbar, mit denen unsere Vorgänger versucht haben die Feuchte- und Salzproblematik in den Griff zu bekommen. An 2 Beispielen soll dieser vielleicht aussichtslose „Kampf“ erläutert werden.

Die **St. Michael Kirche in München** besteht wie fast alle Bauwerke in Oberbayern aus einem verputztem Ziegelmauerwerk. An der Vorhalle wurden in den letzten 100 Jahren viele Sanierungsversuche durchgeführt, um die auf allen Fotografien immer sichtbare Feuchte- und Salzbelastung zumindest optisch verschwinden zu lassen.

Anfang des 20.Jh arbeitete man das Außenmauerwerk bis in 1,5 m Höhe zurück und ergänzte es dort durch eine Betonschale (Abb.1). In der Folge traten vermehrt Schäden am Innenputz auf, die in den 70 er Jahre mit dem Aufbringen eines Sanierputzes und teilweise einer raumhohen Vormauerung behoben wurden. Dieser Putz erfüllte jedoch in keiner Weise die heutigen Anforderungen an WTA-Sanierputze. Durch seine geringe Wasserdampfdurchlässigkeit (µ-Zahl: 100 bis 130) wanderte die Wandfeuchtigkeit weiter nach oben und wieder nach außen, so dass heute die Schäden innen über dem Sanierputz und außen über dem Betonsockel erscheinen. Mit der jetzt geplanten Maßnahme werden zuerst die zuletzt verwendeten Baustoffe und –konstruktionen zurückgebaut, falls erforderlich sollen Maßnahmen im Fundamentbereich durchgeführt und möglichst diffusionsoffene Putze und Wandaufbaue verwendet werden.

Ende der 80 er Jahre wurde an der **evangelischen Stadtkirche in Babenhausen** der geschädigte Innenputz auf dem Bruchsteinmauerwerk bis in 1,5 m Höhe

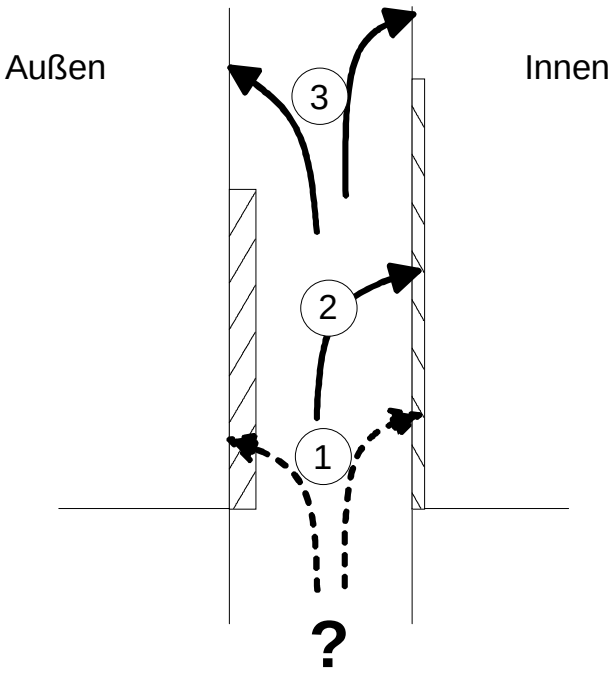


Abb.1: Schematischer Schnitt durch das Mauerwerk mit den sperrenden Putzschichten

abgeschlagen und mit einen Sanierputz ersetzt. Bereits 5 Jahre nach der Ausführung traten über dem Neuputzstreifen starke Schäden an den bislang wenig geschädigten bemalten Putzflächen auf. Die Untersuchung des Innen- und Außenputzes ergab wie so häufig einen aus bauphysikalischer Sicht falschen Wandaufbau. Der seit ca. 20 Jahren vorhandene Außenputz, ein Zementputz mit Zusatzmitteln (?), ermöglicht weder auf kapillaren noch auf dampfförmigen Weg eine merkliche Abgabe der Mauerfeuchtigkeit. Durch die Verwendung eines deckenden Zementspritzwurfs unter dem Sanierputz im Inneren wurde auch die Wasserabgabe über den Putz an den Innenraum stark eingeschränkt. Die Trocknungsfront und damit die Salzausblühungen wurden weiter nach oben in den Altputz verlegt.

3 Objekte

Am Anfang der Darstellungen von aktuellen Instandsetzungsbeispielen wird über ein Forschungsobjekt berichtet [2] [3], das eigentlich die Entsalzung zum Thema hat (vgl. auch Auras und Melisa in diesem Band), das aber trotzdem Rückschlüsse für die Verwendung von normalen Mörteln auf versalztem Mauerwerk zulässt.

Bei der Untersuchung verschiedener Mauerwerksabschnitte an der **Vorderburg von Schloss Frankenberg** zeigt sich, dass neben Chlorid- und Sulfatverbindungen überwiegend eine Versalzung durch Kaliumnitrat vorhanden ist. Die Salzmengen sind bis zu 4 M-% im Sandstein und über 8 M-% im Mauermörtel außerordentlich hoch und stark in die Tiefe reichend.

Ursache der starken Versalzung ist in der langjährigen Nutzung des Gebäudes als Stall zu suchen. Die Hygroskopizität von Kaliumnitrat verursacht eine Durchfeuchtung bis in Mauerwerkshöhen, die durch sogenannte aufsteigende Mauerwerksfeuchtigkeit nicht mehr erreicht werden (ca. 6 m über GOK).

Im Rahmen des Projektes wurde der Auftrag von unterschiedlichen Kompressen erprobt, das Ergebnis, d.h. die Wirksamkeit der Entsalzung im Labor ermittelt und mit Hilfe eines Computerprogrammes zur Berechnung von Wärme- und Feuchtetransportvorgängen rechnerisch überprüft. In jeweils 1 m² großen Musterflächen wurden 2 Kompressenarten insgesamt 3 mal auf das Sandsteinmauerwerk gebracht. Als Kompresse wurde eine Bentonit-Gemisch (Bentonit, Zellulose, Poraver, Sand) und ein Kalkputz verwendet. Die für die Berechnung erforderlichen Materialkennwerte wurden für das Kompressenmaterial und dem Sandstein bestimmt.

Die Entsalzungswirkung einer Kompresse beruht darauf, dass mit dem Wasser aus dem Mauerwerk das Salz kapillar in die Kompresse transportiert wird. Zwischen unterschiedlichen Materialien, z.B. zwischen Putz und Mauerwerk bilden sich Widerstandsschichten, die den Kapillartransport erheblich verringern. Dies kann an einem einfachen Saugversuch im Labor geklärt werden (Abb. 2). Durch rechnerisch Modellierung werden aus dem Laborversuch die Wasseraufnahmekoeffizienten der Widerstandsschichten berechnet. Während der Sandstein einen w-Wert von 2,75 kg/m²√h besitzt, reduziert sich dieser in der Widerstandsschicht von der Bentonit-Kompresse auf etwa 1,2 kg/m²√h. Beim Kalkputz ergibt sich dagegen ein wesentlich kleinerer Wert von 0,1 kg/m²√h. Bei der Berechnung des kapillaren Feuchtetransportes zeigen die beiden Kompressen ein unterschiedliches Verhalten (Abb. 3). Bei beiden Materialien findet zuerst ein Transport von der gesättigten Kompresse in den Sandstein statt. Nach ca. 5 Tagen dreht sich die Transportrichtung um, so dass ab diesem Zeitpunkt über die Widerstandsschicht Salz in das Kompressenmaterial wandert. Bei der Bentonit-Kompresse werden innerhalb von 60 Tagen etwa 15,6 kg/m² Wasser

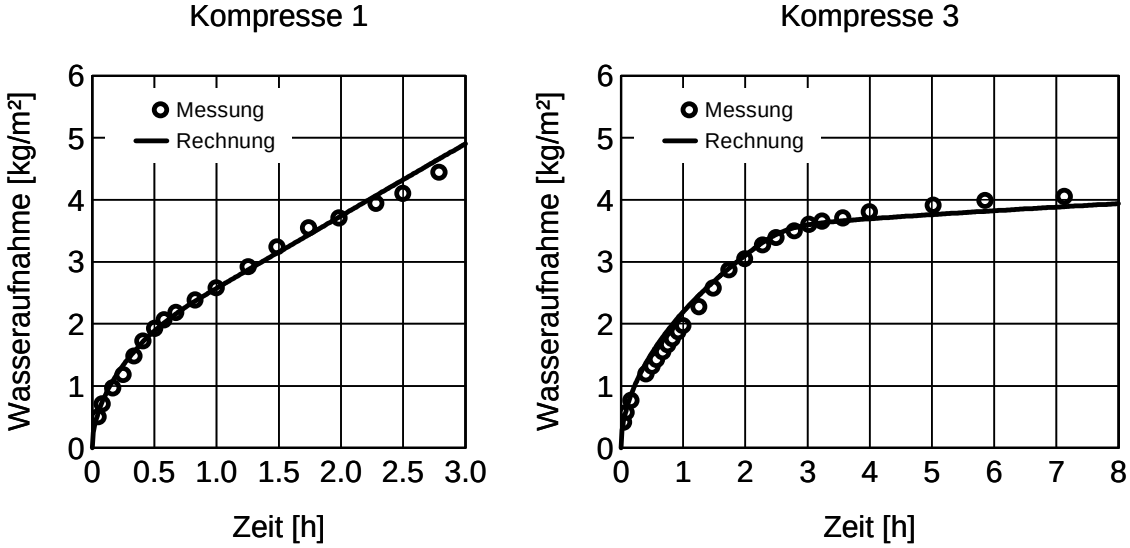


Abb. 2: Wasseraufnahme von Proben bestehend aus Sandstein mit Bentonit-Kompresse (links) und Kalkputz (rechts)

und damit die leicht löslichen Salzverbindungen kapillar in die Kompresse transportiert und abgelagert. Die extreme Widerstandsschicht zwischen Sandstein und Kalkputz verringert den Feuchtetransport erheblich, so dass rechnerisch nur 7,1 kg/m² Wasser aus dem Gestein in den Putz wandern.

Das Ergebnis der Berechnungen konnte durch die Untersuchungen an den Musterflächen bestätigt werden. Nach dem 3. Durchgang mit der Bentonit-Kompresse war der Salzgehalt im Sandstein über den gesamten beprobten Tiefenbereich (0 bis 20 cm) auf durchschnittlich 1,2 M-% reduziert. In die Bentonit-Kompressen waren insgesamt 1800 g Salz pro Quadratmeter Sandsteinoberfläche eingewandert. Der Wirkungsgrad der Kalkputz-Kompresse bleibt mit insgesamt 700 g/m² entfernter Salze vergleichsweise gering.

Die Berechnungen sowie die Messungen zeigen, dass mit den beiden Kompressenmaterialien Salze aus dem Sandsteinmauerwerk entfernt werden können. Die Wirksamkeit des Kalkputzes ist allerdings weitaus geringer als die der Bentonit-Kompresse. Der Grund hierfür liegt, wie die Berechnungen zeigen, im wesentlichen am kapillaren Übergangswiderstand zwischen Kalkputz und Sandstein, der deutlich höher ist als bei der Bentonit-Kompresse. Dieses Ergebnis hat auch für die Beurteilung von Kalkmörtel als Putz oder Fugenmörtel Bedeutung. Trotz ihrer guten Saugfähigkeit stellt die Grenzfläche zum Untergrund eine Bremse für die Salzwanderung dar. Die Möglichkeit, dass diese Bremse nur eine begrenzte Wirkung zeigt, wird im nächsten Beispiel deutlich.

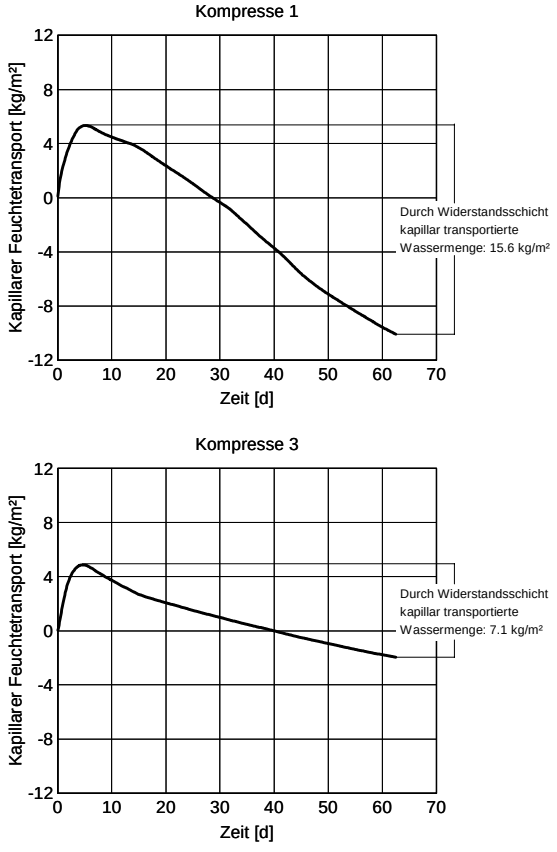


Abb. 3: Berechneter kapillarer Feuchttransport über die Widerstandsschicht zwischen Sandstein und Bentonit-Kompresse (oben) bzw. Kalkputz (unten)

Im **Lapidarium des Domes in Fritzlar** wurden 1991 Musterflächen für die Neuverfugung des Sandsteinmauerwerkes mit unterschiedlichen Materialien angelegt. Das Mauerwerk ist erheblich mit Chloriden (Natrium-, Kalium-, Calcium-), untergeordnet mit Nitraten und Sulfaten belastet. Die ausgeräumten Fugen wurden auf der einen Seite mit Fertigmörtel und andererseits mit einem baustellengemischten Mörtel geschlossen.

Musterfläche 1: porenhydrophober Fugenmörtel „zur Fugensanierung von feuchten, salzhaltigem Sichtmauerwerk“ (Merkblatt), das Produkt entspricht einem klassischem Sanierputz

Musterfläche 2: hydraulisch erhärtender Trockenfertigputz für die „permanente Entfeuchtung und die Vermeidung von Schwitzwasser (Antikondensputz)“ (Merkblatt),

Musterfläche 3: baustellengemischter Fugenmörtel mit Billerbecker Kalk (natürlicher hydraulischer Kalk) und Sumpfkalk als Bindemittel

9 Monate nach der Ausführung wurden 1992 das erste Mal Proben entnommen und der Salzgehalt und die Zusammensetzung im Tiefenprofil bestimmt [4]. Der Baustellenmörtel zeigte über die gesamte Fugenbreite starke Salzausblühungen, die ausschließlich aus Thermonatrit bestehen. Dieses Salz bildet sich vermutlich aus dem Bindemittel des Kalkmörtels und den im Mauerwerk vorhandenen Natriumionen. Jeweils an der Grenzfläche der beiden Fertigmörtel zum Sandstein hatte sich ein schmaler Saum mit Salzen gebildet. Hier wurden neben dem Thermonatrit auch die oben erwähnten Chloride (Halit, Sylvin und Singarit) gefunden. In der Randzone traten bei den beiden Mörteln Verdunklungen auf. Nach 6 Jahren Standzeit wurden aus einem Teil der Musterflächen erneut untersucht [5].

Im Kalkmörtel hat sich der Salzgehalt nach 9 Monaten in den nächsten 5 Jahren Standzeit auf 13 M-% stark erhöht. Die Salze setzten sich überwiegend aus Chloriden zusammen. Hier wird deutlich, dass die Widerstandsschicht zwischen dem Kalkmörtel und dem Untergrund nur eine grenzte Standzeit besitzt. Im „Antikondensputz“ hat sich die Salzbelastung zwischen 1992 und 1997 nicht verändert. Der Salzgehalt im porenhydrophoben Mörtel war 1992 mit 0,6 M-% ähnlich gering wie der im Kalkmörtel (0,7 M-%) (Abb.4). Leider liegen für 1997 keine zusätzlichen Messergebnisse für den hydrophoben Mörtel vor.

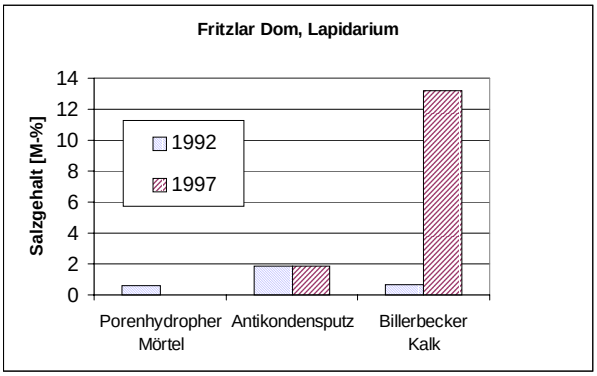


Abb. 4: Salzbelastung der Fugenmörtel: 1992 im Vergleich zu 1997

Bei der Ausführung eines porenhydrophoben Mörtels oder des sogen. Antikondensputzes besteht die Gefahr, dass die Salze verstärkt in den angrenzenden Sandstein einwandern. Die Bildung von Salzsäumen am Kontakt von Fugenmörtel und Sandstein deuten nachdrücklich auf diese Möglichkeit hin. Dieser Mechanismus muss auf alle Fälle vermieden werden. Mit dem Baustellenmörtel wird bei wiederholter Erneuerung langfristig eine erhebliche Entsalzungswirkung erreicht, die letztlich als sehr positiv für das Mauerwerk einzustufen ist.

Mit dem beschriebenen hydraulischen Kalkmörtel (Billerbecker Kalk und Sumpfkalk) wurden in den letzten Jahren im nordhessischen Raum viele Kirchen aus Sandstein- und Tuffsteinmauerwerk mit großem Erfolg verfugt. Trotz teilweise erheblicher Salzbelastung im höheren Sockelbereich sind keine gravierenden Schäden aufgetreten. Auch die Beständigkeit des Mörtels gegenüber hoher Feuchtigkeitsbelastung und damit Frosteinwirkung im Bereich über den an die Bauwerke angrenzenden Gehwegen ist überraschend.

Der **Pfarrhof in Haimhausen**, nördlich von München, zeigte starke Schäden des Außenputzes mit Absanden, Schalenbildung und Totalverlust. Die Ursache der Schäden liegt in einem hohen Feuchtegehalt der Grundmauern bis in 2 m Höhe und einer starken Versalzung bis in etwa die gleiche Höhe, hauptsächlich durch Nitratverbindungen (bis 3,5 M-%). Neben Abdichtungsmaßnahmen im Fundamentbereich wurde für die Eindämmung der Salzbelastung ein Porengrundputz verwendet. Aufgrund konstruktiver Details konnte diese als Salzspeicher fungierende Putzschicht teilweise nur in geringer Dicke (wenige Millimeter) aufgetragen werden. Die Hygroskopizität der Nitratsalze führte bald wieder zu einem dunkleren Erscheinungsbild von Teilbereichen der Fassade, die etwa die Ziegelumrisse nachzeichneten.

Eine andere Ursache haben die dunklen Flecken, die an verschiedenen Stellen der Nordfassade auf dem Anstrich erscheinen. Durch größere Putzdicken (bis 40 mm), Wassereintrag während der Bauzeit und ungenügender Trocknung hat der Mörtel hier noch nicht abgebunden und ist stark alkalisch. Der auswandernde Calciumhydroxid bildet auf der Oberfläche eine dunkler erscheinende Kalksinterschicht (Verglasung).

Im Bereich des Kellerabganges zeigten sich an den Treppenwangen starke Putzschäden mit Salzausblühungen. Da das Gebäude im Bereich neben dem Treppenabgang nicht unterkellert ist, konnte keine Abdichtung aufgebracht werden. Der Nachschub an Feuchtigkeit und Salzen bestand weiterhin. Für die Kaschierung („Ruhigstellung“) der Salze wurde ein sogenannter Kompressenputz mit ca. 12 mm Dicke aufgetragen. Bereits nach einem knappen Jahr zeigten sich erneute Schäden und Ausblühungen. Die Mauerwerksfeuchte war im oberflächennahen Bereich zurückgegangen, in 20 cm Tiefe lag sie jedoch mit 13 M-% in der Größenordnung des ursprünglichen Feuchtegehaltes. Der Salzgehalt ist über die gesamte untersuchte Tiefe mit Werten < 0,1 M-% vergleichsweise gering, trotzdem reichte er aus, um in der Verdunstungsfront, dem Kompressenputz, einen Salzgehalt von 1 M-% anzureichern.

An der **Frauenkirche in Günzburg** und der Klosterkirche von Andechs wurden bei den Voruntersuchungen vergleichbare Verhältnisse vorgefunden. Das Ziegel- bzw. Kalktuff-Ziegelmauerwerk zeigte bei mäßiger Feuchtebelastung teilweise bis in 3,5 m Höhe eine starke Salzanreicherung. In Günzburg äußerte sich die hygroskopische Salzbelastung an dem sehr dichten Zement-Kalk-Putz in geringen Schäden aber deutlichen „feuchten Flecken“. Die Schadensentwicklung deutete auf zunehmende Putzschäden im Inneren hin, so dass der eigentlich gering geschädigte Außenputz aus bauphysikalischen Gründen bis in 4 m Höhe bzw. bis zu horizontalen Architekturelementen abgeschlagen wurde. Durch die Abnahme des wenig dampfdurchlässigen Putzes und Auftrag eines diffusionsoffenerer Putzsysteme sollte die Verdunstungsfront verstärkt wieder zur Außenseite verlagert werden.

Nach dem Abwägen aller Argumente (Fassadengestaltung, Denkmalpflege, Maßnahmen im Inneren, Bauphysik) wurde folgender Putzaufbau durchgeführt. Im Sockel wurde wegen der stärkeren Spritzwasserbelastung und der höheren Feuchtigkeit aus dem Mauerwerk ein kompletter Sanierputzaufbau, bestehend aus Sanierspritzwurf, Porengrundputz und Sanieroberputz, ausgeführt. Darüber in dem überwiegend nur mit Salzen belasteten Mauerwerk wurde auf dem Sanierspritzwurf ein Porengrundputz als „Salzspeicherputz“ aufgebracht. Der nach oben folgende, unbelastete Mauerstreifen erhielt einen sogen. Leichtputz als Unterputz. Beide Unterputze (Porengrundputz und Leichtputz) wurden abschließend mit einem leicht hydraulischen, baustellengemischten Kalkoberputz versehen und damit der Anschluss an den vorhandenen Putz hergestellt. Mit diesen Putzen ist ab der Geländeoberkante sowohl die dampfförmige Wasserabgabe möglich, als auch die Salzeinlagerung in den Porengrundputz. Durch die Verwendung eines normal saugenden Oberputzes wurde mit dem Mineralfarbanstrich ein dem ästhetischen Auge genügender Gesamteindruck geschaffen. Allen Beteiligten war bewusst, dass eine erneute Salzwanderung in den Oberputz möglich ist und sich damit wieder Flecken an der Oberfläche bilden

können. 3 Jahre nach der Ausführung hat sich dieser kombinierte Putzaufbau immer noch bewährt.

An der **Klosterkirche Andechs** war durch das Vorhandensein historischer Putze ein noch differenzierteres Vorgehen bei der Auswahl der Putze erforderlich. Für die Beurteilung der Putze wurden Musterflächen angelegt, beurteilt und das weitere Vorgehen festgelegt. Die vorhandene Putzschicht aus den 50 er Jahren wurde an 3 Fassadenseiten (Nord, West, Süd) abgenommen. Die freigelegten, historischen Putze wurden stabilisiert und mit einem Edelstahlgitter überspannt. Für den Neuverputz in diesem sensiblen Bereich wurde ein reiner Kalkputz gewählt. Die restlichen, nicht mit Salzen belasteten Fassaden, auch die stark bewitterte Westfassade wurden mit einem leicht hydraulischen, baustellengemischten Kalkputz versehen. Der untere Bereich auf der Westseite erhielt aufgrund der vorhandenen Mauerfeuchtigkeit und des Salzgehaltes ein Sanierputzsystem nach WTA. Diese Fläche ist durch Anbauten von der eigentlichen Fassade getrennt, so dass ein direkter Putzübergang nicht vorhanden ist. Im salzbelasteten Bereich auf der Südseite unter dem Streifen mit den überputzten, historischen Putz wurde vergleichbar mit Günzburg ebenfalls ein Porengrundputz mit einem Baustellenmörtel überputzt. Für die eigentliche Sockelzone auf der Südseite, die an einen viel frequentierten Pflasterweg grenzt, war ein weicher Sockelputz vorgesehen, der aufgrund der geringen Festigkeit des Mauerwerkes (Kalktuff und Ziegel) aus einer Kalk-Zement-Mischung (1:1) hergestellt wurde. Nach dem ersten Winter traten hier jedoch bereits Salzausblühungen und Frostschäden auf, die auf die zu hohe Saugfähigkeit und geringe Frostbeständigkeit des Putzmaterials hindeuten. Es ist geplant diesen Putzstreifen mit einen Sanierputz auszubessern, wobei dann ein Übergang zwischen den Fertigmörtel und dem baustellengemischten Putz in Kauf genommen werden muss. Der Porengrundputz darüber hat nach einem Winter seine Funktion erfüllt.

4 Abschließende Betrachtungen

Voruntersuchungen, die die Feuchte- und Salzbelastung eines Mauerwerkes beschreiben, sind für die Instandsetzung von Wandputzen oder Fugenmörtel unbedingt erforderlich. Auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse kann entweder ein „normaler“ Mörtel (Kalk oder hydraulischer Kalk als Bindemittel) oder ein spezieller Sanierputz ausgewählt werden. Auch die Kombination beider Mörtelarten übereinander oder nebeneinander kann mit Erfolg eingesetzt werden. Vor der Entscheidung für den einen oder anderen Mörtel muss immer sehr genau das Ziel der Maßnahme und die Erfolgsaussichten definiert werden. Aus vielen Diskussionen vor der Ausführung ergibt sich über die geplanten Maßnahmen immer wieder eine grundlegend andere Sichtweise des Bauherren und des Denkmalpfleger. Hier kann der Planende vermitteln oder Vorurteile ausräumen. Während aus der Sicht des Bauherren meistens die Optik und die möglichst lange Schadensfreiheit im Vordergrund steht, sorgt sich der Denkmalpfleger über langfristig wirksame und deshalb vielleicht unerkannt bleibende Schadensprozesse und die Nachhaltigkeit der Maßnahmen.

Bei der Verwendung eines reinen Kalkmörtels an einem stark versalztem Mauerwerk ist sehr schnell wieder mit Flecken- und Schadensbildung zu rechnen. Für den Bauherrn ist dieser Zustand nicht zu akzeptieren, für das Mauerwerk kann auf der anderen Seite die schnelle Schadensbildung einen positiven Effekt haben. Der Putz oder Fugenmörtel erfüllt in diesem Fall die Funktion eines Opferputzes, der die Salzbelastung im Mauerwerk reduziert.

Sollte sich durch weitere Untersuchungen bestätigen, dass der Kalkputz eine kapillare Widerstandsschicht zum Untergrund hin aufbaut, muss generell über die Verwendung eines Kalkputzes als sogenannter Opferputz diskutiert werden. Eine Bentonit-Kompresse kann dann das bessere Material für diese Aufgabe darstellen.

Ein den Vorschriften entsprechender Sanierputz gewährleistet trotz starker Feuchte- und Salzbelastung im Mauerwerk eine langfristige Schadensfreiheit. Dieser aus der Sicht des Bauherrn angenehme Fall kann jedoch für das Mauerwerk langfristig auch negative Auswirkungen haben. Bei einem stark durchfeuchtetem Mauerwerk kann durch den Sanierputz die Austrocknung reduziert werden. Im Falle einer starken Salzbelastung wird über den Putz langfristig keine große Entsalzung erzielt.

Bei einem mittelstark versalztem (bis 1 M-%) und gering durchfeuchtetem Mauerwerk bildet die Kombination aus Sanierunterputz (= Porengrundputz) und einem herkömmlichen Oberputz einen guten Kompromiss. Einerseits ist die Standzeit gegenüber einem normalen Putzaufbau erhöht, andererseits wird im Falle der nächsten Erneuerung eine deutliche Entsalzung erreicht. Und zusätzlich kann der Oberputz hinsichtlich der Oberflächenbearbeitung besser an den Altbestand angeglichen werden als ein Sanieroberputz.

Bei der Verfugung eines versalztem Mauerwerkes muss die Verwendung eines Mörtels mit einer geringeren Wasseraufnahme als die des Mauersteines zwangsläufig zu einer Salzanreicherung in den Steinflanken führen. Dieser Vorgang muss durch die Wahl eines saugfähigen Mörtels auf jeden Fall verhindert werden.

5 Literatur

[1] Merkblatt 2-2-91, Sanierputzsysteme, WTA – Wissenschaftlich – Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

[2] H. Ettl, M. Krus, Salzreduzierung mit verschiedenen Kompressen am Schloss Frankenberg und be-

gleitende rechnerische Untersuchungen, FAS-Schriftenreihe Heft 12, Verlag Bauwesen Berlin 2001

[3] H. Ettl, M. Krus, Anwendung und Weiterentwicklung innovativer Verfahren zur Reduzierung der Salzbelastung von Natursteinen und Fugenmörtel am Beispiel der Vorderburg des Schlosses Frankenberg in Bayern, Abschlußbericht für die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, München, 2002

[4] H. Ettl, H. Schuh, Salzuntersuchungen an Fugenmörtelmustern im Lapidarium des Fritzlarer Doms, unveröffentlichtes Gutachten, 1992

[5] M. Auras, Fritzlar, Dom, Lapidarium: Untersuchung zur Feuchte- und Salzbelastung, unveröffentlichter Untersuchungsbericht, Institut für Steinkonservierung Mainz, 1997

Lothar Goretzki und Jan Wiedemann

Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Sanierputzen WTA am Beispiel der Schlossanlage Oberschleißheim (Wilhelmshof)

1 Einführung

Sanierputze WTA sind spezielle geprüfte Werktrockenmörtel, die aus naturwissenschaftlicher und technischer Sicht in der Lage sind, häufig auftretende baupraktische Probleme zu lösen, die mit der zeitnahen Instandsetzung von salz- und feuchtebelastetem Mauerwerk verbunden sind [1]. Seit der Entwicklung dieser Putzsysteme in den 70`ger Jahren, die wesentlich von der WTA gefördert und getragen wurde, haben sich die Sanierputze in den 80`ger Jahren auf dem Markt durchgesetzt. Sie finden heute Berücksichtigung in der europäischen Normung [2; 3; 4]. Wie bei den anderen Putzsystemen auch, hängt die Funktionsweise von der Einhaltung der Rahmenbedingungen ab [5; 6]. Die Leistungsfähigkeit ist von mehreren, sich gegenseitig beeinflussenden objektkonkreten Umständen geprägt. Das Wirkungsprinzip der Sanierputze beruht auf der ausgewogenen inneren Hydrophobierung des Putzgefüges und einer stark reduzierten kapillaren Leitfähigkeit [7]. Der ungezügelte Feuchte- und Salztransport ist eingeschränkt . Die Praxis ist der Prüfstein zur Verifizierung der Funktionsweise der Sanierputze WTA. Auch wenn sich der Kenntniszuwachs im einzelnen praktischen Vergleich nur auf die objektspezifischen Bedingungen beziehen lässt, bleibt ein Teil verallgemeinerbaren Wissens übrig. So ergab sich die Möglichkeit, die vor ca. 10 Jahren im Rahmen des BMBF Projekts „Steinzerfall“ angelegten Putzmuster an den Außenwandinnenflächen des Stallgebäudes Wilhelmshof, Schlossanlage Oberschleißheim nachträglich zu untersuchen. Die Kenntnisse zur ursprünglichen Mauerwerkssituation stützen sich auf Projektunterlagen und Veröffentlichungen [8; 9; 10; 11].

Bei den Außenwänden handelt es sich um ein 1m dickes Ziegelmauerwerk, vermauert mit einem Kalkmörtel. Der Einbau einer horizontalen Sperrschicht war zum Zeitpunkt der Errichtung des Gebäudes nicht üblich. Auch wurde nachträglich keine Horizontalsperre eingebaut. Das Mauerwerk weist eine hohe, von unten nach oben abnehmende Feuchte auf. Die ursprünglich vorhandenen Durchfeuchtungsgrade lagen zwischen 10 und 60%. Auch die Salzbelastung war erheblich, so dass sich das Objekt zum Modellprojekt anbot. Bei den Salzen handelte es sich im wesentlichen um Kaliumnitrat und verschiedene Chloride.

Der Stallraum wurde während der letzten 10 Jahre nicht beheizt und als Lager genutzt, das Raumklima passte sich dem jeweils herrschenden Außenklima mit Zeitverzögerung an.

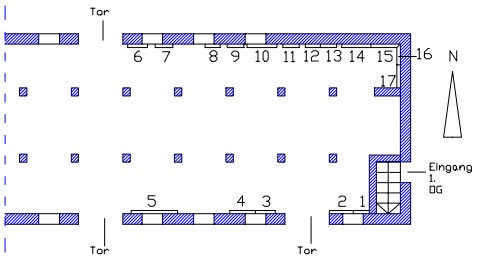


Abb.1: Lage der Probeflächen

2 Durchgeführte Untersuchungen

An den Wandinnenflächen des Umfassungsmauerwerks des Stallgebäudes wurden 1992 nach der Vorbereitung des Putzgrundes 17 Putzmusterflächen angelegt. Die Größe der Putzflächen variierte in der Breite zwischen 1m und 3m. Die Höhe betrug 2m. Die Putzrezeptur und der Putzaufbau wurde durch die Projektbeteiligten selbst vorgegeben.

Im Modellversuch fanden Sanierputze WTA unterschiedlicher Rezepturen Berücksichtigung. Ergänzend wurden Kalkputze, ein Kompressenputz und ein „Entfeuchtungsputz“ einbezogen. Die einzelnen Putzflächen sind in Abb.1 dokumentiert.

Im Dezember 2001 erfolgte die Entnahme von jeweils 3 Bohrkernproben (Durchmesser 50mm) in 0,30m und 0,70m Höhe. Die Länge der Bohrkerne wurde so gewählt, dass das unmittelbar anstehende Ziegelmauerwerk in die Untersuchungen einbezogen werden konnte (60...80mm). Die Raumtemperatur betrug 4,5°C und die relative Luftfeuchte 68%. An allen Putzflächen wurde eine Feuchte- und Salzbilanz über dem Putzquerschnitt erstellt. Die Wäge-Darrmethode diente zur Feuchtebestimmung. Die Anionenanalyse (Cl^-, NO_3^-) erfolgte mit sensitiven Elektroden, die Kationengehalte und das Sulfat wurden mittels ICP-OES Emissionsspektroskopie bestimmt. In Anlehnung an das WTA-Merkblatt 2-2-91 Sanierputze wurden ergänzend nachfolgende Festmörteleigenschaften ermittelt.

- Rohdichte
- Offene Porosität
- W_{24h}-Wert
- Wassereindringtiefe nach 24h
- Hygroskopische Feuchteaufnahme bei 52%r.F. und 98%r.F., jeweils 21°C
- Mörteldruckfestigkeit

3 Ergebnisse

Die Inaugenscheinnahme der durchweg unbeschichteten Putzmusterflächen ergab folgende Resultate. Im unteren Bereich traten dunkle Feuchteflecken und nadelförmige Salzausblühungen (Salzbärte) auf. Diese Erscheinungen zeigten sich unmittelbar über OKF und dehnten sich bis ca. 0,45 m Mauerwerkshöhe aus. Teils verliefen diese Bereiche parallel zur OKF, teils war die Ausbildung kreisförmig bzw. fleckenartig. Die Intensität dieser Erscheinungen war bei den einzelnen Putzsystemen signifikant unterschiedlich. Eine sichtbare Gefügeschädigung oder gar ein Versagen des Putzaufbaus kann daraus nicht abgeleitet werden. Es gab Sanierputzsysteme bei denen nahezu keine Veränderungen an der unbeschichteten Oberfläche nach 10 Jahren Standzeit zu beobachten waren (Abb.2, 3). Andere Sanierputzsysteme sanden an der Oberfläche geringfügig ab (Abb.3).

Der „Entfeuchtungsputz“ wies neben Feuchteflecken und Ausblühungen ein über der gesamten Oberfläche verteiltes Schwindrisssystem auf (Abb.4).

Die beiden Kalkputzflächen waren in einem desolatem Zustand. Der Verbund des Putzes zum Untergrund versagte, eine Haftung war nicht mehr vorhanden. Der Kornverbund war so geschwächt, dass die Proben bei Berührung zerfielen. Die Schädigung war bei den mit einer dünnschichtigen Glätte versehenen Putzfläche intensiver. Der Glätteputz schalte ab (Abb.5).

Die Oberfläche des Kompressenputzes wies Ausblühungen in der Höhe von 0,45m auf, das Putzgefüge zeigte keine sichtbaren Schäden auf (Abb.6).

Die vorliegende Auswahl der Ergebnisse berücksichtigt sowohl Aspekte der Putzrezeptur als auch des Putzaufbaus. Nachfolgend werden die Feuchte-/Salz-Bilanzen und die ermittelten Festmörteleigenschaften von ausgewählten Musterflächen dargestellt.

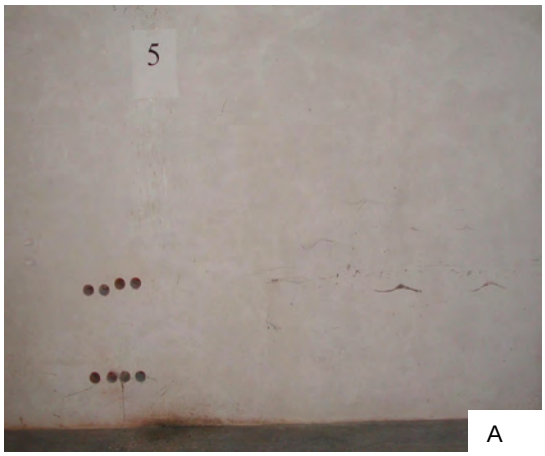


Abb.2: Putzfläche nach 10 Jahren
A: Standzeit,
B: Fleckenbildung,
C: Salzausblühungen

Abb.3: Putzfläche nach 10 Jahren Standzeit, absanden im Sockelbereich

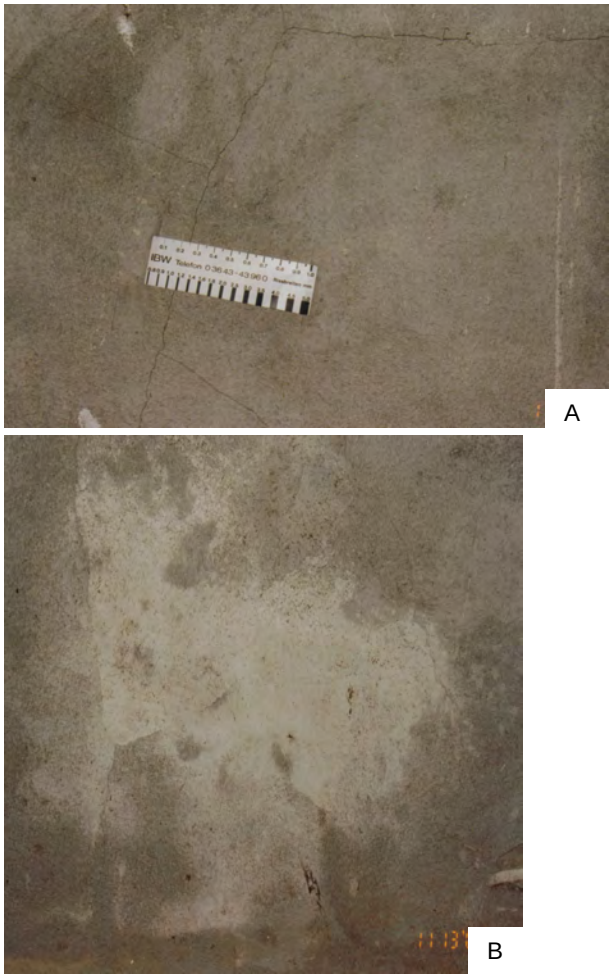


Abb.4: Putzmusterfläche „Entfeuchtungsputz“,
A: Risssystem,
B: Salzausblühungen

Abb.6: Kompressenputz, Detail Salzausblühungen

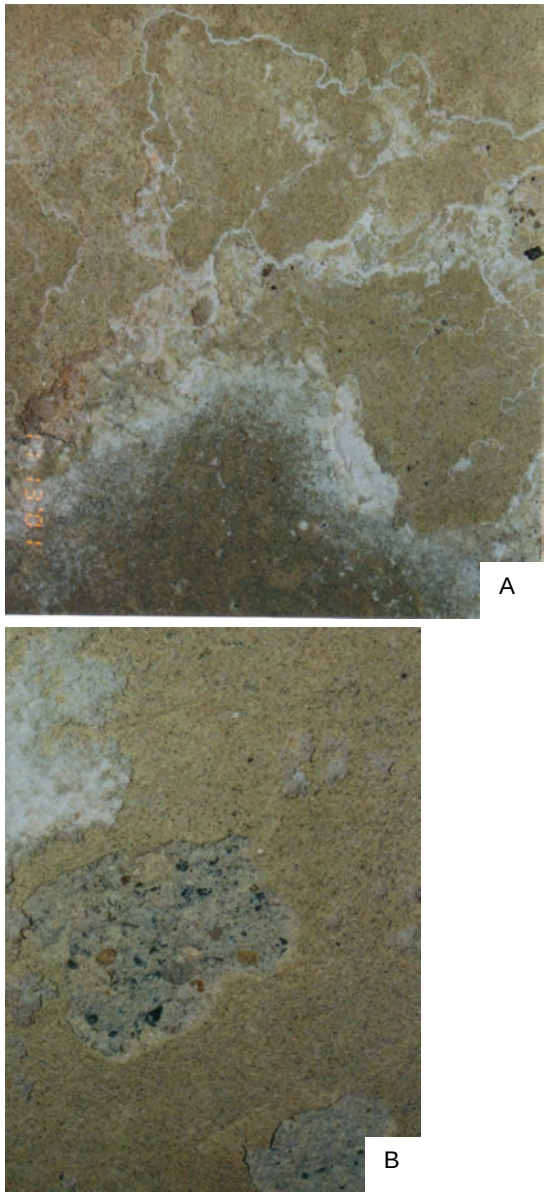


Abb.5: Kalkputze,
A: Detail Salzausblühungen,
B: Abschalungen

3.1 „Klassischer Sanierputz“

Seit Beginn der 90`ger Jahre ist es Stand der Technik ein Sanierputzsystem auf einem stark feuchte- und salzbelastetem Mauerwerk in drei Arbeitsgängen aufzutragen. Die Systembestandteile waren im einzelnen Spritzbewurf, Porengrundputz und Sanierputz. Die Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse an Beispielen auf.

Das Ziegelmauerwerk hinter beiden Putzflächen, die nicht unmittelbar nebeneinander angelegt worden waren, wies Durchfeuchtungsgrade zwischen 13% und 30% auf, wobei der Durchfeuchtungsgrad nach oben hin abnahm (Tabelle 1). Im nachfolgenden Porengrundputz lag der Durchfeuchtungsgrad immer signifikant darunter. In den unteren stärker feuchtebelasteten Bereichen war die Differenz der Durchfeuchtungsgrade Mauerwerk/ Porengrundputz deutlich größer. Im Sanierputz setzte sich die Abnahme des Durchfeuchtungsgrades fort. Die Durchfeuchtungsgrade im unteren Bereich lagen etwas höher (4% bzw. 7%) als im oberen Untersuchungsbereich (2,7% bzw. 5,1%).

Die hygroskopischen Durchfeuchtungsgrade lagen im Porengrundputz immer über denen des Sanierputzes (Tabelle 1). Dies korreliert mit der Salzbelastung (Tabelle 2). Die Salzbelastung im Mauerwerk war geringer als im Porengrundputz, Kaliumnitrat dominierte. Andere Schadsalze wie Kaliumsulfat, Natriumchlorid und Natriumsulfat wurden nur im Putzmörtel gefunden, nicht im Mauerwerk selbst.

Die bestimmten Festmörteleigenschaften sind begrenzt mit denen nach WTA- Merkblatt 2-2-91 ermittelten Kennwerten vergleichbar. Die Standzeit des Putzes und die andere Probenvorbereitung sind zu berücksichtigen. Tendenzen sind deshalb angemessen zu interpretieren.

Die für die Wirksamkeit wesentlichen Eigenschaften, wie hydrophobes Mörtelgefüge, hohes zugängliches Porenvolumen und mechanische Beständigkeit des Putzaufbaus konnten nachgewiesen werden. Beide Sanierputzsysteme erfüllten in der Gesamtheit nicht alle im WTA - Merkblatt 2-2-91 formulierten Anforderungen.

3.2 Zweilagige Sanierputze mit gleicher Mörtelrezeptur

Die angetroffenen Durchfeuchtungsgrade des Ziegelmauerwerks schwankten zwischen 17% und 71%, wobei die Durchfeuchtungsgrade nach oben hin deutlich abnahmen (Tabelle 4). Im Putzquerschnitt lagen die Durchfeuchtungsgrade unter denen des Mauerwerks, erwartungsgemäß war das Gefälle von Unterputz zu Oberputz nicht so stark ausgeprägt, jedoch in den meisten Fällen nachweisbar. Bei geringeren Mauerwerksfeuchten differierten die Durchfeuchtungsgrade des unteren und oberen Messbereiches stärker.

Im Vergleich zum Sanierputzsystem PG/SP lag der hygroskopische Durchfeuchtungsgrad im Deckputz immer höher. Dies traf auf die absoluten Werte, wie auch die Werte abhängig von der Entnahmehöhe zu. Die Werte korrelierten mit den Salzgehalten im Putzgefüge. Beim Putzsystem 7 und im oberen Bereich des Systems 16 waren die nachweisbaren Ionenkonzentrationen im Unterputz unwesentlich geringer als im Oberputz. Das Kaliumnitrat dominierte als Salz. Auch wurden verschiedene Chloride gefunden. Sicherlich systemspezifisch waren lösliche Sulfate und Magnesiumsalze nachweisbar. Die Festmörteleigenschaften sind in Tabelle 6 verzeichnet. Eine teilweise erhöhte kapillare Wasseraufnahme einzelner Proben wies auf den Abbau der Hydrophobie des Putzgefüges hin. Eine Gefügeschwächung war nicht erkennbar. Auch bei diesen Putzsystemen wurde ein hoher zugänglicher Porenraum und eine mechanische Beständigkeit gefunden.

3.3 Zum Einfluss der porenhydrophoben Eigenschaften

Zum Vergleich wurden zwei Sanierputzsysteme ausgewählt. Das Mauerwerk wies Durchfeuchtungsgrade zwischen 13% und 50% auf. Beide Sanierputzsysteme wurden in Lagen gleicher Mörtelrezeptur aufgebaut. Bei dem stärker hydrophobierten System, was sich am W_{24h}–Wert zuerkennen gab, wurden geringere Durchfeuchtungsgrade der einzelnen Putzlagen gefunden (Tabelle7). Dies war im unteren Untersuchungsbereich deutlicher ausgeprägt. Bei dem geringer hydrophobierten System stellten sich nahezu identische Durchfeuchtungsgrade in den beiden Putzlagen ein. Die hygroskopischen Durchfeuchtungsgrade lagen in den Deckputzlagen höher, was auf eine Salzeinlagerung hinweist. Im Mauerwerk dominierte wiederum das Kaliumnitrat. Im Putzquerschnitt haben sich weiterhin Chloride und Sulfate des Natriums bzw. Calciums angereichert. Beim System 6 traten systemabhängig zusätzlich lösliche Magnesiumsalze auf.

Die Festmörteleigenschaften sind im Vergleich in Tabelle 9 aufgezeigt. Signifikante Unterschiede beider Systeme mit Ausnahme der porenhydrophoben Eigenschaften wurden nicht gefunden.

Die stärkere Hydrophobie des Putzgefüges bewirkte einen vergleichsweise geringeren Salzeintrag in das Sanierputzsystem.

3.4 Andere Putzsysteme

Nachfolgend werden die Ergebnisse der weiteren einbezogenen Putze beschrieben.

- *Kompressenputz*

Das Mauerwerk wies hohe Durchfeuchtungsgrade auf, in 0,3m Höhe 55% und in 0,7m Höhe noch 41% (Tabelle10).

Die einzelnen Lagen des Kompressenputzes zeigten ein Gefälle des Durchfeuchtungsgrades zur Oberfläche hin an . Dies war im unteren Bereich ausgeprägter. Die Werte waren mit den Messergebnissen an den Sanierputzen vergleichbar. Die hygroskopischen Durchfeuchtungsgrade der einzelnen Putzlagen zeigten keine Unterschiede. Sämtliche Salzionen wiesen einen Konzentrationsanstieg zur Oberfläche hin auf, dies traf auf beide Höhen zu. Insbesondere wurde der Gehalt an Kaliumnitrat im Mauerwerk erheblich reduziert. Die Mörteleigenschaften des Kompressenputzes unterschieden sich von den Sanierputzen nicht in der Festigkeit und der Größe des Porenraums, sondern in der hohen Wasseraufnahme (Tabelle12).

- *„Entfeuchtungsputz“*

Das mit dem „Entfeuchtungsputz“ verputzte Mauerwerk wies die höchsten Durchfeuchtungsgrade die im Modellversuch gemessen wurden auf, in 0,3m Höhe 96% und in 0,7m Höhe 60% (Tabelle 10). Der Durchfeuchtungsgrad der unteren „Entfeuchtungsputzlage“ betrug in 0,3m Höhe 17% bzw. 14% in 0,7m Höhe.

Der Durchfeuchtungsgrad der unteren Putzlagen wurde beim Kompressenputz und den schwächer hydrophobierten Sanierputzlagen mit ca. der Hälfte des Durchfeuchtungsgrades des Mauerwerks gefunden. Beim „Entfeuchtungsputz“ hingegen war der Durchfeuchtungsgrad der unteren Putzlage um das ca. 5 fache geringer, was auf eine erhebliche stärkere Hydrophobie des „Entfeuchtungsputzes“ hinweist. Das Feuchtegefälle beider Putzlagen zur Putzoberfläche hin hat sich ähnlich wie bei den Sanierputzen ausgebildet.

Die Werte für den hygroskopischen Durchfeuchtungsgrad lagen auf dem gleichen Niveau wie bei den stärker

hydrophobierte Sanierputzen. Das Kaliumnitrat wanderte in dem Putzquerschnitt und an die Oberfläche (Tabelle11). Die W_{24h}-Werte waren erwartungsgemäß gering, die Festigkeit jedoch hoch (Tabelle12). Eine „Entfeuchtung“ des Mauerwerkes konnte nicht nachgewiesen werden. Eher gaben die Messwerte Anlass zu Bedenken in umgekehrter Richtung.

- *Kalkputz*

Das Mauerwerk besaß einen hohen Durchfeuchtungsgrad, in 0,3m Höhe 81% und in 0,7m Höhe 37%. Die auf Grund des desolaten Zustandes der Proben schwierig zu bestimmenden Durchfeuchtungsgrade der Putze waren vergleichsweise hoch (Tabelle10). Dies traf auch auf die hygroskopischen Durchfeuchtungsgrade zu. Das bei den Salzen wiederum dominierende Kaliumnitrat hatte sich im Putzgefüge angereichert. Dies traf ebenso auf die Chloride zu. Die „Festmörteleigenschaften“ sind in Tabelle 12 verzeichnet. Das Porenvolumen betrug ca. 30 Vol%. Die maximale Wasseraufnahme wurde mit ca. 16% bestimmt. Der Kalkputz war mechanisch nicht belastbar.

4 Zusammenfassung

An einem stark feuchte- und nitratbelastetem Mauerwerk wurden Putzmusterflächen angelegt. Einbezogen wurden Sanierputzsysteme, ein „Entfeuchtungsputz“, Kalkputze und ein Kompressenputz. Nach ca. 10 Jahren Standzeit erfolgte eine Untersuchung der Feuchte- und Salzbelastung des Mauerwerks und des Putzquerschnittes sowie die Erfassung der Festmörteleigenschaften. Eine Auswahl der Ergebnisse wurde vorgestellt.

Die Funktionsweise sowohl der Sanierputzsysteme bestehend aus Porengrundputz und Sanierputz als auch der Systeme aus gleichrezeptierten Putzlagen war nicht grundhaft beeinträchtigt. Bei letzteren Systemen wanderte die Salzfront bereits in die Deckputzlage. Ausblühungen von Kaliumnitrat und Feuchteflecken waren im unteren Putzbereich vorhanden, die mechanische Beständigkeit war weiterhin gegeben. Eine stärkere Hydrophobierung des Putzgefüges führte zu einem reduzierten Salz- und Feuchteeintrag in das Sanierputzsystem. Eine Austrocknung des Mauerwerks hatte keines der Putzsysteme im Verlauf der 10 Jahre bewirkt. Eine Reduzierung des Feuchtegehaltes des Mauerwerkes konnte nicht sicher belegt werden, jedoch aber eine Reduzierung des Salzgehaltes. Beim „Entfeuchtungsputz“ wies das Mauerwerk Durchfeuchtungsgrade von bis zu 96% auf. Es kann sicherlich von einer Feuchteanreicherung hinter der Putzschicht ausgegangen werden. Die Salze durchwanderten den Putzquerschnitt.

Der Kompressenputz führte zu einem deutlichem Salzaustrag in den Putzquerschnitt hinein. Die Feuchtesituation stellte sich vergleichsweise wie bei den Sanierputzen dar.

Der Kalkputz war stark feuchte- und salzbelastet, das Mörtelgefüge versagte. Das darunterliegende Mauerwerk wies sehr hohe Durchfeuchtungsgrade auf.

Weiterführende Untersuchungen zur Gefügestruktur der salzbelasteten Putze werden Aufschluss über den Transportmechanismus der Salze erbringen.

5 Literatur

[1] H. G. Meier:
Sanierputze; expert Verlag Renningen, 1999

[2] WTA - Merkblatt 2-2-91; „Sanierputze“; www.wta.de

[3] WTA – Merkblatt 2-6-99; „Ergänzung Sanierputze“; www.wta.de

[4] aktuelle Liste der zertifizierten Sanierputze WTA; www.wta.de

[5] L. Goretzki, B. Möser, A. Ullrich:
„Untersuchung zum Aufbau und Wirkungsweise von Sanierputzen“
Wiss. Z. Hochsch. Archit. Bauwes. – A/B. – Weimar 39 (1993) 3, S.177-182

[6] L. Goretzki, U. Karolewski:
„ Zum Einfluß der Porenbildungsreaktion des Aluminiums auf das Gefüge von Mörteln“
Proc. Werkstoffwissenschaften Bauinstandsetzen, Bd.II, S.737 ff;
Aedificatio Verlag, Freiburg 1996

[7] L. Goretzki, U. Karolewski:
„Gefüge und Beständigkeit von Sanierputzen bei starker Feuchte- und Salzbelastung“
WTA-Schriftenreihe 7, Sanierputzsysteme;
Aedificatio Verlag, Freiburg 1995

[8] C. Arendt:
„Diagnose und Therapie überhöhter Feuchte-/Salzbelastung in historischen Mauerwerkskomplexen“, Abschlußbericht;
BMFT-Forschungsvorhaben BAU 5030A, 1994

[9] D. Hettmann:
„Sanierputz - nur eine „flankierende“ Maßnahme?“, Teil1 und Teil2;
Bausubstanz, Heft 10-12, S.51-53

[10] M. Wittemann:
„Untersuchungen über die Salzaufnahme von Sanierputzsystemen nach mehrjähriger Exposition auf Ziegelmauerwerk“
Diplomarbeit FH – München, 1998

[11] T. Dettmering, H. Kollmann:
„Putze in der Bausanierung und Denkmalpflege“
Verlag Bauwesen Berlin, 2001

Tabelle 1: Feuchtebilanz der Musterflächen 2 und 3

MF	Putzlage	Höhe	DFG [%]	DFG-hygr. 94%r.F. [%]
2	Sanierputz	0,3m	**4,0%**	**1,4%**
	Porengrundputz	0,3m	**13,9%**	**5,1%**
	Mauerwerk	0,3m	**30,0%**	**n.b.**
2	Sanierputz	0,7m	**2,7%**	**2,4%**
	Porengrundputz	0,7m	**10,6%**	**6,4%**
	Mauerwerk	0,7m	**13,0%**	**n.b.**
3	Sanierputz	0,3m	**7,0%**	**5,0%**
	Porengrundputz	0,3m	**16,0%**	**8,1%**
	Mauerwerk	0,3m	**24,2%**	**n.b.**
3	Sanierputz	0,7m	**5,1%**	**3,9%**
	Porengrundputz	0,7m	**18,1%**	**12,1%**
	Mauerwerk	0,7m	**17,6%**	**n.b.**

Tabelle 2: Salzbilanzen der Musterflächen 2 und 3

MF	Putzlage	Höhe	hygroskopische Feuchteaufnahme		Masse%						
			54%r.F.	98%r.F.	Chlorid	SO3	Nitrat	CaO	MgO	K2O	Na2O
	Sanierputz	0,3m	**0,2%**	**0,3%**	**0,03**	**0,06**	**0,04**	**0,26**	**n.b**	**0,07**	**0,02**
	Porengrundputz	0,3m	**0,5%**	**1,8%**	**0,01**	**0,43**	**0,16**	**0,17**	**0,02**	**0,41**	**0,08**
2	Mauerwerk	0,3m	**n.b.**	**n.b.**	**0,05**	**0,02**	**0,11**	**0,01**	**0,01**	**0,15**	**0,04**
	Sanierputz	0,7m	**0,1%**	**0,6%**	**0,01**	**0,01**	**0,02**	**0,46**	**n.b.**	**0,03**	**0,01**
	Porengrundputz	0,7m	**0,7%**	**2,3%**	**0,34**	**0,32**	**0,39**	**0,38**	**0,04**	**0,31**	**0,14**
2	Mauerwerk	0,7m	**n.b.**	**n.b.**	**0,02**	**0,01**	**0,05**	**0,01**	**0,01**	**0,02**	**0,02**
	Sanierputz	0,3m	**0,6%**	**2,2%**	**0,11**	**0,61**	**0,43**	**0,37**	**0,01**	**0,41**	**0,33**
	Porengrundputz	0,3m	**0,7%**	**1,8%**	**0,28**	**0,02**	**0,42**	**0,45**	**n.b.**	**0,26**	**0,14**
3	Mauerwerk	0,3m	**n.b.**	**n.b.**	**0,01**	**0,01**	**0,04**	**0,00**	**n.b.**	**0,10**	**0,02**
	Sanierputz	0,7m	**0,7%**	**1,7%**	**0,08**	**0,51**	**0,14**	**0,14**	**n.b.**	**0,29**	**0,26**
	Porengrundputz	0,7m	**1,2%**	**2,9%**	**0,29**	**0,01**	**0,41**	**0,56**	**n.b.**	**0,35**	**0,16**
3	Mauerwerk	0,7m	**n.b.**	**n.b.**	**0,03**	**0,04**	**0,08**	**0,01**	**0,02**	**0,13**	**0,03**

Tabelle 3: Festmörteleigenschaften

MF	Putzlage	Höhe	Poren-volumen Vol%	Roh-dichte kg/dm³	max. Wasser-aufnahme	W_{24h}	Wasser-eindring-tiefe [mm]	R_D N/mm²
	Sanierputz	0,3m	**40,2%**	**1,6**	**24,5%**	**0,1**	**1**	**6,7**
2	Sanierputz	0,7m	**39,5%**	**1,6**	**24,5%**	**0,1**	**1**	**5,7**
	Porengrundputz	0,3m	**48,8%**	**1,4**	**34,9%**	**1,8**	**durchnäßt**	**5,9**
2	Porengrundputz	0,7m	**49,3%**	**1,4**	**37,4%**	**0,9**	**1,5**	**8,5**
	Sanierputz	0,3m	**51,8%**	**1,2**	**43,3%**	**1,4**	**1**	**12,0**
3	Sanierputz	0,7m	**50,8%**	**1,2**	**43,0%**	**1,1**	**2**	**10,9**
	Porengrundputz	0,3m	**37,6%**	**1,6**	**22,9%**	**1,3**	**2**	**n.b.**
3	Porengrundputz	0,7m	**37,4%**	**1,5**	**24,4%**	**1,6**	**5**	**14,2**

Tabelle 4: Feuchtebilanz der Musterflächen 7 und 16

MF	Putzlage	Höhe	DFG [%]	DFG-hygr. 94%r.F. [%]
	Sanierdeckputz	0,3m	**16,3%**	**15,7%**
	Sanierunterputz	0,3m	**19,2%**	**6,4%**
7	Mauerwerk	0,3m	**71,1%**	**n.b.**
	Sanierdeckputz	0,7m	**14,8%**	**11,6%**
	Sanierunterputz	0,7m	**19,9%**	**9,7%**
7	Mauerwerk	0,7m	**18,7%**	**n.b.**
	Sanierdeckputz	0,3m	**15,3%**	**11,3%**
	Sanierunterputz	0,3m	**24,3%**	**6,5%**
16	Mauerwerk	0,3m	**46,4%**	**n.b.**
	Sanierdeckputz	0,7m	**7,9%**	**10,2%**
	Sanierunterputz	0,7m	**7,9%**	**15,1%**
16	Mauerwerk	0,7m	**16,7%**	**n.b.**

Tabelle 5: Salzbilanzen der Musterflächen 7 und 16

MF	Putzlage	Höhe	hygroskopische Feuchteaufnahme		Mass%						
			54%r.F.	98%r.F.	Chlorid	SO3	Nitrat	CaO	MgO	K2O	Na2O
	Sanierdeckputz	0,3m	**1,1%**	**4,2%**	**0,20**	**0,39**	**1,24**	**0,36**	**0,13**	**0,27**	**0,08**
	Sanierunterputz	0,3m	**0,5%**	**1,7%**	**0,19**	**0,45**	**1,04**	**0,34**	**0,11**	**0,27**	**0,07**
7	Mauerwerk	0,3m	**n.b.**	**n.b.**	**0,05**	**0,04**	**0,13**	**0,01**	**0,01**	**0,18**	**0,04**
	Sanierdeckputz	0,7m	**0,9%**	**3,1%**	**0,17**	**0,31**	**1,36**	**0,35**	**0,17**	**0,18**	**0,07**
	Sanierunterputz	0,7m	**0,8%**	**2,6%**	**0,21**	**0,37**	**1,27**	**0,35**	**0,17**	**0,20**	**0,08**
7	Mauerwerk	0,7m	**n.b.**	**n.b.**	**0,10**	**0,01**	**0,27**	**0,06**	**0,07**	**0,10**	**0,04**
	Sanierdeckputz	0,3m	**1,0%**	**3,7%**	**0,33**	**0,59**	**1,09**	**0,44**	**0,03**	**0,69**	**0,14**
	Sanierunterputz	0,3m	**0,6%**	**1,9%**	**0,20**	**0,16**	**0,62**	**0,06**	**0,01**	**0,41**	**0,08**
16	Mauerwerk	0,3m	**n.b.**	**n.b.**	**0,03**	**0,01**	**0,06**	**0,00**	**0,00**	**0,18**	**0,02**
	Sanierdeckputz	0,7m	**0,9%**	**3,2%**	**0,20**	**0,24**	**1,83**	**0,68**	**0,10**	**0,32**	**0,08**
	Sanierunterputz	0,7m	**1,4%**	**5,2%**	**0,21**	**0,23**	**1,77**	**0,68**	**0,11**	**0,33**	**0,08**
16	Mauerwerk	0,7m	**n.b.**	**n.b.**	**0,14**	**0,01**	**0,46**	**0,16**	**0,12**	**0,19**	**0,05**

Tabelle 6: Festmörteleigenschaften

MF	Putzlage	Höhe	Poren-volumen Vol%	Roh-dichte kg/dm³	max. Wasser-aufnahme	W_{24h}	Wasser-eindring-tiefe[mm]	R_D N/mm²
	Sanierdeckputz	0,3m	**43,1%**	**1,6**	**26,7%**	**0,9**	**1**	**2,7**
7	Sanierdeckputz	0,7m	**42,1%**	**1,6**	**26,4%**	**1,6**	**4**	**2,5**
	Sanierunterputz	0,3m	**43,2%**	**1,6**	**27,8%**	**1,7**	**3**	**2,9**
7	Sanierunterputz	0,7m	**43,7%**	**1,6**	**27,4%**	**2,8**	**durchnäßt**	**3,4**
	Sanierdeckputz	0,3m	**47,4%**	**1,4**	**33,0%**	**4,5**	**durchnäßt**	**6,2**
16	Sanierdeckputz	0,7m	**46,4%**	**1,4**	**31,1%**	**1,2**	**3**	**7,0**
	Sanierunterputz	0,3m	**45,2%**	**1,4**	**30,1%**	**4,9**	**durchnäßt**	**2,8**
16	Sanierunterputz	0,7m	**49,3%**	**1,4**	**34,2%**	**2,0**	**2**	**2,2**

Tabelle 7: Feuchtebilanz der Musterflächen 5 und 6

MF	Putzlage	Höhe	DFG [%]	DFG-hygr. 94%r.F. [%]
	Sanierdeckputz	0,3m	**6,4%**	**6,8%**
	Sanierunterputz	0,3m	**11,1%**	**6,6%**
5	Mauerwerk	0,3m	**50,4%**	**n.b.**
	Sanierdeckputz	0,7m	**6,1%**	**7,8%**
	Sanierunterputz	0,7m	**7,9%**	**5,3%**
5	Mauerwerk	0,7m	**22,5%**	**n.b.**
	Sanierdeckputz	0,3m	**14,7%**	**13,3%**
	Sanierunterputz	0,3m	**14,9%**	**7,2%**
6	Mauerwerk	0,3m	**21,1%**	**n.b**
	Sanierdeckputz	0,7m	**10,1%**	**14,0%**
	Sanierunterputz	0,7m	**9,8%**	**11,6%**
6	Mauerwerk	0,7m	**13,7%**	**n.b.**

Tabelle 8: Salzbilanzen der Musterflächen 5 und 6

MF	Putzlage	Höhe	hygroskopische Feuchteaufnahme		Mass%						
			54%r.F.	98%r.F.	Chlorid	SO3	Nitrat	CaO	MgO	K2O	Na2O
	Sanierdeckputz	0,3m	**0,5%**	**2,2%**	**0,10**	**0,15**	**0,33**	**0,37**	**0,03**	**0,03**	**0,13**
	Sanierunterputz	0,3m	**0,5%**	**2,0%**	**0,13**	**0,23**	**0,34**	**0,34**	**0,05**	**0,06**	**0,10**
5	Mauerwerk	0,3m	**n.b.**	**n.b.**	**0,09**	**0,07**	**0,27**	**0,05**	**0,05**	**0,22**	**0,06**
	Sanierdeckputz	0,7m	**0,6%**	**2,6%**	**0,08**	**0,15**	**0,16**	**0,24**	**n.b**	**0,09**	**0,09**
	Sanierunterputz	0,7m	**0,4%**	**1,7%**	**0,17**	**0,26**	**0,28**	**0,25**	**0,06**	**0,18**	**0,08**
5	Mauerwerk	0,7m	**n.b.**	**n.b.**	**0,06**	**0,04**	**0,14**	**0,05**	**0,03**	**0,14**	**0,04**
	Sanierdeckputz	0,3m	**1,0%**	**3,8%**	**0,29**	**0,43**	**1,43**	**0,39**	**0,16**	**0,38**	**0,11**
	Sanierunterputz	0,3m	**0,8%**	**2,5%**	**0,29**	**0,56**	**1,12**	**0,40**	**0,13**	**0,38**	**0,10**
6	Mauerwerk	0,3m	**n.b.**	**n.b.**	**0,07**	**0,03**	**0,13**	**0,02**	**0,02**	**0,16**	**0,04**
	Sanierdeckputz	0,7m	**1,1%**	**4,3%**	**0,31**	**0,39**	**1,46**	**0,49**	**0,17**	**0,31**	**0,07**
	Sanierunterputz	0,7m	**0,8%**	**3,8%**	**0,25**	**0,44**	**1,27**	**0,44**	**0,18**	**0,27**	**0,06**
6	Mauerwerk	0,7m	**n.b.**	**n.b.**	**0,11**	**0,08**	**0,27**	**0,12**	**0,09**	**0,10**	**0,03**

Tabelle 9: Festmörteleigenschaften

MF	Putzlage	Höhe	Poren-volumen Vol%	Roh-dichte kg/dm³	max. Wasser-aufnahme	W_{24h}	R_D N/mm²
	Sanierdeckputz	0,3m	**47,1%**	**1,5**	**32,1%**	**0,5**	**2,6**
5	Sanierdeckputz	0,7m	**47,8%**	**1,5**	**33,8%**	**0,6**	**3,3**
	Sanierunterputz	0,3m	**45,9%**	**1,5**	**30,6%**	**1,3**	**2,9**
5	Sanierunterputz	0,7m	**46,6%**	**1,5**	**31,3%**	**0,6**	**4,2**
	Sanierdeckputz	0,3m	**45,1%**	**1,4**	**28,8%**	**1,2**	**2,9**
6	Sanierdeckputz	0,7m	**41,2%**	**1,4**	**31,0%**	**0,9**	**2,6**
	Sanierunterputz	0,3m	**49,8%**	**1,4**	**34,2%**	**3,8**	**3,9**
6	Sanierunterputz	0,7m	**55,3%**	**1,4**	**32,4%**	**1,2**	**3,3**

Tabelle 10: Feuchtebilanz der Musterflächen 10, 11 und 13

MF	Putzlage	Höhe	DFG [%]	DFG-hygr. 94%r.F. [%]
	Deckputz	0,3m	**18,2%**	**10,0%**
	Unterputz	0,3m	**35,2%**	**10,0%**
10	Mauerwerk	0,3m	**54,9%**	**n.b.**
	Deckputz	0,7m	**14,0%**	**12,1%**
	Unterputz	0,7m	**24,1%**	**13,0%**
10	Mauerwerk	0,7m	**41,5%**	**n.b.**
	Deckputz	0,3m	**9,7%**	**4,7%**
	Unterputz	0,3m	**17,8%**	**6,2%**
11	Mauerwerk	0,3m	**96,0%**	**n.b.**
	Deckputz	0,7m	**6,9%**	**3,9%**
	Unterputz	0,7m	**13,9%**	**5,2%**
11	Mauerwerk	0,7m	**60,2%**	**n.b.**
	Deckputz	0,3m	**62,1%**	**27,1%**
	Unterputz	0,3m	**n.b.**	**n.b.**
13	Mauerwerk	0,3m	**81,2%**	**n.b.**
	Deckputz	0,7m	**24,1%**	**40,6%**
	Unterputz	0,7m	**n.b.**	**n.b.**
13	Mauerwerk	0,7m	**37,3%**	**n.b.**

Tabelle 11: Salzbilanzen der Musterflächen 10, 11 und 13

MF	Putzlage	Höhe	hygroskopische Feuchteaufnahme		Mass%						
			54%r.F.	98%r.F.	Chlorid	SO3	Nitrat	CaO	MgO	K2O	Na2O
	Deckputz	0,3m	**1,9%**	**6,7%**	**0,68**	**0,35**	**1,86**	**0,62**	**n.b.**	**0,94**	**0,46**
	Unterputz	0,3m	**1,8%**	**5,5%**	**0,85**	**0,15**	**1,64**	**0,59**	**n.b.**	**0,87**	**0,38**
10	Mauerwerk	0,3m	**n.b.**	**n.b.**	**0,03**	**0,01**	**0,06**	**0,01**	**0,01**	**0,16**	**0,03**
	Deckputz	0,7m	**2,1%**	**8,1%**	**0,74**	**0,52**	**2,60**	**1,04**	**0,08**	**1,29**	**0,27**
	Unterputz	0,7m	**2,8%**	**8,8%**	**0,95**	**0,99**	**2,05**	**1,30**	**0,10**	**1,00**	**0,30**
10	Mauerwerk	0,7m	**n.b.**	**n.b.**	**0,25**	**0,10**	**0,29**	**0,09**	**0,04**	**0,36**	**0,09**
	Deckputz	0,3m	**0,8%**	**2,3%**	**0,02**	**0,51**	**0,87**	**n.b.**	**n.b.**	**0,06**	**0,71**
	Unterputz	0,3m	**1,4%**	**3,5%**	**0,09**	**0,01**	**1,27**	**0,78**	**n.b.**	**0,07**	**0,12**
11	Mauerwerk	0,3m	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	**0,01**	**0,04**	**n.b.**	**0,01**	**0,13**	**0,04**
	Deckputz	0,7m	**0,7%**	**1,9%**	**0,05**	**0,65**	**1,09**	**0,20**	**n.b.**	**0,07**	**0,59**
	Unterputz	0,7m	**1,2%**	**2,7%**	**0,16**	**0,02**	**1,30**	**0,53**	**n.b.**	**0,06**	**0,24**
11	Mauerwerk	0,7m	**n.b.**	**n.b.**	**0,01**	**0,01**	**0,08**	**n.b.**	**n.b.**	**0,07**	**0,05**
	Deckputz	0,3m	**0,8%**	**3,8%**	**0,47**	**0,02**	**1,67**	**1,21**	**n.b.**	**0,61**	**0,13**
	Unterputz	0,3m	**n.b.**	**n.b.**	**0,57**	**0,02**	**1,52**	**1,32**	**n.b.**	**0,29**	**0,06**
13	Mauerwerk	0,3m	**n.b.**	**n.b.**	**0,01**	**0,01**	**0,05**	**n.b.**	**n.b.**	**0,22**	**0,03**
	Deckputz	0,7m	**2,1%**	**6,9%**	**0,56**	**0,03**	**1,95**	**0,61**	**0,19**	**0,44**	**0,18**
	Unterputz	0,7m	**n.b.**	**n.b.**	**0,60**	**0,03**	**1,83**	**0,56**	**0,18**	**0,43**	**0,18**
13	Mauerwerk	0,7m	**n.b.**	**n.b.**	**0,17**	**0,10**	**0,30**	**0,13**	**0,10**	**0,18**	**0,06**

Tabelle 12: Festmörteleigenschaften

MF	Putzlage	Höhe	Poren-volumen Vol%	Roh-dichte kg/dm³	max. Wasser-aufnahme	W_{24h}	Wasser-eindring-tiefe[mm]	R_D N/mm²
	Deckputz	0,3m	**61,7%**	**0,9**	**66,5%**	**3,8**	**durchnäßt**	**5,6**
10	Deckputz	0,7m	**62,9%**	**0,9**	**66,7%**	**4,4**	**durchnäßt**	**5,4**
	Unterputz	0,3m	**55,3%**	**0,9**	**55,5%**	**5,1**	**10**	**6,8**
10	Unterputz	0,7m	**61,2%**	**0,9**	**67,8%**	**3,6**	**durchnäßt**	**5,7**
	Deckputz	0,3m	**57,7%**	**1,2**	**48,7%**	**0,9**	**1**	**10,2**
11	Deckputz	0,7m	**57,2%**	**1,2**	**48,1%**	**0,7**	**1**	**10,8**
	Unterputz	0,3m	**60,3%**	**1,1**	**56,8%**	**1,6**	**2**	**6,6**
11	Unterputz	0,7m	**58,5%**	**1,1**	**52,8%**	**2,1**	**4**	**9,5**
	Deckputz	0,3m	**27,3%**	**1,9**	**14,1%**	**3,5**	**durchnäßt**	**n.b.**
13	Deckputz	0,7m	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**
	Unterputz	0,3m	**33,0%**	**1,9**	**16,9%**	**2,2**	**durchnäßt**	**n.b.**
13	Unterputz	0,7m	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**	**n.b.**

Petra Egloffstein

Verschiedene Putzsysteme für das salzbelastete Mauerwerk der evangelischen Kirche in Wommen

1 Objekt: Evangelische Kirche Wommen

Die evangelische Kirche in Wommen, Gemeinde Herleshausen, Werra-Meissner-Kreis wurde 1739-1744 erbaut. Sie besteht aus einem großen Saalbau mit Mansardendach. Der Westturm ist mit einem achteckigen Fachwerkaufsatz und Laternenhaus versehen (DEHIO, 1982). Die Kirche ist vollständig verputzt, lediglich die Sandsteingewände sind steinsichtig. Das Bauwerk zeigt an seinen steinsichtigen Gewänden extreme Schadensformen. In Abbildung 1 ist ein geschädigte Fensterleibung dargestellt.

Aufgrund der starken Salzschädigung des Außenputzes wurde in den 80`er Jahren ein Sanierputzsystem im Außen- und Innenbereich aufgebracht. Weitere begleitende Maßnahmen, wie z. B. eine Horizontalabdichtung wurden nicht durchgeführt. Das ganze System ist zementgebunden, besteht aus einem zweilagigen Unterputz und einem 5 mm dicken einlagigen Oberputz und besitzt dadurch einen sehr dichten, kapillar-undurchlässigen Gefügeaufbau. Der sog. Sanierputz ist daher eher als ein Sperrputz anzusehen. Er zeigt ebenfalls nur einen geringen Entsalzungseffekt, da nur eine minimale Salzeinwanderung (siehe Tabelle 1), verglichen mit der hohen Salzbelastung des Gebäudes, im Unter- (0,65 MA.-% Sulfationen) und Oberputz (0,29 MA.-% Sulfationen) stattfindet.

Abb.1: Durch Salze geschädigtes Sandsteingewände an der evangelischen Kirche in Wommen

Durch die abdichtende Putzaußenhaut werden die Salzlösungen bevorzugt in die kapillar aktiven Natursteine abgedrängt, wo sie dann auskristallisieren. Unter einer dünnen, härteren Sandsteinschale befinden sich Salzanreicherungen, die das Gefüge des Steines bis zu einer Tiefe von mehreren Zentimetern zersetzen (Abbildung 1). Diese Zerstörung der Sandsteingewände kann an der ganzen Kirche beobachtet werden. Der Außenputz zeigt oberhalb der Ausblühzone im Sockelbereich keine gravierenden Schäden. Auch der Innenputz ist in einem intakten Zustand.

2 Untersuchungen am Bauwerk

Um die Art der Salze und deren Gehalte zu bestimmen wurden Salzausblühungen im Sockelbereich, reine Salzlinsen im Gestein und ausblühende Salze im Turmbereich entnommen und röntgenographisch untersucht. Ferner wurden eine Gesteinsprobe im Innenbereich des Mauerwerks und der dazugehörige Mörtel auf ihre Salzbelastung überprüft. Weiterhin wurde eine Probe des 1980 aufgebrachten Sanierputzes im Kircheninneren entnommen, um dessen Speicherkapazität auf Salze zu überprüfen. Die Beschreibung der Proben und ihre Salzphasen bzw. Salzgehalte sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Beschreibung der entnommenen Proben und Ergebnisse der Untersuchungen

Beschreibung	**Salze bzw. Ionengehalte (MA.%)**
Salzlinse, 2 cm Durchmesser, durchsichtig-weißlich	Epsomit, Gips
Salzausblühungen im Innenbereich des Turms	Epsomit, Hexahydrit, Gips
Salzausblühungen im Sockelbereich	Hexahydrit, Gips
Mauerstein, Kalkmergel	0,03 (*Sulfat*), geringe Salzgehalte
Mauermörtel (Kalkmörtel)	1,92 (*Sulfat*), 0,14 (*Nitrat*), 0,01 (*Calcium*), 0,09 (*Magnesium*)
Unterputz des Sanierputzes	0,65 (*Sulfat*), 0,01 (*Nitrat*), 0,07 (*Calcium*), 0,02 (*Natrium*)
Oberputz des Sanierputzes	0,29 (*Sulfat*), 0,03 (*Calcium*)

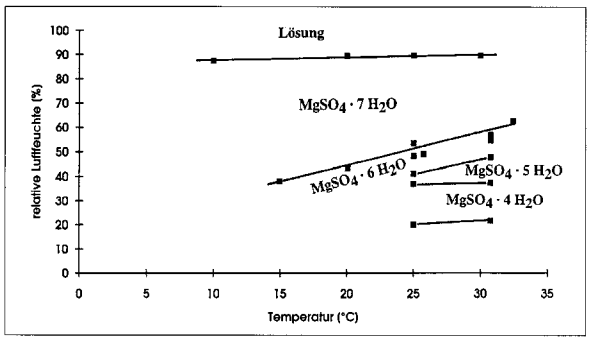


Abb. 2: Stabilitätsbereiche der verschiedenen Modifikationen von Magnesiumsulfat (aus AURAS et al., 1997)

Bei den Salzen handelt es sich in der Hauptsache um die Magnesiumsalze Epsomit ($MgSO_4 \cdot 7\ H_2O$) und Hexahydrit ($MgSO_4 \cdot 6\ H_2O$). Diese Salzbelastungen sind durch Mauersteine eingebracht worden, da es sich hierbei um Abraumprodukte aus dem Kali-Bergbau handelt. Die Magnesiumsulfate entstehen bei der Lagerstättenbildung im letzten Eindampfungsabschnitt. Magnesiumsulfate sind sehr leicht löslich und können, je nach Luftfeuchtigkeit in unterschiedlichen Hydratationsstufen auftreten. Die Gleichgewichtsfeuchten dieser Salze, d.h. der Übergang von gelöster Phase in den kristallinen Zustand, liegt bei ca. 85 %relative Luftfeuchte. Die Stabilitätsbereiche der verschiedenen Modifikationen von Magnesiumsulfat sind in Abbildung 2 dargestellt.

Neben den Magnesiumsulfaten ist Gips ($CaSO_4 \cdot 2\ H_2O$) nachweisbar, der sich durch zementhaltige Materialien oder dem SO_2 der Luft mit den Calciumionen des Fugenmörtels bzw. des Putzes gebildet haben könnte. Der innen liegende Fugenmörtel ist mit 1,92 MA.% Sulfationen sehr stark belastet. Dagegen konnten in den vorherrschend kalkmergelhaltigen Mauersteinen nur geringe Salzgehalte (0,03 MA.% Sulfationen) nachgewiesen werden. Die Magnesiumsulfatsalze stammen ausschließlich aus den Salzlinsen, die durch die bestehende Luftfeuchtigkeit in Lösung gehen und in den Mörtel einwandern. Die Steine sind nur unmittelbar im Bereich der Salzlinsen gefährdet, sie nehmen aufgrund ihres dichten Gefüges keine löslichen Salze auf. Nach der Öffnung eines Mauerquerschnitts zeigte es sich, dass die Salzlinsen über die ganze Mauerwerkstiefe mehr oder minder gleichmäßig verteilt sind.

3 Putzmusterflächen

Um die Schäden an den Gewänden zu verhindern, ist ein kapillar-aktives bzw. ein wasserdampfdiffusionsoffenes Putzsystem deutlich besser geeignet. Aus diesen Gründen wurden neue Putzsysteme aufgebracht, um die Feuchtigkeit über kapillaren Transport bzw. Wasserdampfdiffusion abzugeben. Die Systeme sollten ebenfalls eine gewisse Menge an Salzen aufnehmen, ohne in ihrem Gefüge kurzzeitige Schädigungen aufzuzeigen. Weiterhin sollen in den ersten Jahren keine ästhetisch störenden Ausblühungen von Schadsalzen an der Oberfläche zu erkennen sein.

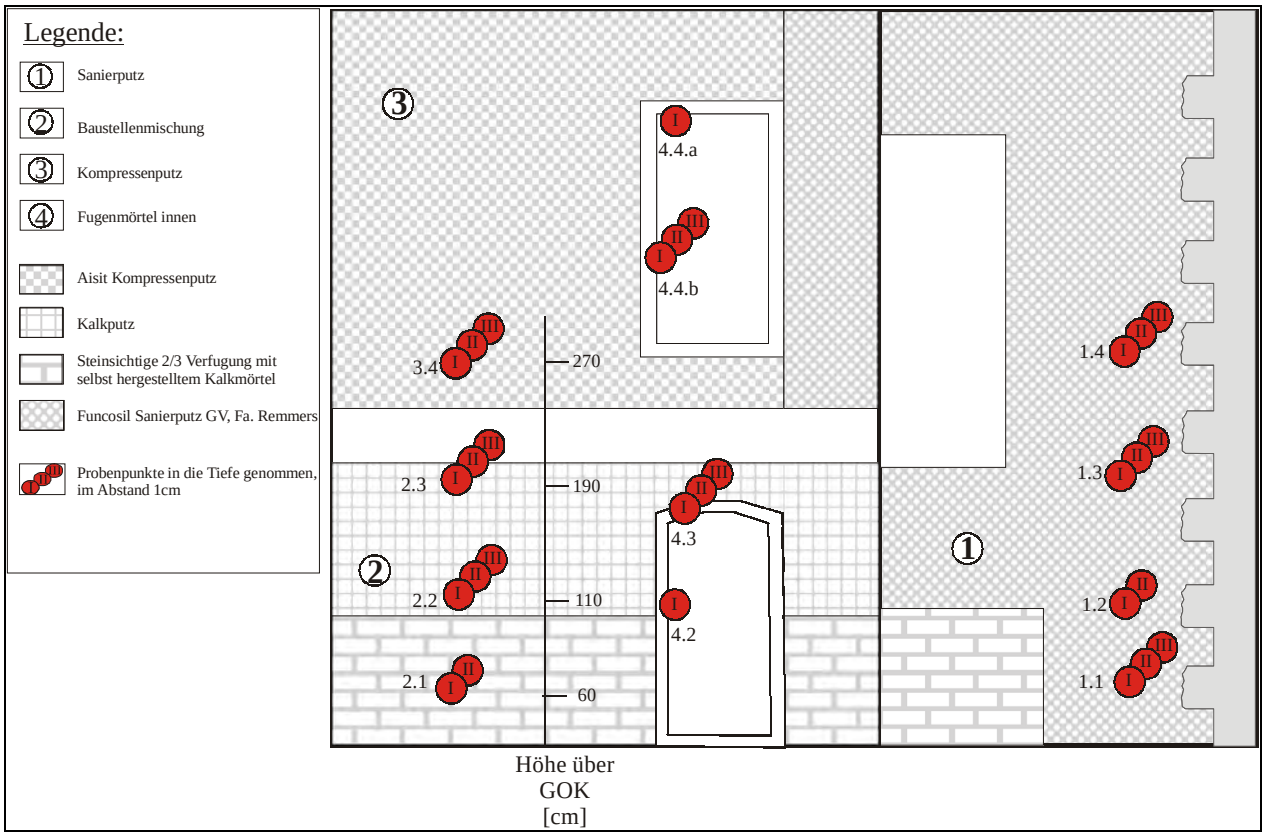


Abb.3: Lage der Musterflächen und Punkte der Probenentnahme

Im Jahr 1998 wurden Musterflächen von verschiedenen Putzsystemen an der Westseite des Turms und Kirchenschiffes der Kirche angelegt.

Als Systeme kamen folgende Putze zum Einsatz:

- 1 **Funcosil Sanierputz** CV, Fa. Remmers, nach WTA 2-2-91 (Spritzbewurf, Grundputz-WTA, Sanierdeckputz-WTA)
- 2 **Kalkputz**, Baustellenmischung
  2 RT Sumpfkalk : 1 RT natürlich hydr. Kalk (Fa. Billerbecker) : 9 RT gewaschener Flusssand (Korngröße 0 – 4 mm), (2-lagiger Putzaufbau)
- 3 **Aisit Kompressenputz**, Fa. Remmers (2-lagiger Putzaufbau)
- 4 Verfugung in Innenbereich mit **Kalkmörtel**

Das Anlegen der Musterflächen wurde vom Institut für Konservierung und Restaurierung, Fachbüro für Denkmalpflege, Fulda durchgeführt.

Des weiteren sollen die Putze zum einen für eine Austrocknung des nach unten feuchter werdenden Mauerwerks sorgen, zum anderen sollte eine gewisse Salzreduzierung des Mauerwerks erreicht werden.

Der Aisit Kompressenputz wurde aus Vergleichsgründen gegenüber dem Sanierputz angelegt, um über die verminderte Hydrophobie eine vermehrte Entsalzungswirkung zu erzielen. Ob dieser Putz als Entsalzungsputz vor einer Gesamtverputzung geschaltet werden soll, ist von seiner Entsalzungswirkung abhängig. Für einen Einsatz als finalen Aussenputz, ist der Kompressenputz, da er nur über einen gewissen Zeitraum aufgebracht wird, nicht geeignet.

Am Anfang des Jahres 2002 wurden an den Musterflächen im Höhen- und Tiefenprofil Proben entnommen und auf ihre Feuchtegehalte, pH-Werte, Leitfähigkeiten und Ionengehalte untersucht. Ferner wurden an dem Kalkputz und dem Sanierputz die Druckfestigkeit und Carbonatisierungstiefe gemessen. In Abbildung 3 ist die Lage der Musterputzflächen mit den Probepunkten dargestellt.

Die entnommenen Proben wurden sofort nach ihrer Entnahme auf ihre Feuchtegehalte untersucht. Die Feuchtegehalte bezogen auf ihr Porenvolumen sind in Tabelle 2 dargestellt. Nach Angaben der Hersteller wurde bei dem Sanierputz ein Porenvolumen von 50 Vol.%, beim Kompressenputz eines von 60 Vol. % und beim Kalkputz ein Porenvolumen von 25 Vol.% angenommen.

Der Sanierputz zeigt einen erhöhten Feuchtegehalt gegenüber dem Kalkputz, während der Kompressenputz, da er in relativ großer Höhe entnommen wurde, im mittleren Bereich liegt. Hohe Feuchtewerte an Sanierputzsystemen konnte auch in SCHUBERT et al. (1999) nachgewiesen werden. Die Proben aus dem Sockelbereich zeigen bei beiden Putzsystemen erwartungsgemäß einen deutlich erhöhten Wassergehalt, da aufsteigende Feuchtigkeit an der gesamten Kirche vorhanden ist.

Tab. 2: Feuchtegehalte

Index	Feuchtegehalt bezogen auf das Porenvolumen [%]
1.1.	24,2
1.2.	8,0
1.3.	15,2
1.4.	12,8
2.1	22,5
2.2	4,8
2.3	6,8
3.4	7,5

Insgesamt ist durch die Hygroskopie der Salze der Feuchtegehalt des Mauerwerks stark erhöht. Die höheren Feuchtewerte des Sanierputzes zeigen den verminderten kapillaren Transport des hydrophoben Systems an. Die Feuchtigkeit im Mauerwerk kann nicht allein durch diffusiven Wasserdampf-Transport abgeführt werden. Bei dem Kompressen- und Kalkputz ist durch die verminderte Hydrophobie bzw. den rein kapillaren Transport die Wasserabgabe deutlich besser.

In Tabelle 3 sind die Messwerte der Leitfähigkeit und des pH-Werts in Abhängigkeit von der Höhe und Tiefe tabellarisch dargestellt.

Aufgrund der großen Anzahl der Proben wurden anhand der Leitfähigkeiten (χ) mit Hilfe der Formel: 1,2471 * $\chi^{1,2077E-4}$ [µS/cm] die Salzgehalte [MA.%] errechnet. Auffällig sind die hohen Leitfähigkeiten der Proben bei ca. 3 cm Tiefe. Dies lässt sich über die fehlende Carbonatisierung und den somit erhöhten Gehalte an Calcium und Hydroxidionen erklären. Die Leitfähigkeitswerte größer 1000 µS/cm sind aufgrund der erhöhten Calciumwerte nicht verwertbar. Messungen mit Phenolphtalein zeigen eine Carbonatisierungstiefe von 26 bzw. 23 mm beim Kalkputz und Sanierputz an.

Auch die Druckfestigkeiten von ca. 5,8 MPa des Kalkputzes bzw. 6,1 MPa des Sanierputzes liegen in der gleichen Größenordnung und können in die Putzmörtelgruppe P II eingeordnet werden. Die Festigkeiten wurden an nicht vollständig zylindrischen Formen im Teilflächenverfahren gemessen.

Da über die Leitfähigkeit die Salzgehalte nur annähernd und summarisch errechnet werden konnten, sind zur genaueren Quantifizierung, die Anteile an wasserlöslichen Ionen nach DIN 38414, Teil 4 (10-1984) bestimmt worden. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Kationen- und Anionengehalte dargestellt.

Sanier- und Kompressenputz

Der Sanier- und Kompressenputz zeigt hohe Sulfatanteile, das Maximum beider Proben liegt zwischen 1-2 cm Tiefe, d.h. meist im Unterputz oder an der Grenze Porengrundputz-Sanierputz. Ob diese Sulfatgehalte allein durch die Magnesiumsulfat-Versalzung des Mauerwerks oder durch das zementhaltige Bindemittel entstanden sind, kann nicht vollständig geklärt werden. Auffällig sind

Tab. 3: Leitfähigkeit, berechnete Salzgehalte, Entnahmetiefe und pH-Wert

Index	Leitfähigkeit χ (µS/cm)	Salzgehalt (MA.%)	Entnahme-tiefe (cm)	pH-Wert	Index	Leitfähigkeit χ (µS/cm)	Salzgehalt (MA.%)	Entnahme-tiefe (cm)	PH-Wert
1.1.I	699,3	0,34	0 - 1	7,7	2.2.I	145,2	0,05	0 – 1	9,3
1.1.II	1091,4	0,58	1 - 2	9,2	2.2.II	220,0	0,08	1 –2	10,0
1.1.III	6784,2		2 – 3	12,4	2.2.III	5592,8		2 – 3	12,4
1.2.I	800,9	0,40	0 – 1	7,8	2.3.I	173,5	0,06	0 – 1	9,8
1.2.II	1301,5	0,72	1 – 2	7,7	2.3.II	2139,8	1,31	1 – 2	12,0
1.3.I	852,5	0,43	0 – 1	7,8	2.3.III	7152,1		2 - 3	12,6
1.3.II	1129,0	0,60	1 – 2	7,8					
1.3.III	4727,4		2 - 3	12,2	4.2.I	615,0	0,30	0 - 1	7,7
1.4.I	705,8	0,34	0 – 1	7,5	4.3.I	611,2	0,31	0 – 1	8,2
1.4.II	1053,3	0,56	1 – 2	7,6	4.3.II	684,5	0,33	1 – 2	7,8
1.4.III	6089,7		2 – 3	12,4	4.3.III	604,7	0,29	2 – 3	7,8
					4.4.a.I	290,1	0,12	0 – 1	9,3
3.4.I	656,4	0,31	0 – 1	8,3	4.4.b.I	1021,7	0,54	0 – 1	8,6
3.4.II	894,0	0,46	1 – 2	8,2	4.4.b.II	3661,1		1 – 4	12,1
31.4.III	3255,1		2 - 3	12,2	4.4.b.III	5514,6		4 - 5	12,3

Tab. 4: Wasserlösliche Ionen der untersuchten Proben

Probe / Ionen MA.%	SO_4^{--}	NO_3^-	Cl^-	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	pH-Wert	Leitfähigkeit χ (µS/cm)	Summe
1.3.I	0,27	0,01	<0,01	0,08	0,01	0,03	0,01	7,8	707	0,41
1.3.II	0,36	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	0,15	0,01	7,8	939	0,57
1.3.III	0,10	0,02	0,01	0,23	n.n.	0,18	0,02	12,2	4220	0,56
2.3.I	0,04	<0,01	<0,01	0,03	<0,01	< 0,01	<0,01	9,8	171	0,08
2.3.II	0,05	n.n.	<0,01	0,20	n.n.	<0,01	<0,01	12,0	1870	0,24
2.3.III	0,03	<0,01	n.n.	0,70	n.n.	<0,01	<0,01	12,6	6740	0,74
3.4.I	0,21	0,01	<0,01	0,04	<0,01	0,05	0,02	8,3	608	0,32
3.4.II	0,29	0,01	0,01	0,05	0,01	0,07	0,01	8,2	767	0,44
3.4.III	0,11	<0,01	0,01	0,17	n.n.	0,08	0,01	12,2	2230	0,38

n.n. = nicht nachweisbar.

die fehlenden Magnesiumgehalte in den Putzsystemen. Vergleichende Untersuchungen von THIERSCH & KRAUS (2001) an anderen Putzsystemen zeigen bei hohen pH-Werten ebenfalls geringe Einwanderungen von Magnesium- und Sulfationen. Durch die hohe Calciumhydroxidkonzentration, kann die Löslichkeit von Sulfaten herabgesetzt sein. Der Grund für das Fehlen des Magnesium ist die extrem geringe Löslichkeit des Magnesiumhydroxids, das im alkalischen Milieu alles Magnesium bindet.

Beide Putzsysteme zeigen deutlich erhöhte Natrium- und Kaliumwerte, die zum einen durch die zementhaltigen Bindemittel, zum anderen durch den Einsatz von Luftporenbildnern im Sanier- und Kompressenputzsystem erklärt werden können, da keine Belastung von Alkalien im Mauerwerk vorliegt. Hier findet die Anreicherung eher in hinteren Bereich, d. h. im Porengrundputz statt.

Kalkputzsystem

Im Vergleich zu den Sanier- und Kompressenputzsystemen sind die kalkhaltigen Verfugungen und Putze nur gering mit Sulfaten belasten. Sie zeigen ebenfalls keine Anreicherungen von Natrium und Kalium. Die mangelnde Einwanderung von Salzionen ist wie im bei den Sanierputzen durch die hohen pH-Werte zu erklären. Bei weiterer Carbonatisierung steigen die Anteile an Salzen, wie bei den Verfugungsmaterialien (Tabelle 3) zu erkennen ist. Die zeitabhängige Versalzung von Kalkputzen ist auch im Beitrag von SCHUH (in diesem Band) dargestellt. Vorteilhaft ist die hohe Kapillarität des Systems, das im

Vergleich zu den anderen Systemen sehr gut austrocknen kann. Damit ist jedoch die Gefahr von Salzausblühungen an der Oberfläche und ein Versagen des Anstrichsystemes in näherer Zukunft nicht völlig ausgeschlossen. Es muss auch mit einem erhöhten Pflegeaufwand im sehr feuchten Sockelbereich gerechnet werden.

4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen an verschiedenen Putzsystemen für das salzbelastete Mauerwerk der evangelischen Kirche in Wommen zeigen, dass der Sanierputz nach 3 Jahren Standzeit keine Vorteile gegenüber dem Kalkputz aufweist. Seine hohen wasserlöslichen Natrium- und Kaliumionengehalte sind nicht vollständig zu erklären und negativ zu bewerten. Auch die Einwanderung von Sulfat, bei dem hoch belasteten Mauerwerk, ist relativ gering. Die Abhängigkeit des pH-Wertes auf die Sulfationenwanderung ist deutlich ersichtlich.

Bei einer hohen Durchfeuchtung des Mauerwerkes durch aufsteigende sowie hygroskopische Feuchtigkeit ist die hohe Durchfeuchtung des Sanierputzes ebenfalls negativ zu einzuschätzen.

Die Untersuchungsergebnisse des Kalkputzes sind im Vergleich sehr positiv zu bewerten, obwohl der Kalkputz nur eine geringe Salzspeicherkapazität aufweist, was bei pH-Werten < 10 zu erwarten ist. Bei einer weiteren Alterung des Putzsystemes werden die pH-Werte sich erniedrigen und die Aufnahme an Salzen wird deutlich steigen. Vorteilhaft bei dem Kalksystem ist das gute Trocknungsverhalten. Durch seine hohe Kapillarität können die angrenzenden Sandsteingewände sicherlich dauerhafter erhalten werden. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass bei der Verwendung des Kalkputzsystems ein gewisser Pflegebedarf notwendig sein wird. Bei einer anschließenden Farbfassung sollte ebenfalls auf ein offenes System geachtet werden. Aufgrund der Festigkeit des hydraulischen Kalkmörtels ist eine Reinsilikatfarbe als kapillaroffenes System möglich und empfehlenswert.

Eine Kombination aus Porengrundputz und anschließenden Kalkoberputz wie von SCHUH (2002) für manche salzbelasteten Bauwerken vorgeschlagen, kann eine Alternative darstellen. Dabei ist jedoch ein vermindertes Trocknungsverhalten gegenüber einem reinen Kalkputzsystem vorhanden. Auch mit diesem System kann nach einigen Jahren ein Ausblühen der Schadsalze an der Oberfläche, nicht vollständig ausgeschlossen werden. Ob die Gefahr einer zusätzlichen Belastung an Alkalien gegeben ist, müsste zuvor geklärt und gegebenenfalls eliminiert werden.

5 Literatur

AURAS, M., SIEDEL, H. & WEBER, H. (1997): Reinigung und Steinkonservierung. In: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege. Ebner-Verlag, Ulm, S. 684 - 716.

DEHIO (1982): Handbuch der deutschen Kunstdenkmäler, Hessen, Deutscher Kunstverlag, München, Berlin

DIN 38414, TEIL 4 (10-1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4)

SCHUBERT, P., HERR, B., RANKERS, R. (1999): Untersuchungen zum Langzeitbewährung von Sanier- und Opferputzen. Frauenhofer IRB Verlag, Stuttgart, Forschungsbericht F 2375.

SCHUH, H. (2002): Putz- und Fugmörtel für salzbelastetes Mauerwerk, ein Praxisbericht. In diesem Band.

THIERSCH, K. & KRAUS, K (2001): DBU-Projekt „Modellhafte Untersuchung zur Auswirkung von Schadsalzen auf Mörtel sowie beispielhafter Einsatz von Hinterspritz- und Putzergänzungsmörteln am Abschlußbericht Kloster Heydau“. Kapitel 3.4: Untersuchungen zur Salzbelastung von G. Strübel und A. Qu, Bericht Nr.13, Institut für Steinkonservierung, Mainz, 25-35.

WTA MERKBLATT 2-2-91: Sanierputzsysteme, WTA-Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

Uwe Kalisch

Der Einfluss von Raumklimaschwankungen auf Ausstattungs- und Raumoberflächen

Die schädigenden Auswirkungen schwankender Luftfeuchte und direkter Befeuchtung auf salzbelastete Bauteile durch kapillar aufsteigende Feuchte und Kondensationsprozesse ist unstrittig und zunehmend im öffentlichen Bewusstsein. Hinzu kommt die natürliche Quelldehnung aller Holz- und Steinmaterialien sowie Farbschichten unter diesen Einflussfaktoren. Beide Faktoren können zu erheblichen Schadensphänomenen auch im Innenraum führen.

Häufig erfolgt die Bewertung dieser Schadensmechanismen allein auf der Grundlage von Außen- oder Raumklimazuständen der Lufttemperatur sowie der relativen Luftfeuchte. Wesentlich für die Beurteilung der Klimaeinflüsse auf Oberflächen sowie tieferliegende Materialbereiche sind die Bedingungen, die sich im Übergangsbereich der Luft zur Materialoberfläche einstellen. Nicht der absolute Feuchtegehalt der Luft, sondern die temperaturabhängige relative Luftfeuchte hat Einfluss auf das Kristallisationsverhalten und das Phasengleichgewicht wichtiger bauschädlicher Salze oder die Quelldehnungs- und Kapillarkondensationsprozesse in den Materialien (Abb. 3).

Da es sich bei der relativen Luftfeuchte um eine temperaturabhängige Größe handelt, wird die Größenordnung der relative Luftfeuchte an der Materialoberfläche in erheblichem Maß durch die Materialtemperatur sowie die Geschwindigkeit der Luftbewegung bestimmt. Darüber hinaus wirken als Einflussfaktoren material- und konstruktionsbedingte Sorptions- und Verdunstungsprozesse.

Abb. 1: Magdeburger Dom, Bischofsgang Übersichtsaufnahme

Abb. 2: Detailaufnahme der Sandsteinverwitterung im Innenraum

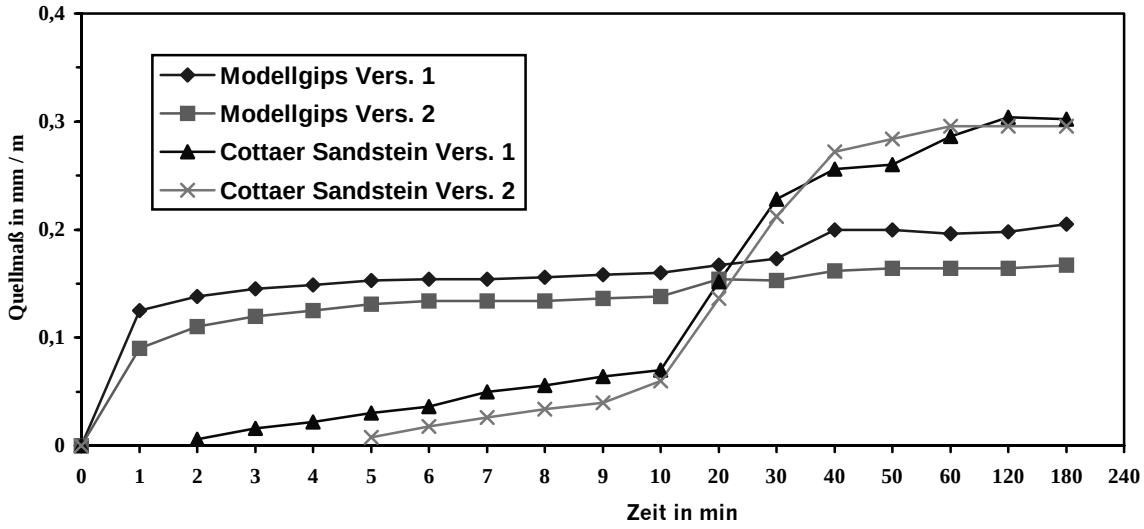


Abb. 3: Dynamik des Quellverhaltens von Sandstein und Gips nach direkter Befeuchtung

Für eine **Abschätzung** der klimatisch bedingten Belastungsfaktoren bewährt sich die Berechnung der relativen Luftfeuchte im Übergangsbereich der Luft zur Materialoberfläche aus der relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur der Umgebung sowie der Oberflächentemperatur des betrachteten Materials (Abb.4).

Eine klimatisch verursachte Differenz zwischen der rel. Luftfeuchte im Übergangsbereich der Luft zur Materialoberfläche sowie der rel. Luftfeuchte der Umgebung tritt grundsätzlich nur bei schnellen Veränderungen der Umgebungsbedingungen auf. Dies ist naturgemäß im Außenraum häufiger und stärker zu beobachten als unter Raumklimabedingungen.

In Innenräumen wird diese Differenz durch die Größenordnung des Luftaustauschs mit der Außenluft sowie durch die Raumbeheizung bestimmt.

Im Gegensatz zu kleinen Raumgrößen ist die Herstellung eines ausgeglichenen Raumklimas in den Kirchenräumen großer Dome weitaus schwieriger.

Zum Beispiel treten im Magdeburger Dom neben starken Schwankungen der relativen Raumluftfeuchte und der relativen Luftfeuchte im Übergangsbereich zu den Materialoberflächen auch erhebliche Kondensationsphänomene auf (Abb. 5 und Abb.6).

Bezogen auf das berechnete Raumvolumen muss bei einem Luftwechsel pro Stunde /1/ im Zeitraum 19.06.2000 bis 27.04.2001 von einer Gesamtkondensationsmenge von 38 m^3 Wasser ausgegangen werden. Unsicher ist bei dieser Berechnung der tatsächliche Luftwechsel, der im Fall des Magdeburger Domes eher niedrig angesetzt ist. Natürlich werden die Zeiten der Kondensation von Abtrocknungszeiten abgelöst. Dennoch lagerten sich in einem Zeitraum ununterbrochener Kondensationsbedingungen vom 08.03. bis 13.03.2001 Feuchtemengen von ca. 11 m^3 ab, was einer durchschnittlichen Wassersäule von 0,8 mm, bezogen auf die 13200 m^2 Innenraumoberfläche, entsprechen würde (Abb. 7).

Auch wenn die berechneten Werte mit der Unsicherheit der angenommenen Luftwechselrate behaftet sind, so ergeben sich dennoch ernst zu nehmende Hinweise auf die Größenordnung der Kondensationseinflüsse und den Stellenwert dieses Einflussfaktors.

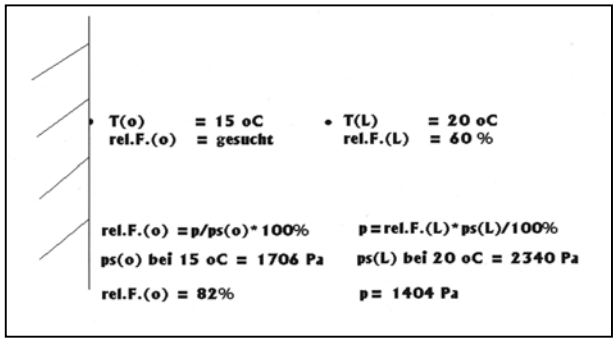


Abb. 4: Berechnungsbeispiel der relativen Luftfeuchte aus den Werten der rel. Luftfeuchte und -temperatur der Umgebung sowie der Temperatur einer Materialoberfläche.
Werte für Wasserdampfsättigungsdruck p_s DIN 4108 Teil 5

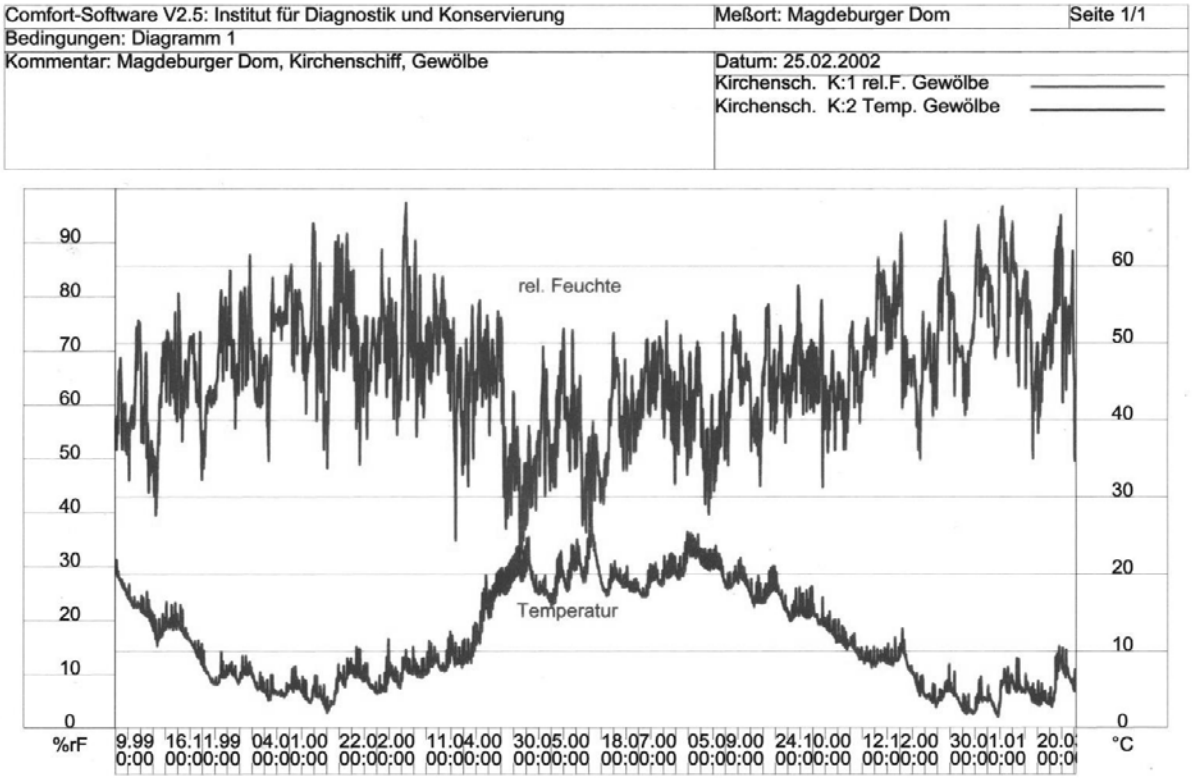


Abb. 5: Jahresverlauf der Raumklimawerte im Magdeburger Dom im Bereich des Gewölbes

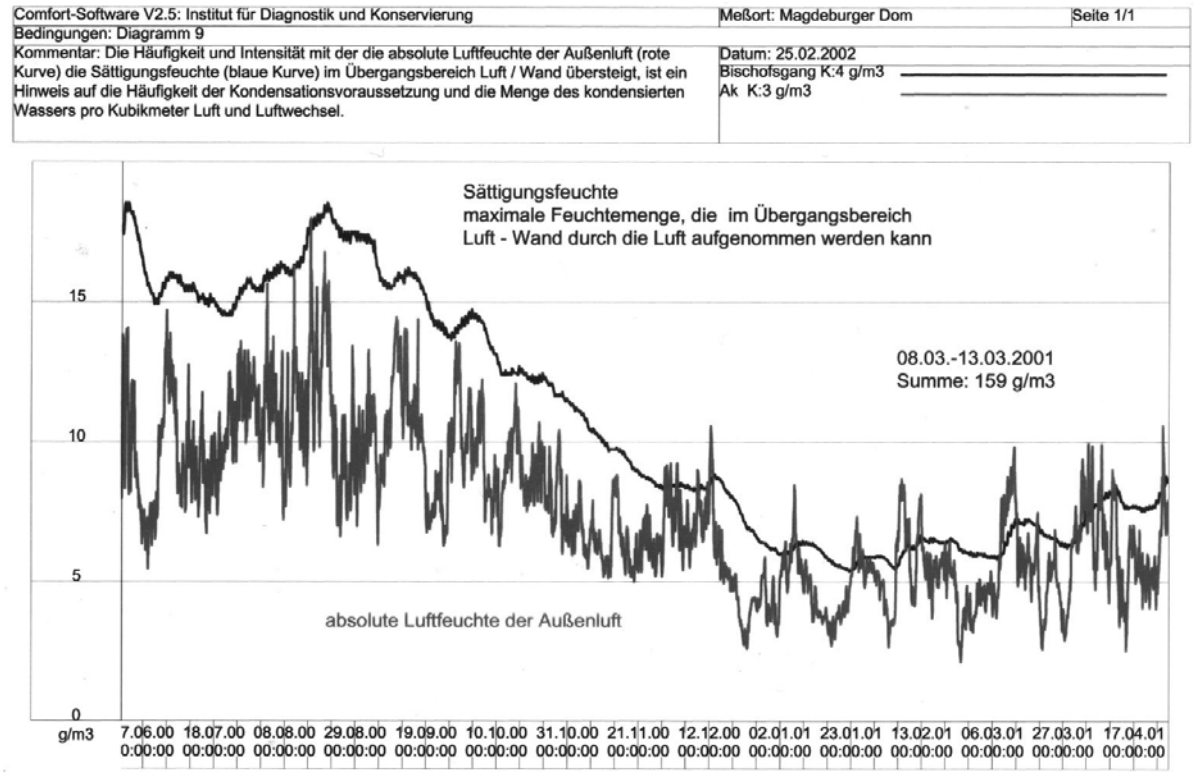


Abb. 6: Vergleich der Raumklimawerte aus dem Kirchenschiff, dem Bischofsgang sowie der Oberflächentemperatur des Pfeilers im Bischofsgang mit der berechneten Luftfeuchte im Übergangsbereich Luft / Materialoberfläche

Vor dem Hintergrund der Luftfeuchteschwankungen und Kondensationserscheinungen stellt sich natürlich sofort die Frage nach den Ursachen und notwendigen Veränderungen.

Ein erster Ansatz besteht in der verbesserten Abdichtung der Raumhülle. Am Beispiel des Magdeburger Doms bestehen eine Vielzahl vermeidbarer kleinerer und größerer Undichtheiten, die sich in der Summe auf mehrere Quadratmeter Öffnungsfläche summieren.

Dass das Bemühen, Raumundichtheiten auch in großen Kircheräumen zu verringern, möglich ist, zeigen trotz großer einfachverglaster Fensterflächen, die vergleichsweise ausgeglicheneren Raumklimabedingungen im Zeitzer Dom.

Kondensationsvoraussetzungen konnten hier an ausgewählten Bauteilen der Raumhülle bzw. der Ausstattung, ausgenommen an den Fenstern sowie in der Krypta, nicht nachgewiesen werden. Eine andere Problematik stellt in diesem Bauwerk die Beheizung des Kirchenraumes dar. Neben der vergleichmäßigenden Wirkung der Grundbeheizung führt vor allem die Zusatzbeheizung an ausgewählten Tagen in den Wintermonaten zu vermeidbaren Luftfeuchteschwankungen. Aber auch unter den Bedingungen der Beheizung ist eine kontrollierte Einschränkung der Luftwechselrate von positiver Wirkung. Durch die Reduzierung des Eintrages sehr trockener kalter Außenluft wird die zusätzliche Gefahr einer erheblichen Absenken der relativen Raumluftfeuchte reduziert.

Ein Vergleich der Raumklimawerte in den beheizungsfreien Sommermonaten belegt die positiven Ergebnisse der Bauwerksabdichtung am Zeitzer Dom im Vergleich zum Magdeburger Dom (Abb.8).

Mit den vorgestellten Phänomenen und Ergebnissen sollte ein Hinweis auf die Größenordnung und Intensität klimatischer Einflussfaktoren gegeben werden. Schwankungen der relativen Luftfeuchte sowie die direkte Oberflächenbefeuchtungen im Ergebnis von Kondensationsvorgängen sind ernst zu nehmende Triebkräfte für Transport- und Verwitterungsprozesse, die im Zusammenhang mit bauschädlichen Salzen stehen. Neben der Behandlung bauteilbezogener Salzreaktionen ist die Beobachtung, Bewertung und mögliche Beeinflussung des Raumklimas daher ein wichtiges Element der gesamten Bauwerkserhaltung und Pflege. Bei Raumklimaschwankungen ist es sinnvoll, eine Abschätzung der tatsächlichen Verhältnisse im Übergangsbereich der Raumluft zur Materialoberfläche durch Oberflächentemperaturmessungen vorzunehmen.

/1/ Arendt, C. (1993): Luftwechsel. In: Raumklima in grossen historischen Räumen. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH, Köln 1993. S. 18

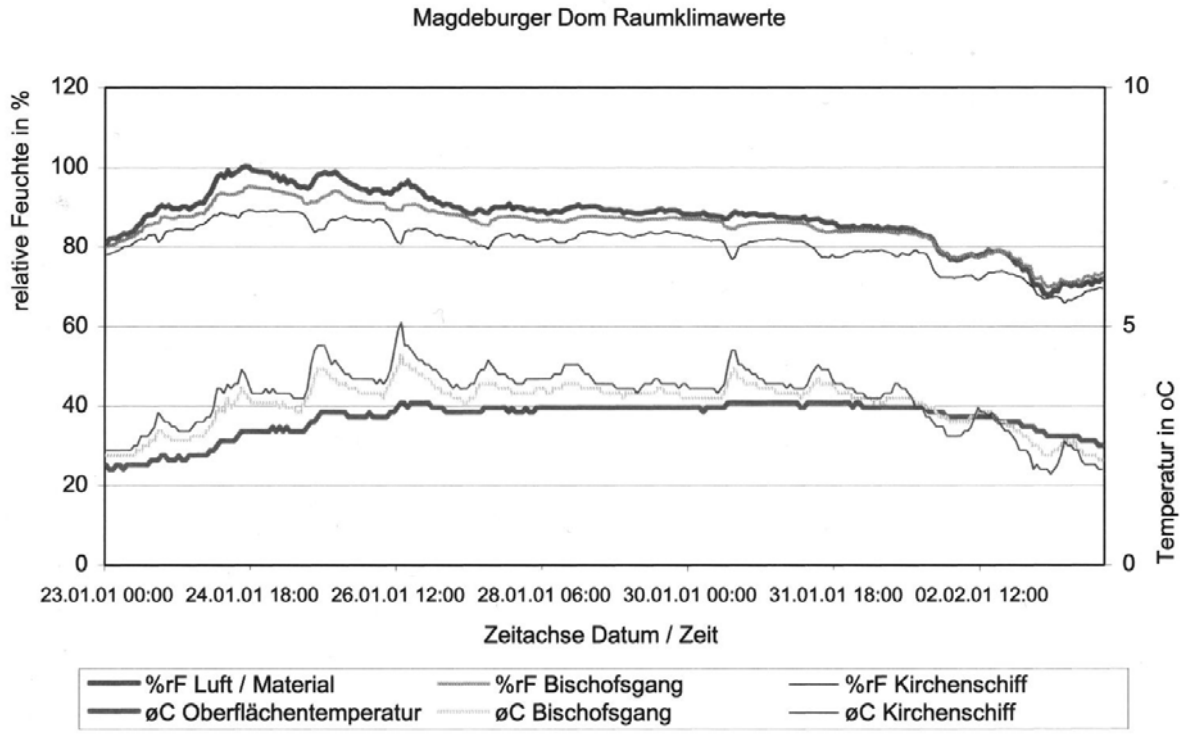


Abb. 7: Vergleich der absoluten Außenluftfeuchte mit der maximalen Feuchtemenge, die die Luft im Kontaktbereich zwischen Luft und Wandoberfläche in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur aufnehmen kann. Überschreitet die absolute Außenluftfeuchte die Sättigungsgrenze der Luft im Kontaktbereich, liegen Kondensationsbedingungen vor. Bezogen auf einen Kubikmeter Luft lässt sich aus dieser Differenz die ausfallende Kondensatmenge in Abhängigkeit von der Zeit abschätzen.

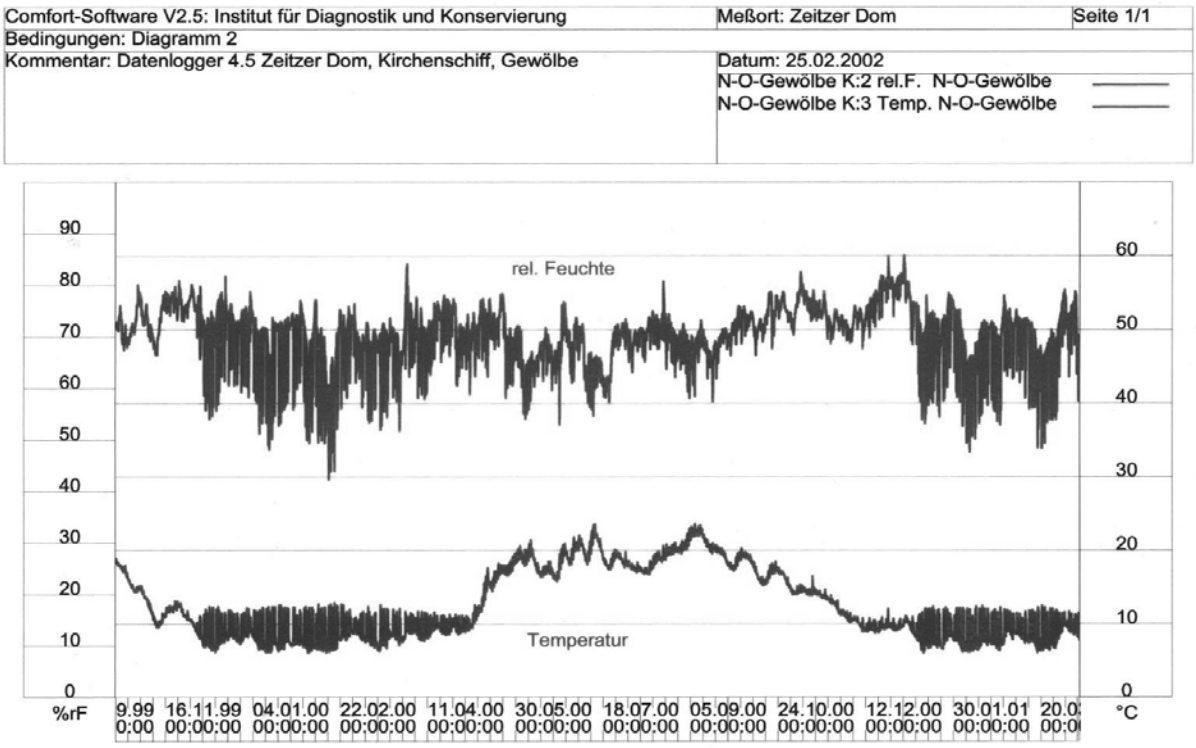


Abb. 8: Jahresverlauf der Raumklimawerte im Zeitzer Dom im Bereich des Gewölbes

Literaturliste zum Thema Salze im Natursteinmauerwerk (Auszug aus IFS-Bibliothek)

Stand April 2002

Arendt, C.
1993
Trockenlegungs- und Salzbekämpfungsmaßnahmen an Mauerwerk
Bautenschutz + Bausanierung, 16, 4/93, S. (53-57)

Arendt, C.; J. Seele
1996
Instandsetzungsberatung als Detektivarbeit
Bautenschutz + Bausanierung, 19., Heft Nr. 7/1996, S. 37-39

Arendt, C.; J. Seele
1996
Messgeräte für Voruntersuchungen im Altbaubereich, Teil 1 - Teil 3
Bautenschutz + Bausanierung, 19., Heft Nr. 2/1996, S. 8-10, Heft Nr. 3/1996, S. 21-27, Heft Nr. 4/1996, S. 11-17

Arendt, C.; J. Seele
1996
Möglichkeiten einer Salzbekämpfung
Bausanierung, 7., Heft 3/1996, S. 39-44

Arendt; C.; J. Seele
2000
Feuchte und Salze in Gebäuden
Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinfelden-Echterdingen

Arnold, A.
1981
Salzmineralien in Mauerwerken
Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt., 61, S. 147-166

Arnold, A.; K. Zehnder
1989
Salt Weathering on Monuments
La conservazione dei monumenti ne bacino del Mediterraneo, Int. Symposium, Bari, 7.-10.6.1989, 31-58

Arnold, A.; K. Zehnder; A. Küng; O. Emmenegger
1991
Wandmalereizerfall, Salze und Raumklima in der Klosterkirche von Müstair
Zeitschr. f. Kunsttechnologie + Konservierung, 5/1991, Heft 2, 171-200

Bläuer-Böhm, C.
1994
Salzuntersuchungen an Baudenkmälern
Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Jg. 8/1994, Heft 1, 86-103

Bliefert, T.; O. Domhardt; H. Venzmer
1997
Analysen zur Auswahl geeigneter Hydrophobierungsmittel für salzbelastete Sandsteine
Bautenschutz + Bausanierung, 20., 2/1997, S. 12-21

Böhme, D.; G. Wöelker
1994
Chemische Entfernung von Kalkschleiern und -krusten auf Wandmalereien - Grundsätzliche Überlegungen und orientierende Modellversuche
Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Jg. 8/1994, Heft 1, 78-85

Buchwald, Anja
2000
Ionentransportprozesse zur Verminderung von Schadsalzgehalten in porösen, feuchten Mauerwerksbaustoffen
Dissertation, Shaker Verlag, Aachen

Chandra, S.; W. Liping
1999
Colloidal Silica in Stone Conservation
Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, 5., 1999, Heft 1, S. 15-28

Charola, A.E.
2000
Salts in the deterioration of porous materials: An overview
Journal American Institut of Conservation, 39, 327-343

Diglas, G.
1996
EU-1270: EUROCARE-KERASANITATE, Schloss Schönbrunn-Richterhöfl, Wien
Zwischenbericht, Sonderdruck Schloss Schönbrunn-Richterhöfl

Diglas, G.
1996
EU-1270: EUROCARE-KERASANITATE, Kirche - Santa Maria Della Visitazione, Venedig
Schlussbericht, Kirche - Santa Maria Della Visitazione, Venedig

Diglas, G.
1996
Eureka - Sanierung von feuchtem und versalztem Mauerwerk
Bausubstanz, 12., Heft Nr. 1/1996, S. 51-53

DIN 50 021
05/75
Korrosionsprüfungen - Sprühnebelprüfungen mit verschiedenen Natriumchloridlösungen

DIN 52 111
03/90
Prüfung von Naturstein. Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat

DIN 53 167 Entwurf
1/83
Salzsprühnebelprüfung an Anstrichen und ähnlichen Beschichtungen

Droll, K.; H. G. Meier
1996
Querschnittshydrophobierung von Sanierputzen - Langzeiterfahrungen, Teil 1 und Teil 2
Bautenschutz + Bausanierung, 19., Heft Nr. 3/1996, S. 47-51, Heft Nr. 4/1996, S. 44-46

Duttlinger, W.
1990
Die Zerstörung von Naturwerksteinen durch Salze - Untersuchung am Bauwerk und vergleichende Versuche im Labor
Dissertation, Universität Freiburg i. Br.

Ettl, H.; H. Schuh
1992
Entsalzungsversuche an Sandsteinen - Umweltbedingte Gebäudeschäden am Zisterzienserkloster Eberbach
Die Geowissenschaften, 10., Heft Nr. 9/10, 1992, S. 285-287

Fichtner, R.; F. Wolko; H. Venzmer
1994
Verfahrensüberblick zur Mauerwerksentsalzung
Bautenschutz + Bausanierung, 17, 03/94, Nr. 2, S. 53-58

Franke, L.; F. Pinsler
1998
Untersuchungen von Salztransportprozessen und deren Visualisierung mit Hilfe der Röntgenanalytik
Intern. Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 4. Heft 3, S. 187-207

Frenzel, G.
1962
Kleinverwitterungs-Skulpturen im südpfälzischen Buntsandstein
Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatsheft 1962, S. 453-467

Frenzel, G.
1981
Salzmineralien als spätdiagenetische Neubildungen im südpfälzischen Buntsandstein
Chemische Erde, 40, (1981), S. 121-138

Frenzel, G.
1963
Salzausblühungen im südpfälzischen Buntsandstein
N. Jb. Miner. Abh., 100, 2, 130-144,

Friese, P.; A. Protz
1994
Salzschäden an Ziegelmauerwerk und praktische Erfahrungen mit Entsalzungsverfahren
Bautenschutz + Bausanierung, 17, 11/94, Nr. 8, S. 39-45

Friese, P.; A. Protz
1997
Entsalzung mit zweiseitiger Kompresse
Bautenschutz + Bausanierung, 20., 8/1997, S. 10-13

Friese, P.; A. Protz; D. Peschl
1997
Kompressenschutz mit passenden Porenradien
Bautenschutz + Bausanierung, 20., 5/1997, S. 26-30

Friese, P.; B. Hermoneit
1993
Entsalzung von Ziegelmauerwerk mit dem Injektionskompressenverfahren
Bautenschutz + Bausanierung, 16, 2/93, S. (26-27)

Gauri, K. L.; A. N. Chowdhury; N. P. Kulshreshtha;A. R. Punuru
1988
Geologic features and the durability of limestones at the Sphinx - Les caractéristiques géologiques et la durabilité des calcaires du Sphinx
Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites, Marinos & Koukis (eds), S. 723-729

Gfrörer, M.
1995
Experimentelle Untersuchungen über den Transport von Salzlösungen in einem Buntsandstein-Werkstein
Diplomarbeit, TH Darmstadt

Goretzki, L.
1997
Was ist Entsalzung? - Grundlagen der Schadensphänomenologie, Teil 4
Bausubstanz, 13., 5/1997, S. 48-50

Goretzki, L.; U. Karolewski
1997
Beständigkeit bei Feuchte- und Salzbelastung
Bautenschutz + Bausanierung, 20., 5/1997, S. 31-37

Grassegger, G.
1992
Vorführung von Steinschäden und wissenschaftlichen Untersuchungen zu ihrer Entstehungsgeschichte und Restaurierung an Baudenkmälern
FMPA Stuttgart, Beih. z. Eur. J. Mineral. Vol. 4, 1992, No. 2, S. 43-46

Grossi, C. M. et al
1997
Acoustic emission monitoring to study sodium sulphate crystallization in monumental porous carbonate stones.
Studies in Conservation, 42., Heft 2/1997, S. 115-125

Hafezi, M.; M. Figgemeier
1999
Differenziert vorgehen - Putztechnische Lösungen als Alternative zum Sanierputz
Bautenschutz + Bausanierung, 22., 1999, Heft 6, S. 31-36

Hafezi, M.; M. Figgemeier
1999
Putzsysteme auf feuchte- und salzbelastetem Mauerwerk
Stuck-Putz-Trockenbau, 6/1999, S. 46-51

Hettmann, D.
1993
Zur Beeinflussung des Feuchte- und Salzgehaltes in Mauerwerk
Bautenschutz + Bausanierung, 5/1993, S. (72-75)

Hettmann, D.
1990
Historisch echt oder technisch richtig? - Die Praxis sollte das Kriterium der Wahrheit sein
Bausubstanz, 6, 10/90, 26-29

Hettmann, D.
1994
Sanierputz - nur eine "flankierende" Maßnahme?, Teil 1
Bausubstanz, 10., Heft 10/1994, 51-53

Hilbert, G.; J. Müller-Rochholz; K. Zinsmeister
1992
Salzeinlagerung in Sanierputze - Teil 1 und Teil 2
Bautenschutz + Bausanierung, 15, 06/92, S. (69-71) und 15, 07(92, S. (78-80)

Hilbert, G.; M. Rüenauver
1998
Technisches Optimum - denkmalpflegerische Zielvorstellung, Anwendungserfahrungen in der Denkmalpflege mit Putzmörtel
Bautenschutz + Bausanierung, 21., Heft 5, S. 16-18

Holm, A. & Künzel, H.M.
2000
Bestimmung der Wasser- und Salzgehaltsverteilung durch Kombination von NMR- und y-Durchstrahlungsmessungen
Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, 6, 401-414

IGS und TÜV
1992
7. Münchener Sanierungstage - Seminar feuchter Wände und Salzsanierung, 22./23.10.1992
Institut für Gebäudeanalyse und Sanierungsplanung - TÜV Akademie, München

Janotte, O.
1997
Sanierputz - Problembewusst bei Beschichtungen
Bautenschutz + Bausanierung, 20., 3/1997, S. 22-25

Keilwerth, S.
1997
Vakuumentsalzung an gefassten Putzen
Belegarbeit, Kooperationsprojekt "Vakuumentsalzung", FH Erfurt, Bericht über eine Versuchsreihe

Kirchner, D.; A. Worch
1993
Physikalische Vorgänge bei der Salzkristallisation
Bautenschutz + Bausanierung, 16/1993, S. (101-103)

Klemm, W.; H. Siedel
1999
Schwefelisotopenanalyse von bauschädlichen Sulfatsalzen an historischen Bauwerken
Wissenschaftliche Mitteilungen der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie, Heft 8

Koblischek, P. J.
1997
Entsalzen von Natursteinen mit konfektionierter Kompresse
WTA-Seminar "Verfahren zum Entsalzen von Naturstein, Mauerwerk und Putz", Weimar, 1.12.1997, Vortragsmanuskript

Kollmann, H.
1990
Sanierputz: Mittlerweile seit 15 Jahren im Einsatz - Neue Erfahrungen und alte Fehler
Bausubstanz, 6, 11-12/90, 58-59

Kollmann, H.
1995
Sanierputzsysteme
WTA-Schriftenreihe, Heft 7 - Aedificatio-Verlag GmbH, Freiburg

Kollmann, H.
1991
Salzbehandlung - Stand der Dinge
Zusammenstellung im Rahmen der Arbeit der WTA-Arbeitsgruppe 2.1 "Feuchte- und Salzbelastung von Sanierputzen"

Kollmann, H.; G. Strübel
1979
Untersuchungen über Ausblühungs- und Treiberscheinungen durch Sulfate
Betonwerk + Fertigteil-Technik, 10/1979, 609-614, 671-677, 741-746,

Koob, Stephen P. & Ng, Won Yee
2000
The desalination of ceramics using a semi-automated continuous washing station
Studies in Conservation, 45, 4/2000, 265-273

Kuchler, J.G. & Schrenk, J.
2000
Die einlagige Innovation
ausbau+fassade, 11/2000, 42-44

Kuhl, O.
1995
Einfluß von Wasser und Salzlösungen auf Sanierputze mit unterschiedlicher Porosität
Dissertation, Uni Gießen

Kühne, H.-C.
1997
Untersuchungen zum Einfluß der Porenstruktur auf die Dauerhaftigkeit baukeramischer Produkte bei
Einwirkung von Salzen oder Frost
Dissertation, Technische Universität Hamburg

Künzel, H.
1990
Trocknungsblockade durch Mauerversalzung
IBP Mitteilungen, 17 (1990) Nr. 193

Künzel, H.
1991
Trocknungsblockade durch Mauerversalzung
Bautenschutz + Bausanierung, 14, 1991, 63-66

Laue, S.
1997
Einfluss des Porenraums und des Raumklimas auf die Verwitterung von Steinen durch lösliche Salze
Dissertation, Universität Mainz

Legrum, B.
1993
Die Entsalzung von Steindenkmälern - ein Forschungsprojekt der VW-Stiftung
Arbeitsblätter für Restauratoren, Gruppe 6 - Stein, 26., 2/1993, S. 282-288

Legrum, B.
1993
Die Entsalzung von Steindenkmälern - ein Forschungsprojekt der VW-Stiftung
Arbeitsblätter für Restauratoren, Heft 2/1993, Gruppe 6/Stein, 282-288

Legrum, J.
1991
Der Einfluss wasserlöslicher Salze auf die physikalischen Eigenschaften von Sandsteinen und ihre Verwitterungserscheinungen an Bauwerken
Dissertation, Universität Saarbrücken

Lunkwitz, R.; R. Salzer
1999
FTIR-Diagnose von Salzschäden an Bauwerksteilen
Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, 5., 1999, Heft 2, S. 211-220

Marschner, H.
1973
Laboratoriumsuntersuchungen zum Verwitterungsschutz von Bausteinen
Deutsche Kunst- u. Denkmalpflege, 31, Heft 1/2, S. 32-44

Matt, M.
1992
Idsteiner Schloss: Historische Baufehler repariert - Feuchte Mauer und falsche Statik erfolgreich behoben
Bausubstanz, 8, 10/92, S. 14-16

Mayer, G.; D. Kovácová; F.H. Wittmann
1995
Feuchtigkeits- und Salztransport in Mauerwerk und Sanierputz
Intern. Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 1., Heft 6/1995, S. 509-524

McCoy, W. J.; O. L. Eschenour
1968
Significance of Total and Water-Soluble Alkali Contents of Portland Cement
Journal of Materials, JMLSA, Vol. 3; No. 3, S. 684-694

Meier, H. G.
1991
Sanierputz: Endlich aus Fehlern lernen
Bausubstanz, 7, 09/91, S. 59-62

Meier, H. G.
1986
Untersuchungen zur Optimierung von Sanierputzen
Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, 2. Int. Kolloq., 02.-04.09.86, Esslingen - Colfirmit Marthahütte GmbH, Marktredwitz,S. 343-346

Meier, H. G.
1992
Ergänzende Anmerkungen zum Themenkreis "Salzeinlagerungen in Sanierputze"
Bautenschutz + Bausanierung, 15, 08/92, S. (84-85)

Meier, H. G.
1999
Sanierputze - Ein wichtiger Bestandteil der Bauwerksinstandsetzung
Baupraxis & Dokumentation, Bd. 18, Expert-Verlag, Stuttgart

Meier, H. G.
1999
Die dritte Generation
Stuck-Putz-Trockenbau, 6/1999, S. 44-45

Meier, H. G.; K. Fischer
1998
Putz für die Denkmalpflege? - Sanierputze für feuchtes und salzhaltiges Mauerwerk - Pro + Contra
Bausubstanz, 14., Heft 10, S. 42-45

Meyer, H.
1997
Salze - Sprengstoff für mineralische Baustoffe
NATURSTEIN, 51., 4/1997, S. 69-71

Minder-Heng, V.; A.-J. Berteaud; V. Verges-Belmin
1994
Migration de l'eau dans les roches sous microondes en vue du dessalement des pierres de taille
Studies in Conservation, 39., No. 2/1994, 121-131

Möller, A.
2000
Versuchsreihe zu geeigneten Facingmaterialien und Klebemitteln im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit in der Vakuumentsalzung
Belegarbeit, Kooperationsprojekt "Vakuumentsalzung", FH Erfurt, Bericht über eine Versuchsreihe

N. N.
1999
Marktübersicht - Sanierputz-Systeme
Sonderbeilage, Bautenschutz + Bausanierung

N.N.
2000
Es kommt darauf an..., Eine Umfrage unter Herstellern ergab: Einlagige Sanierputze können herkömmliche Systeme nicht ganz ersetzen, sind aber in manchen Fällen eine echte Alternative.
ausbau+fassade, 1/2000, 40-42

Nägele, E.
1991
Praktische Aspekte der elektrischen Trocknung und Entsalzung poröser mineralischer Baustoffe, Teil 1 und Teil 2
Bautenschutz + Bausanierung, 14, 07/91, S. (128-129) und 08/91, S. (136-138)

Nägele, E. W.
1992
Die Rolle von Salzen bei der Verwitterung von mineralischen Baustoffen
Bautenschutz + Bausanierung, 15, 3/1992, S. (26-29)

Nägele, E. W.
1992
Die Rolle von Salzen bei der Verwitterung von mineralischen Baustoffen
WTA-Schriftenreihe, Heft 1

Perry, S. H.; A. P. Duffy
1997
The short-term effects of mortar joints on salt movement in stone
Atmospheric Environment, Vol. 31, No. 9, S. 1297-1305

Pracht, P.
1992
Dauerhafte Instandsetzung von Mauerwerk mit Sanierputz
Bautenschutz + Bausanierung, 15, 04/92, S. 28-30

Pühringer, J.; I. Mattson
1995
Klimastudien am Königlichen Schloß in Stockholm
Bautenschutz + Bausanierung, 18., Heft 7/1995, 76-82

Reul, H.
1996
Mauerwerksentsalzung mit Sanierputzen: Was ist machbar?
Bautenschutz + Bausanierung, 19., Heft Nr. 5/1996, S. 8-13

Riederer, J.
1992
Die Salzschäden am Deutschen Dom in Berlin
Bautenschutz + Bausanierung, 15, 05/92, S. (54-56)

Rösch, H.; H.-J. Schwarz
1991
Salz - der Intimfeind von Wandmalereien
Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, 11, 2/91, S. 68-71

Ross, H.; F. Stahl
1990
Sanierputz auf salzhaltigem, feuchtem Untergrund - Problematik bei nicht abdichtbarem Natursteinmauerwerk
Bautenschutz + Bausanierung, 13, 4/90, 28-30

Sadouki, H.; A. Buchwald; F. H. Wittmann; Ch. Kaps
1999
Numerical Determination of Ion Diffusivity in Bricks Based on Non-Stationary Diffusion Experiments
Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, 5., 1999, Heft 1, S. 3-14

Schmölzer, A.
1936
Zur Entstehung der Verwitterungsskulpturen an Bausteinen
Chemie der Erde, 10/1936, S. 479-520

Schoonbrood, J.; R. Prickartz
1992
Entsalzung und Trockenlegung von Mauerwerk - Folge I und Folge II
das Bauzentrum, 04/92, 28-31 und 05/92, 34-38

Schubert, P.
1999
Untersuchungen zur Langzeitbewährung von Sanier- und Opferputzsystemen - Abschlussbericht
Forschungsbericht F 543, Institut für Bauforschung, Aachen, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, Bericht F 2375

Schuh, H.; H. Ettl
1992
Entsalzung mit Kompressen in der Denkmalpflege
Bautenschutz + Bausanierung, 15, 08/92, S. (86-89)

Schumann, D.
1991
Feuchtigkeitssanierung: Als der Sanierputz erfunden war ... - Nachuntersuchung am und im Kloster Irsee
Bausubstanz, 7, 10/91, S. 18-22

Schumann, D.
1991
Zum WTA-Merkblatt 2-2-91 (Entwurf) Sanierputze
Bautenschutz + Bausanierung, 14, 05/91, S. (80-82)

SIA 2003
02/92
Sanierputze

Siedel, H.
1994
Untersuchungen und Restaurierungskonzeption zur Tulpenkanzel im Dom zu Freiberg (Sachsen) unter besonderer Berücksichtigung der Entsalzung
Arbeitsblätter für Restauratoren, 27., Heft 2 (1994), 307-312

Siedel, H.
1994
Untersuchungen und Restaurierungskonzeption zur Tulpenkanzel im Dom zu Freiberg (Sachsen) unter besonderer Berücksichtigung der Entsalzung
Arbeitsblätter für Restauratoren, Heft 2/1994, Gruppe 6/Stein, 306-312

Strauß, B.; B. Witte
1998
Vakuumentsalzung an gefassten Putzen
Belegarbeit, Kooperationsprojekt "Vakuumentsalzung", FH Erfurt, Bericht über eine Versuchsreihe

Tennikat, M.
1992
Wandmalereischäden durch Salzkristallisation - REM-Untersuchungen und Laborexperimente zu Salzausscheidungen in romanischen Kirchen
Dissertation, Universität Hannover

Toepfer, W.
1997
Entsalzung durch Electrolessivage
NATURSTEIN, 51., 4/1997, S. 63-64

VDI 3797 Blatt 1
2/80
Prüfung des zu erwartenden Resistenzverhaltens von konservierten und nicht konservierten Natursteinen gegenüber Immissionen - Salzsprengtest
VDI-Richtlinien

Venzmer, H. (Hrsg.)
1999
Entfeuchtung / Entsalzung
FAS-Schriftenreihe-Heft 10, Vorträge der 10. Hanseatischen Sanierungstage im Nov. 1999 in Kühlungsborn/Ostsee

Venzmer, H. et al
1991
Sanierung feuchter und versalzener Wände
Verlag für Bauwesen, München

Venzmer, H.; F. Wolko
1993
Mauerwerkssanierung: Pro & Contra AET - Nachdenkliches zur elektrokinetischen Mauerwerksentsalzung
Bausubstanz, 4/93, S. 34-36

Venzmer, H.; H. Kollmann
1997
Anwendung von Sanierputzen in der baulichen Denkmalpflege
WTA-Schriftenreihe, Heft 14

Venzmer, H.; N. Lesnych; F. Wolko
1998
Besonders gegen Salz - Untersuchungen zur Funktion und Effizienz einer Trocknungs- und Entsalzungsanlage am Schnickmannspeicher Rostock (Teil 1)
Bautenschutz + Bausanierung, 21., Heft 2, S. 40-45

Venzmer, H.; N. Lesnych; F. Wolko
1998
Besonders gegen Salz - Untersuchungen zur Funktion und Effizienz einer Trocknungs- und
Entsalzungsanlage am Schnickmannspeicher Rostock (Teil 2)
Bautenschutz + Bausanierung, 21., Heft 3, S. 32-36

Vogt, R.; L. Goretzki; O. Henning
1994
Zum Einfluss von Salzen auf das hygrische Verhalten von Baustoffen, Teil 2: Sorptionsverhalten salzbelasteter Baustoffe
Bautenschutz + Bausanierung, 17, 04/94, Nr. 3, S. 34-39, (Fortsetzung aus B+B, 17, 03/94, Nr. 2, S. 59-63)

Vogt, R.; L. Goretzki; O. Henning
1994
Der Einfluss von Salzen auf das hygrische Verhalten von Baustoffen, Teil 1: Hygroskopizität bauschädlicher
Salze
Bautenschutz + Bausanierung, 17, 03/94, Nr. 2, S. 59-64, (Fortsetzung in B+B, 17, 04/94, Nr. 3, S. 34-39)

von Küstenfeld, H.
1999
Goethe wäre auch zufrieden - Einsatz eines Sanierputzsystems zur Instandsetzung des Bauwerks
"Römisches Haus" in Weimar
Bautenschutz + Bausanierung, 22., 1999, Heft 7, S. 17-18

Walter, R.
1991
Buntsandstein-Zerfall in der Saline Philipshall, Bad Dürkheim
Diplom-Arbeit, Technische Hochschule Darmstadt

Weber, H.
1994
Sanierungsspielraum - Wider die Kompromisslosigkeit bei Umnutzung und Gestaltung
Bausubstanz, 10., Heft 7-8/1994, 56-58

Weber, H.
1994
Feuchte- und salzbelastetes Mauerwerk
Das Bauzentrum, 42., 7/1994, 27-32

Weber, H.
1999
Fehlervermeidung - Sanierputzsysteme im Langzeiteinsatz unter erschwerten Bedingungen
bausubstanz, 15., 1999, Heft 4, S. 30-33

Weber, H.
1997
20 Jahre Sanierputze
BauSanierung, 8., 5/1997, S. 51-58

Weber, H.
1993
Zarrentiner Tagebuch (13): Und die Wissenschaft hat doch recht - Stand der Untersuchungen
Bausubstanz, 5/93, S. 54-55

Weber, H.
1997
Was sind Salze? - Grundlagen der Schadensphänomenologie, Teil 3
Bausubstanz, 13., 4/1997, S. 44-45

Weber, H.
1993
Instandsetzung von feuchte- und salzgeschädigtem Mauerwerk
Baupraxis & Dokumentation, Band 8, Expert-Verlag, Ehningen bei Böblingen

Weber, H.
1995
Neueste Forschungsergebnisse zum feuchte- und salzbelasteten Mauerwerk
Bausanierung, 6., Heft 6/1995, S. 55-59

Weiss, G.
1992
Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandstein und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter
besonderer Berücksichtigung gesteinsspezifischer Parameter
Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe B, Heft 9

Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft
1996
Verfahren zum Entsalzen von Naturstein, Mauerwerk und Putz
WTA-Schriftenreihe, Heft 8

WTA-Merkblatt 2-1-85
1985
Die bauphysikalischen und technischen Anforderungen an Sanierputze
Wissenschaftlich-Technischer-Arbeitskreis für Denkmalpflege und Bauwerkssanierung e. V. (WTA)

WTA-Merkblatt 2-2-91
1991
Sanierputzsysteme
Wissenschaftlich-technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA)

WTA-Merkblatt 2-6-99/D
1999
Ergänzungen zum Merkblatt 2-2-91/D "Sanierputzsysteme"
Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V.

WTA-Merkblatt E 3-13-01/D
2002
Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen
Wissenschaftlich-technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA)