

Salzschäden an Kulturgütern

Stand des Wissens und Forschungsdefizite

Ergebnisse des DBU Workshops im Februar 2008
in Osnabrück

Herausgeber: Hans-Jürgen Schwarz, Michael Steiger



Impressum

Herausgeber: Hans-Jürgen Schwarz, Michael Steiger

Gestaltung: Ri-Con/ Research in Conservation
Richard-Wagner Straße 9
30177 Hannover

Umschlagsfoto: Hans-Jürgen Schwarz

Diese Broschüre wurde hergestellt mit Unterstützung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt im Rahmen des Förderprojektes Az.: 25937-45

Hannover, September 2009

ISBN 978-3-00-028965-1

9 Maßnahmen bei Salzsäden: Salzreduzierung, geeignete Putz- und Mörtelsysteme

Michael Auras*, Bärbel Arnold**, Heiner Siedel***

* Institut für Steinkonservierung e.V., Große Langgasse 29, 55116 Mainz

** Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum, Ortsteil Wünsdorf, Wünsdorfer Platz 4-5, 15806 Zossen

*** Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Geotechnik, George-Bähr-Straße 1, 01069 Dresden

9.1 Einleitung

Generell sind unter dem viel benutzten, aber leider nicht ganz zutreffenden Begriff „Entsalzung“ Maßnahmen zur Minderung der Salzbelastung eines Objektes zu verstehen. Eine vollständige Entsalzung wird aber in der Restaurierungspraxis nur in wenigen Fällen möglich sein. Besser zutreffende Begriffe wie Salzreduzierung oder Salzminderung konnten sich in der Fachsprache nicht durchsetzen. Da auch im angelsächsischen Sprachgebrauch in der Regel von „desalination“ gesprochen wird, wird in diesem Kapitel der Begriff Entsalzung weiter verwendet.

Im Folgenden sollen die verschiedenen Entsalzungsverfahren in knapper und allgemeinverständlicher Form charakterisiert und ihre Schwachstellen aufgezeigt werden. Dieser Überblick kann eine gründliche Vertiefung vor der Anwendung der Verfahren nicht ersetzen, sondern nur Anhaltspunkte geben.

9.2 Verfahren zur Salzminderung

Folgende Entsalzungsmaßnahmen stehen zur Verfügung:

- Mechanische Entfernung von Salzen
- Chemische Salzumwandlung
- Wasserbad
- Kompressenentsalzung
- Elektrisch unterstützte Verfahren
- Unterdruck-Verfahren
- Mikrobielle Denitrifizierung
- Opferputze

9.2.1 Mechanisches Entfernen von Salzen

Abbürsten, Absaugen, vorsichtiges Abkratzen von Salzausblühungen

Wirkungsweise: Die einfachste Art einer Salzreduzierung ist das Abbürsten, Absaugen oder vorsichtige Abkratzen von Salzausblühungen. Da nur die auf der Oberfläche aufliegenden Kristalle entfernt werden, verbleibt oft ein wesentlicher Teil der Salzfracht im Porenraum. In manchen Fällen kann aber solch eine mechanische Abnahme schon einen großen Teil der Salze entfernen. Dies gilt insbesondere für feinporige Materialien in Umgebungen mit relativ gleichmäßigen Klimabedingungen. Vorsichtiges Arbeiten und gegebenenfalls Versicherungen sind geboten, um die Oberfläche nicht zu beschädigen. Da es sich um eine einfache und dauerhafte Reduzierung der Salzbelastung handelt, sollte dieser Schritt jeder anderen Entsalzungsmaßnahme vorgeschaltet werden, sofern der Zustand der Oberfläche dies zulässt.

Defizite: Prinzipbedingt sind oft nur geringe Teile der Salzfracht entfernbar, mechanische Beschädigungen fragiler Oberflächen sind möglich.



Abbildung 28: Fallbeispiel zur Wirkung des Abbürstens von Salzausblühungen: Analysen des abgebürsteten Materials und der Salzverteilung im Tiefenprofil ermöglichen eine grobe Abschätzung, dass aus diesem Kalksteinkapitell durch das Abbürsten ca. 20 M.-% der Salze entfernt wurden, während 80 M.-% im Porenraum des Steins verblieben. (Foto: M. Auras)

Abschlagen von Putz, Rückarbeiten der Mauerwerksoberfläche, Steinaustausch

Wirkungsweise: Sofern denkmalpflegerisch vertretbar, sollten in stark salzbelasteten Bereichen Alputze entfernt sowie Fug- und Mauermörtel im oberflächennahen Bereich ausgeräumt werden. Handelt es sich um Mauerwerk aus dichten Mauersteinen und um oberflächennahe Salzanreicherungen, so kann mit dieser Maßnahme oft schon der Großteil der Schadsalze entfernt werden.

Das Rückarbeiten der Mauerwerksoberfläche oder partieller Steinaustausch kommen nur in Frage, wenn extreme Salzbelastungen vorliegen und die historische Oberfläche bereits vollständig verloren ist.

Defizite: Massiver Substanzverlust



Abbildung 29: Der durch Salzbelastung tiefgründig geschädigte Sandstein hat seine Originaloberfläche fast vollständig verloren. (Foto: M. Auras)

9.2.2 Chemische Salzumwandlung

Umwandlung in schwerlösliche Verbindungen: Hexafluorosilicat und Bariumhydroxid

Wirkungsweise: Eine chemische Umwandlung leicht wasserlöslicher Salze in schwerlösliche, nicht mehr schadensverursachende Verbindungen kann partiell mit Lösungen von Bleihexafluorosilicat oder Bariumhydroxid erreicht werden. Beide bilden schwerlösliche Sulfatverbindungen, Bleihexafluorosilicat auch gering lösliches Bleichlorid.

Defizite: Je nach Salzbelastung ebenfalls entstehende Blei- oder Bariumnitrate sowie Bariumchlorid sind weiterhin mäßig bis sehr gut wasserlöslich und zudem giftig. Problematisch ist die Dosierung der Salzbehandlungsmittel, die de facto nie exakt auf die vorliegende Salzmenge angepasst werden kann. Beim Einsatz von Bleihexafluorosilicat werden Verengungen des Porenraums im Bereich der Wandoberfläche beschrieben, die negative Folgen haben können.

Bleihexafluorosilicat wird kaum noch eingesetzt, Bariumhydroxid meist in Verbindung mit der Ammoniumcarbonat-Methode oder in Ausnahmefällen bei rein sulfatischer Belastung, z.B. zur Umwandlung von Magnesiumsulfaten.

Umwandlung in leichtlösliche Verbindungen: Ammoniumcarbonat-Methode

Wirkungsweise: Eine (Rück-)Umwandlung von Gips in Kalk kann durch Zugabe von Ammoniumhydrogencarbonatlösung erreicht werden. Es bildet sich schwerlösliches Calciumcarbonat und leichtlösliches Ammoniumhydrogensulfat, das bei der Trocknung in einer Kompresse aufgefangen wird (FRITZ, 1995). Ammoniumhydrogensulfat wird in einem zweiten Schritt durch Zugabe von Bariumhydroxidlösung als schwerlösliches Bariumsulfat gefällt, das verbleibende Ammoniumhydroxid zersetzt sich bei der Trocknung in die leichtflüchtigen Verbindungen Ammoniak und Wasser.

Defizite: So einleuchtend in der Theorie, so schwierig ist es in der praktischen Anwendung, die passenden Parameter zu wählen. Insbesondere zur Anwendung auf Naturstein liegen nur begrenzte Erfahrungen vor, nur selten werden diese Erfahrungen tiefgründig und im Zusammenhang diskutiert (steinspezifische Reaktionen, Applikationstechniken, Dosierung etc.). Wie bei allen Nassverfahren kann der hohe Feuchteeintrag problematisch werden. Durch photokatalytische Reaktionen entstehen langfristig aus dem Ammoniak leicht lösliche Nitratverbindungen.

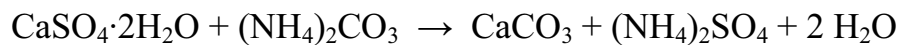
Lösungsansätze: Eine Systematisierung der vorhandenen Erfahrungen und die Formulierung von Möglichkeiten und Grenzen auf dieser Grundlage sind wünschenswert (ähnlich wie bei Kompressenentsalzung).

Die grundlegenden chemischen Reaktionen sind in vereinfachter Form dargestellt:

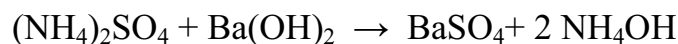
Verwitterung von Kalk zu Gips durch Luftschadstoffeinfluss
(generalisiert, ohne Zwischenstufen)



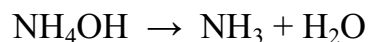
Rückumwandlung von Gips zu Kalk



Sulfatfällung



Trocknung



9.2.3 Wasserbadentsalzung

Wirkungsweise: Bei Wasserlagerung des zu behandelnden Objektes dringt Wasser in den Porenraum ein, Salze werden gelöst und diffundieren – getrieben durch das Bestreben nach Konzentrationsausgleich – aus dem Stein in das Wasserbad. Die Entsalzungseffizienz ist u.a. abhängig von Porenraum, Salzart und Salzverteilung, Objektgröße, Wassertemperatur und Häufigkeit des Badwechsels.

Defizite: Prinzipbedingt sind nur bewegliche Objekte für dieses Verfahren geeignet. Beim Eintauchen ins Wasserbad kann aufgesaugtes Wasser Salze aus Oberflächenbereichen zunächst tiefer ins Innere des Objektes befördern, entsprechend lange dauert dann der Salzaustrag. Da der Salztransport durch Ionendiffusion erfolgt, ist der Salzaustrag entsprechend langsam. Die extreme und lang andauernde Feuchtebelastung lässt eine Anwendung nur an stabilen Objekten mit stabilen Oberflächen zu, polychrome Fassungen stellen ein Ausschlusskriterium dar.

Lösungsansätze: Zur Effizienzsteigerung haben sich häufige Badwechsel und zwischengeschaltete Trocknungsphasen bewährt. Das Auflegen von Kompressen bei der Trocknung reduziert neue Salzkonzentrationen im Bereich der Oberfläche

(SIEDEL, 2005; HOFERICK, 2006). Liegt eine räumlich inhomogene Salzverteilung vor, sollte das Objekt vor dem vollständigen Eintauchen zuerst nur mit der am wenigsten salzbelasteten Seite einige Zentimeter tief in das Wasser getaucht werden, damit sich der Porenraum durch kapillares Saugen von dieser Seite her füllen kann, ohne die Salze tief in das Objektinnere zu verschleppen.



Abbildung 30: Fallbeispiel Wasserbadentsalzung: Im ersten Bad wurde binnen 6 Tagen ca. 1/6 der im Stein enthaltenen Salze entfernt, im zweiten Bad in 40 Tagen ein weiteres Drittel. (Foto: M. Auras)

9.2.4 Kompressen

Die Wirkungsweise und Anwendung von Kompressen zur Entsalzung von Naturstein und anderen porösen Materialien ist im WTA-MERKBLATT 3-13-01/D (2003) beschrieben (s. a. SIEDEL, 2005; VERGÈS-BELMIN und SIEDEL, 2005).

Wirkungsweise: Auf salzbelastete Oberflächen werden Kompressen aus feuchten, saugfähigen und anschmiegbaren Materialien aufgelegt. In dem zum Vornässen eingesetzten und aus den Kompressen in die Objektoberfläche gesaugten Wasser lösen sich Salze, die anschließend durch Ionendiffusion oder Kapillartransport in die Komresse transportiert werden. Werden die Kompressen dauerfeucht gehalten, so ist nur ein diffusiver Salztransport möglich. Effektiver sind meist trocknende Kompressen, bei denen gelöste Ionen mit dem Wasser kapillar in die Kompressen gesaugt werden. Relevante Parameter sind der Porenraum des Objektes, Kompressenmaterial, Trocknungsgeschwindigkeit, Salzart und Salzverteilung, Feuchtegehalt des Objektes und Feuchteeintrag beim Aufbringen der Komresse.

In der Regel sind mehrere Entsalzungszyklen notwendig, um einen wesentlichen Teil der Salze zu entfernen. Als Kompressenmaterialien werden meist entweder Zellulosefasern oder Mischungen aus Tonmineralen (Montmorillonit, Kaolin, Attapulgit, Sepiolit etc.), Zellulosefasern und Zuschlagsstoffen (Sand, Leichtzuschläge) verwendet. Auch verschiedene Papier- und Textilarten werden eingesetzt. Sollen größere Flächen entsalzt werden, so können manche Kompressenmaterialien mit Putzmaschinen aufgespritzt werden. Neben einer höheren Verarbeitungsgeschwindigkeit wird damit auch eine bessere Haftung der Kompressen am Substrat bei Verarbeitung über Kopf erreicht.

Die Kompressenentsalzung dürfte mittlerweile das am häufigsten angewandte Entsalzungsverfahren sein. Kombinationen mit anderen Verfahren sind recht häufig, vor allem mit dem Wasserbad, aber auch mit elektrophysikalischen Methoden, mikrobiellen Verfahren oder mit Varianten des Unterdruckverfahrens.

Defizite: Wie bei allen Nassverfahren besteht die Gefahr, dass bei zu hohem Feuchteintrag Salze aus oberflächennahen Zonen in tiefere Zonen getrieben werden. Entsprechend gering ist dann die Effizienz der Kompressenentsalzung, und es kann lange dauern, bis die Salze zurück zur Oberfläche transportiert werden. Oft sind die Restaurierungsmaßnahmen dann schon abgeschlossen.

Da die Kompressen meist nur auf einen Teil der Objektoberfläche aufgetragen werden, kann es durch Salztransport zur Seite hin zum Salzeintrag in bislang unbelastete Bereiche kommen.

Nicht selten sind die langen Standzeiten der Kompressen und ihre mehrfache Anwendung unvereinbar mit dem Zeitdruck, dem viele Bau- und Restaurierungsmaßnahmen unterworfen sind. Die Folge sind vorzeitige Abnahme der

Kompressen oder Verzichten auf weitere Zyklen, sodass es im Nachhinein zu neuen Ausblühungen und Salzsäden kommen kann.

Tonmineralhaltige Kompressen hinterlassen oft hartnäckige Rückstände auf der Oberfläche, die nur schwer zu entfernen sind. Manche dieser Kompressen neigen zu starkem Schwinden beim Trocknen und üben dadurch Zugspannungen auf die Objekt Oberfläche aus.

Zellulosehaltige Kompressenmaterialien neigen bei geringer Trocknungsgeschwindigkeit und kontaminierten Substraten zur Schimmelbildung, eine regelmäßige Kontrolle ist daher notwendig.



Abbildung 31: Aufbringen verschiedener Kompressenmaterialien mit der Putzmaschine. (Foto: P. Egloffstein)

Optimierungsansätze: Vortests mit verschiedenen Kompressenmaterialien oder Trocknungsbedingungen können aufgrund der unterschiedlichen Entsalzungseffizienz die Wahl eines Materials und der Anwendungsparameter für das jeweilige Substrat erleichtern. Ein Vornässen mit Mischungen aus Wasser und Ethanol kann den Feuchteintrag bei diesem Arbeitsgang reduzieren und die Objektoberfläche entspannen, so dass nachfolgend aufgebrauchte Schichten besser haften. Textile Kompressen können mit geringerem Wassergehalt eingebaut werden als z.B. Zelluloseflocken. Tonmineralische Rückstände auf der Oberfläche lassen sich durch Zwischenschichten beispielsweise aus Japanpapier oder Zellulosefasern vermeiden. In manchen Fällen kann z.B. durch Wasserzuführung von der Rückseite ein gerichteter Feuchtestrom aus dem Stein in die Komresse hergestellt werden. Dies kann die Effizienz des Salzaustrags wesentlich steigern.

Systematische Versuche zur Optimierung von Kompressenmaterialien werden zur Zeit im Rahmen des EU-Projektes „Desalination“ durchgeführt (BOURGÈS und VERGÈS-BELMIN, 2008; BOURGUIGNON et al., 2008).

Empfehlenswert wäre, auch andere umfassend analytisch begleitete Fallstudien zusammenzustellen und vergleichend auszuwerten. Soweit möglich sollten auf solch systematischen Studien basierend mittels numerischer Modellierung des Feuchte-Salz-Transports und numerischer Parameterstudien Kriterien für die Wahl von Kompressenmaterial und Trocknungsbedingungen erarbeitet werden, um das bislang vorherrschende Experimentieren abzulösen.

Textile Kompressen bieten interessante Ansätze. Vorteile sind die einfache Anbringung an Skulpturen und anderen kleinen dreidimensionalen Objekten sowie die Möglichkeit ihrer Wiederverwendung durch Auswaschen der Salze nach Gebrauch. Ein interessantes Fallbeispiel zur Entsalzung von Fugen im Ziegelmauerwerk mit textilen Bändern geben HOPP und ZIER (2005).

Die Einsatzmöglichkeiten elektrophysikalischer Unterstützung einer Kompressenentsalzung sollten ausgelotet werden.

9.2.5 Elektrisch unterstützte Verfahren

Mit interessanten neuen Ansätzen - unter anderem zur Mauerwerksentsalzung im elektrischen Feld - befasst sich seit kurzem eine neue RILEM-Arbeitsgruppe (RILEM Technical committee „Electrokinetic processes in Civil and Environmental Engineering“). In der Fachliteratur finden sich verschiedene Ansätze und diverse Fallbeispiele zu dieser Methode (z.B. NÄGELE, 1991; ARENDT und WIESEN, 1995; AURAS und MELISA, 2002; FRIESE und PROTZ, 2003; OTTOSEN et al., 2008). Eine systematische Erforschung der aus vielfachen Einflüssen resultierenden Ergebnisse wäre sehr wünschenswert, um zu gesicherten Erkenntnissen bezüglich der Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen zu gelangen.

9.2.6 Unterdruckverfahren (Vakuumentsalzung)

Wirkungsweise: Beim Vakuumverfahren - oder korrekter - Unterdruckverfahren wird das zu entsalzende Objekt mit Wasser beaufschlagt, sodass Salze in Lösung gehen können. Das Wasser wird dann mit seiner Salzfracht soweit als möglich abgesaugt. Um einen entsprechenden Unterdruck erzeugen zu können, ist ein luftdichter Verbund zwischen Absauggerät und Objektoberfläche notwendig, ebenso wie entsprechend stabile Oberflächen der Objekte. Verschiedene Verfahrensansätze wurden entwickelt, diese Dichtung mit Gummimaterialien, Folien, Kitten oder ähnlichem herzustellen. Frühere Versuche wandten das Vakuumverfahren in Verbindung mit dem Wasserbad an.

Defizite: Das Verfahren ist mit hoher Feuchtebelastung und hoher mechanischer Belastung der Oberflächen verbunden. Klüfte, Fugen, Gesteinsinhomogenitäten oder Verwitterungszonen bieten bessere Wegsamkeit für Luft und Wasser als intakte homogene Bereiche, weshalb in solchen Fällen eine gleichmäßige Entsalzungswirkung unwahrscheinlich ist. Mittels Unterdruck kann Wasser bzw. Salzlösung nur aus sehr großen Poren abgesaugt werden, da die kapillare Saugspannung nicht überwunden wird. Es verbleibt also ein Großteil der Salzlösung im Porenraum, die Effizienz des Verfahrens bleibt fraglich.

Optimierungsansätze: Interessant ist z.B. ein Ansatz zur Umhüllung z.B. von Skulpturen mit Folien, wobei kontinuierlich oder periodisch Wasser an verschiedenen Stellen zugegeben wird und kontinuierlich an anderer Stelle abgesaugt wird. Auch die Kombination mit Kompressen kann in manchen Fällen in Frage kommen, wenn eine beschleunigte Teiltrocknung der Kompressen wünschenswert ist, um die Feuchtigkeit nicht zu tief in den Untergrund gelangen zu lassen. Beide Varianten wurden bislang nur sehr vereinzelt angewandt, eine allgemeine Bewertung ist daher bislang nicht möglich.

9.2.7 Mikrobielle Denitrifizierung

Wirkungsweise: Objektoberflächen oder Kompressen werden mit Kulturen denitrifizierender Bakterien geimpft (VENZMER, 2005; BERGER-TOMAJER, 2006). Diese setzen Nitrate zu gasförmigem Stickstoff um, der entweicht. Die zurückbleibenden Kationen bilden gleichzeitig Carbonat-Verbindungen, so dass letztlich ein Salz durch ein anderes ersetzt wird. Calcium- und Magnesiumnitrate werden zu schwerlöslichen Calcium- und Magnesiumcarbonaten umgesetzt. Entstehen leichtlösliche Alkalicarbonate, so können diese unter Umständen zu neuen Salzschäden führen.

Defizite: Bisher ist das Verfahren nur in mehreren Forschungsansätzen erprobt, es ist noch nicht praxisreif. Die mikrobielle Umsetzung der Nitrate ist sehr langwierig

und erfordert fallweise eine Nachbehandlung mit Bioziden. Andere Salzarten werden nicht umgesetzt, neue Salzarten können entstehen.

9.2.8 Putze und Mörtel für salzbelastetes Mauerwerk

Bei stark salzbelastetem Mauerwerk kann es technisch unmöglich oder wirtschaftlich nicht vertretbar sein, die Salzbelastung merklich zu mindern (z.B. Ruinen). In solchen Fällen kann es sinnvoll sein, Mörtel einzusetzen, die Salze aufnehmen und damit den Ort der Salzkristallisation von der Oberfläche des Natursteins in den Opferputz verlegen. Dadurch wirken die Belastung durch Salzkristallisation auf Putz und Mörtel, die anstelle des Natursteins verwittern.

Die im Folgenden angesprochenen Putzsysteme werden auf salzbelasteten Untergründen angewandt und zeigen bezüglich Salzreduzierung und Dauerhaftigkeit merkliche Unterschiede.

Die Anforderungen an spezielle Opferputze und Opfermörtel zur Salzreduktion und ihre Anwendung sind im WTA-MERKBLATT 2-10-06/D (2006) beschrieben.

Sanierputz / porenhydrophobe Mörtel

Wirkungsweise: Sanierputze sind zementgebundene, hydrophobe, hochporöse Putze, die eine salzfreie und trockene Oberfläche gewährleisten sollen. Die wasserabweisende (hydrophobe) Ausrüstung verhindert den kapillaren Feuchte- und Salztransport. Die hohe Porosität sorgt für einen geringen Wasserdampfdiffusionswiderstand und soll damit die Trocknung des Untergrundes möglichst wenig behindern. Der hohe Anteil großer Poren soll zudem Platz für Salzkristallisation bieten. Das zementhaltige Bindemittel ist fest genug, um einer Salzkristallisation lange Widerstand zu leisten (HILBERT et al., 1992). Anforderungen an Sanierputze sowie ihre Anwendung und Wirkungsweise sind im WTA-MERKBLATT 2-9-04/D (2005) beschrieben.

Defizite: Sanierputze entziehen dem Mauerwerk kaum Salz, sondern wirken eher kaschierend. Die Feuchtigkeit muss unter dem Sanierputz verdunsten und dann mittels Wasserdampfdiffusion durch das gesamte Putzpaket hindurch transportiert werden. Diese Art der Trocknung ist weit weniger effektiv als ein kapillarer Feuchtigkeitstransport bis zur Oberfläche und dortige Verdunstung. Daher kann es bei entsprechendem Feuchtenachschub zu einer stärkeren Durchfeuchtung des Mauerwerks hinter dem Sanierputz kommen. In vielen Fällen wurde beobachtet, dass nach Jahren die Feuchtigkeit oberhalb der mit Sanierputz verputzten Fläche austritt, weil der Sanierputz sperrend wirkt.

Sehr problematisch sind Bauweisen mit unverputzten Natursteinelementen zwischen Sanierputzflächen: Wenn der Feuchtenachschub im Mauerwerk nicht vollständig unterbunden ist, kommt es zu einer Umleitung des Feuchtestroms in

die Natursteinelemente, da dort eine effektivere Trocknung stattfindet. Dies hat zur Folge, dass auch Salze bevorzugt in die meist originalen Steinelemente eingetragen werden, die nun anstelle der neuen Sanierputzflächen verwittern.

Optimierungen: Nicht hydrophobe Fugmörtel und Unterputze unter der obersten Sanierputzlage können einen Teil der Salze aufnehmen (Sanierputzsystem). Maßnahmen zur effektiven Reduzierung des Feuchteintrags sind unumgänglich.



Abbildung 32: Durch den Sanierputz wird die Trocknung über die Putzfläche behindert. Daher wird der Feuchte- und Salztransport in die Gewände aus kapillar saugfähigem Sandstein umgeleitet. Die Folgen sind zwar eine schadensfreie Sanierputzoberfläche, gleichzeitig aber eine extreme Verwitterung des historischen Sandsteingewändes. (Foto: M. Auras)

Kalkmörtel und ähnliche Mörtel

Im Gegensatz zu den Sanierputzen sind Kalkmörtel sehr saugfähig. Daher transportieren sie Feuchte (und darin gelöste Salze) bis zur Putzoberfläche. Sie

gewährleisten eine effektive Trocknung des Untergrunds, besitzen moderate Festigkeit und können dem historischen Befund recht gut nachgestellt werden.

Defizite: Die hohe kapillare Saugfähigkeit bewirkt ein schnelles Durchschlagen von Feuchteflecken und Salzausblühungen. Die geringe Festigkeit vor allem von frischen, nicht carbonatisierten Kalkmörtel führt auf salzbelasteten Substraten bald zu neuen Schäden.



Abbildung 33: Verfugung eines extrem salzbelasteten Ruinenmauerwerks aus Sandstein mit einem Mörtel auf Basis natürlich hydraulischen Kalkes im Trockenspritzverfahren. Salz wandert bevorzugt in den Mörtel und kristallisiert auf der Fugenoberfläche aus. (Foto: M. Auras)

Bei stark hygroskopischen Salzen kann es schnell zu einer Trocknungsblockade kommen, wenn soviel Salz eingelagert wird, dass dessen hygroskopische Wirkung zu dauerfeuchten Oberflächen führt, die eine weitere Trocknung des Mauerwerks unterbinden.

ETTL und KRUS (2003) vergleichen die Entsalzungswirkung eines Luftkalkputzes und einer Bentonitkompressse. Die geringere Salzeinwanderung in den Kalkputz bei ähnlicher kapillarer Saugfähigkeit wird auf einen Übergangswiderstand zwischen Substrat (Schilfsandstein) und Kalkputz zurückgeführt. Diese These ist zu überprüfen.

Lösungsansätze: Natürlich hydraulische Kalke bieten anstelle von Luftkalkmörteln deutlich höhere Festigkeiten, die durch entsprechende Verarbeitung (z.B. Verfübung im Trockenspritzverfahren) weiter gesteigert werden kann. Dadurch können entsprechende Mörtel der Salzkristallisation lange widerstehen. Gleichzeitig bleibt die hohe kapillare Saugfähigkeit erhalten, sodass Feuchte und Salz bevorzugt in den Mörtel / Putz einwandern und nicht in den Mauerstein oder in Natursteinelemente verdrängt werden (AURAS, 2008).

Kompressenputz

Ein spezieller Kompressenputz mit dem Ziel eines möglichst effektiven Salzaustrags aus dem Mauerwerk wurde entwickelt (HILBERT, 2005; WTA-MERKBLATT 2-10-06/D, 2006). Es handelt sich um einen zementgebundenen, hochporösen, aber im Gegensatz zum Sanierputz nicht hydrophoben Putz, dessen Porensystem auf hohen Feuchtedurchgang (kapillar und diffusiv) optimiert ist. Die Trocknung des Untergrundes wird möglichst wenig eingeschränkt, Salze können einwandern und auf der Putzoberfläche ausblühen, das Bindemittel bietet Widerstand gegen Salzkristallisation. Konzipiert ist der Kompressenputz auf eine Standzeit von einigen Jahren, danach kann er mit seiner Salzfracht entfernt werden.

Defizite: Feuchteflecken und Salzausblühungen können zu einer wenig ansehnlichen Oberfläche führen. Nach der Putzabnahme bleiben Zementrückstände auf der Mauerwerksoberfläche.

9.3 Defizite

Mit Ausnahme des Abbürstens von Salzausblühungen sind alle bekannten Verfahren zur Minderung des Schadsalzgehaltes mit hoher Feuchtebelastung für das Objekt verbunden. Für empfindliche Oberflächen sind all diese Verfahren nicht oder nur sehr bedingt geeignet. In diesen Fällen sind Vorsicherungen nötig, die sich negativ auf die Effizienz der Entsalzungsmaßnahmen auswirken können. Fallweise muss auf Methoden ausgewichen werden, die geringeren Feuchteeintrag bei geringerer Entsalzungseffizienz erwarten lassen.

In den meisten Fällen erfolgt eine Anwendung von Entsalzungsmaßnahmen ohne ausreichende Voruntersuchungen (= Probierkunde). Auch wenn Vortests ausgeführt werden, wird nur selten geklärt, warum eine Methode oder ein Material erfolgreicher ist als ein anderes (= analytisch unterstützte Probierkunde).

Bei der handwerklichen Umsetzung von Kompressenentsalzungen werden Ausführungsempfehlungen (z.B. WTA-MERKBLATT 3-13-01/D, 2003) oft nicht oder nur unzureichend beachtet. Immer wieder ist zu beobachten, dass durch intensives Vornässen Salze zunächst tief in den Untergrund getrieben werden und erst nach mehreren Monaten wieder an Oberfläche zurücktransportiert werden.

Systematische Studien und Schadstoffbilanzierungen sind selten, fallübergreifende Betrachtungen der Einflussfaktoren oder Langzeitbeobachtungen an „entsalzten“ Objekten sind noch seltener. Konkrete Empfehlungen für einen konkreten Fall sind daher nur sehr eingeschränkt möglich.

9.4 Desiderate / Lösungsansätze

Eine Systematisierung der Studien ist notwendig. Der Salzaustrag ist stets quantitativ zu bestimmen und nach Möglichkeit mit der Salzbelastung vor den Maßnahmen in Relation zu stellen. Langzeitkontrollen sind notwendig.

Numerische Parameterstudien und möglichst einfach anwendbare Simulationsprogramme zum Feuchte-Salz-Transport sind wünschenswert. Sie müssen Fachplanern zugänglich gemacht und anhand von Vergleichen mit realen Fällen optimiert werden.

Potentiale sind erkennbar:

- in Optimierungen der Kompressenmaterialien und in der Optimierung ihrer Anwendung,
- in der Kombination verschiedener Verfahren (z.B. elektrophysikalische Unterstützung von Wasserbad und Kompressen, Kompressen mit Unterdruckunterstützung),
- in elektrokinetischen Verfahren, die aber zunächst einer kritischen Revision und der Definition von Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen bedürfen,
- in der Optimierung von Putz- und Mörtelsystemen für salzbelastetes Mauerwerk.

9.5 Literatur

ARENDE C., WIESEN H. (1995): Verfahren zur Entsalzung und Trockenlegung von historischen Mauerwerk - Anspruch und Wirklichkeit. - In: Sneathlage, R. (Hrsg.): Jahresberichte Steinerfall - Steinkonservierung 1993, Verlag Ernst & Sohn GmbH, 1995; 107-114.

AURAS M. (2008): Poultices and mortars for salt contaminated masonry and stone objects. - In: Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures – Proceedings from the International Conference. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, Copenhagen, 197 – 217.

AURAS M., MELISA G. (2002): Kompressenentsalzung – Wirkungsprinzip, Materialien, Anwendung, Fallbeispiele. - In: Salze im historischen Natursteinmauerwerk. Institut für Steinkonservierung e. V., Mainz, Bericht 14, 41 – 52.

- BERGER-TOMAJER V (2006): Untersuchungen zu Möglichkeiten und Grenzen der mikrobiellen Nitratreduzierung auf Wandmalereien. Diplomarbeit an der FH Hildesheim/Holzminde/Göttingen
- BOURGÈS A., VERGÈS-BELMIN V. (2008): Comparison and optimization of six desalination systems on inner walls of Saint Philibert Church in Dijon, France. - In: Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures – Proceedings from the International Conference. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, Copenhagen, 29 – 40.
- BOURGUIGNON E., BERTRAND F., BOURGES A., COUSSOT P., SHAHIDZADEH-BONN N. (2008): Poultrice characterization and MRI study of desalination of model stones. - In: Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures – Proceedings from the International Conference. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, Copenhagen, 329 – 339.
- ETTL H., KRUS M. (2003): Salzreduzierung am Schloss Frankenberg, Kompressen im Test, begleitende rechnerische Untersuchungen. *Restauro* 109/5, 322-326.
- FRIESE P., PROTZ A. (2003): Mauerwerk mit Wandmalereien - Elektrochemische Entsalzung. *Arconis*, 8, 2/2003, 4-7.
- FRITZ E. (1995): Gipsumwandlungs- und Reinigungsverfahren an Wandmalereien - Möglichkeiten und Gefahren beim Einsatz von Ammoniumcarbonat. *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, 9, Heft 2, 366-376.
- HILBERT G. (2005): Ein Buch mit sieben Siegeln – Betrachtungen zum Thema Opferputz. *Der Maler und Lackierermeister* 6/2005, 64-65.
- HILBERT G., MÜLLER-ROCHHOLZ J., ZINSMEISTER K. (1992): Salzeinlagerung in Sanierputze. *Bautenschutz + Bausanierung*, 15, 69-71 und. 78-80.
- HOFERICK F. (2006): Entsalzung von Skulpturen aus Elbsandstein im Wasserbadverfahren. In: Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Halle (Hrsg.): Praxisorientierte Forschung in der Denkmalpflege - 10 Jahre IDK. Beiträge der Fachtagung am 19.09.2006 in Halle/Saale, 83-92.
- HOPP H., ZIER H.-W. (2005): Abschlussbericht zum DBU-Projekt „Modellhafte Entwicklung einer innovativen Technologie zur komplexen Salzreduktion und zur Konsolidierung dieser Bereiche an stark umweltgeschädigtem Ziegelmauerwerk am Beispiel der Stadtkirche St. Johannis in Gera (Thüringen).“ (AZ: 18427-45). Ingenieurbüro für Steinsanierung, Erfurt, 82 S.
- LEGRUM B. (1993): Die Entsalzung von Steindenkmälern - ein Forschungsprojekt der VW-Stiftung. *Arbeitsblätter für Restauratoren*, Heft 2/1993, Gruppe 6/Stein, 282-288.
- NÄGELE E. (1991): Praktische Aspekte der elektrischen Trocknung und Entsalzung poröser mineralischer Baustoffe. *Bautenschutz + Bausanierung*, 14, 128-129 und 136-138.

- OTTOSEN L., RÖRIG-DALGAARD I., VILLUMSEN A. (2008): Electrochemical removal of salts from masonry – Experiences from pilot scale. - In: Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures – Proceedings from the International Conference. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, Copenhagen, 341-350.
- SIEDEL H. (2005): Entsalzung von Naturstein - Methoden und Probleme. - In: Siegesmund, S.; Auras, M.; Snethlage, R. (Hrsg.): Stein Zerfall und Konservierung. Edition Leipzig, 102-108.
- VENZMER H. (2005): Biokompresse. Huss-Medien, Berlin, *Schriftenreihe Altbausanierung* 9/10, 170 S.
- VERGÈS-BELMIN V., SIEDEL H. (2005): Desalination of Masonries and Monumental Sculptures by Poulticing: A Review. *Restoration of Buildings and Monuments*, 11. Jahrgang, Heft 6, 391-408.
- WIHR R. (1986): Restaurierung von Steindenkmälern - Ein Handbuch für Restauratoren, Steinbildhauer, Architekten und Denkmalpfleger. Verlag Callwey, München.
- WTA-MERKBLATT 2-9-04/D (2005): Sanierputzsysteme, Deutsche Fassung. Stand Dezember 2005. Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA-, Referat 2 Sanierputzsysteme, München (Hrsg.), Fraunhofer IRB Verlag
- WTA-MERKBLATT 2-10-06/D (2006): Opferputze, Deutsche Fassung. März 2006. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA-, Referat 2 Oberflächentechnologie, München (Hrsg.), Fraunhofer IRB Verlag
- WTA-MERKBLATT 3-13-01/D (2003): Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen, Deutsche Fassung. Stand 04.02.2003. Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA-, Referat 3 Natursteinrestaurierung, München (Hrsg.), Fraunhofer IRB Verlag