

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

2 Zur Herkunft von Salzen an Bauwerken

Heiner Siedel*

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

Die an Bauwerken auftretenden Salze können grundsätzlich aus verschiedenen Stoffquellen stammen. In der Wechselwirkung von Umwelteinflüssen und Baustoffgefüge können Ionen, die später zur Salzbildung beitragen, mobilisiert, transportiert und/oder deponiert werden. Die genaue Feststellung der Herkunft von Salzen ist oft wichtig für die Entscheidung über Instandsetzungsmaßnahmen, setzt allerdings in vielen Fällen die Untersuchung eines komplexen Prozesses voraus.

2.1 Anthropogene und natürliche Umweltfaktoren als Salzquellen

In den letzten Jahrzehnten wurde die Bedeutung der Luftverschmutzung für die Salzbildung an Bauwerken erkannt und politisch thematisiert. In vielen europäischen Ländern wurden die Ursachen mittlerweile auch erfolgreich bekämpft. Obwohl der globale Zusammenhang zwischen anthropogener Umweltverschmutzung und Bauwerksschäden allgemein bekannt ist, ist doch der direkte Nachweis der Quellen für schädliche Salze am Einzelobjekt vielfach schwierig. Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass die „trockene“ Deposition von SO_2 und NO_x aus der Luft an feuchten Baustoffoberflächen eine Hauptquelle für die Anreicherung von Schwefel und Stickstoff in Bauwerken darstellt, die dann über Zwischenstufen zu Sulfat bzw. Nitrat umgewandelt werden (BECKER et al., 2005). Regenwasser enthält je nach Umweltsituation mehr oder weniger Schwefelsäure bzw. Sulfat („saurer Regen“), das in poröse Baustoffoberflächen eingetragen wird („nasse“ Deposition). Der Eintrag über Partikel (Stäube etc.) wurde nach Messungen in den 1990er Jahren als gering eingeschätzt (BECKER et al., 2005), könnte aber in der Vergangenheit durchaus eine größere Rolle bei der Gipskrustenbildung auf Bauwerksoberflächen gespielt haben, weil die Emissionen von Kraftwerken, Industriefeuerung und Hausbrand ungefiltert in die Atmosphäre gelangten (KLEMM und SIEDEL, 2002). Über die Deposition von Aerosolen können Salze auch auf direktem Weg eingetragen werden, weil das atmosphärische Aerosol zu großen Teilen aus löslichen Salzen besteht.

Ebenfalls anthropogen bedingt können hohe Chloridgehalte im Sockelbereich des aufgehenden Mauerwerks von Gebäuden sein. In vielen innerstädtischen Bereichen wird im Winter Tausalz gestreut (Abb. 4). Im Winter 2006/2007 wurden nach

Zeitungsberichten beispielsweise insgesamt 1920 Tonnen Streusalz auf Dresdener Straßen ausgebracht, im Winter zuvor waren es 9400 Tonnen.



Abbildung 4: Streusalzreste auf einer Treppe in der Altstadt von Basel (Schweiz), Februar 2005 (Foto: H. Siedel)

Zu den anthropogenen Ursachen müssen weiterhin solche gerechnet werden, die mit restauratorischen Eingriffen wie Steinreinigung oder -behandlung mit Säuren (Abb. 5) oder Laugen (HOFERICK und SIEDEL, 1999), Fluatierung, Wasserglasbehandlung (ARNOLD, 1985), Ammoniumcarbonatbehandlung etc. in Zusammenhang stehen. Hierbei werden im Baustoff verbliebene Wirkstoffe neutralisiert oder bei der gewünschten Reaktion reaktive Nebenprodukte freigesetzt, die mit Luft, Regenwasser oder Baustoffbestandteilen zu Salzen reagieren können. Als Reaktionsprodukte beschrieben wurden u. a. Alkalicarbonate und -sulfate, Gips, Formiate oder Ammoniumsulfat.

Auch die spezifische Nutzung von Gebäuden kann zu Salzanreicherungen im Mauerwerk führen. Dauerhaft oder zeitweise als Speicher genutzte Gebäude weisen mitunter erhöhte Gehalte an Halit (NaCl) auf. Die Nutzung als Stallung führt zu Nitratbelastung. Aborte oder deren Abfuhrkanäle erzeugen Nitrat- und Chloridbelastungen.

Gelöste Stoffe aus dem Baugrund können aus dem Grundwasser oder allgemein mit aufsteigender Feuchte in das Mauerwerk von Gebäuden transportiert werden. Die mit dem Wasser transportierten, löslichen bauschädlichen Salze sind durch die oben beschriebenen Depositionsvorgänge aus Luft und Regenwasser in den Boden gelangt oder durch biologische und chemische Vorgänge dort entstanden. Oft sind ihre Konzentrationen im Baugrund primär gering. Durch permanenten Aufstieg von Feuchtigkeit ins Mauerwerk und die Verdunstung des Wassers können sie aber zu beträchtlichen, schädlichen Konzentrationen in den Baustoffen angereichert werden. Immer wieder erwähnt werden hohe Nitratkonzentrationen im Mauerwerk von Kirchengebäuden, die durch die Verwesung organischer Substanz auf angrenzenden Friedhöfen oder in Gräften unter dem Boden des Gebäudes bedingt sein könnten.



Abbildung 5: Salzausblühungen auf Sandsteinmauerwerk nach einem Reinigungsversuch mit Säure (Foto: H. Siedel)

Zu den Umwelteinflüssen ist auch die Lebenstätigkeit von Organismen wie Fledermäusen oder Vögeln zu zählen, die in offenen Türmen, Dachböden oder anderen Gebäudeteilen große Mengen Kot und Urin hinterlassen. Die daraus gelösten Stoffe sind teilweise aggressiv und führen zur Bildung von Phosphaten, Nitraten, Chloriden oder Sulfaten im angrenzenden Mauerwerk (SIEDEL et al., 2006; Abb. 6).

In Küstengebieten ist der Salzeintrag über „sea spray“, d. h. in Form von Aerosol, eine wichtige Quelle für die Salzbelastung von Bauwerken. So werden in Dänemark auf diesem Weg jährlich 2,5–5 g NaCl pro Quadratmeter Bodenfläche abgelagert, an der Westküste Jütlands sogar bis zu 20 g/m² (BØLLINGTOFT und LARSEN, 2002). Auch Flutereignisse können Salze aus dem Meerwasser in Gebäude eintragen.



Abbildung 6: Salzbildung durch lösliche Stoffe aus Fledermausexkrementen, Tempel Angkor Wat, Kambodscha (Foto: H. Siedel)

2.2 Baustoffe als Salzquellen

Baustoffe können selbst wasserlösliche Stoffe enthalten bzw. unter Umwelteinflüssen Salze bilden. Die natürlichen Gehalte löslicher Salze in Baugesteinen sind meist gering und kaum schadensrelevant. Ebenso selten können bestimmte mineralische Bestandteile von Gesteinen wie Pyrit (FeS_2) oxidiert werden und damit Quelle für die Sulfatsalzbildung sein. Häufig allerdings reagieren Kalk- oder Dolomitsteine sowie carbonatisch gebundene Sandsteine mit den schwefelsauren Bestandteilen der Luft und des Regenwassers. Neben der Bildung von Gips und Magnesiumsulfat, die den Baustoff angreifen, führen diese Reaktionen auch zu Bindemittelverlusten, die den Naturstein zusätzlich zum Salzangriff schwächen. Das Gleiche gilt sinngemäß für Kalkmörtel und besonders für dolomitische Kalk-

mörtel (SIEDEL, 2002). Selten können auch exotische Zuschlagstoffe in Mörteln Ursache für die Salzbildung sein. So wurden in einem historischen Mörtel der Bergstadt Freiberg in Sachsen Sulfiderze in den Zuschlagstoffen gefunden, die offensichtlich von Bergbauhalden stammen. Sie waren im Laufe der Zeit zu Sulfat oxidiert worden, das mit dem Kalkbindemittel zu Magnesiumsulfat und Gips reagiert hatte.

Lösliche oder sich zersetzende Komponenten in den Tonrohstoffen bzw. Kontakt mit schwefelreichen Brennstoffen während der Herstellung können zur Ausblühung von Salzen aus gebrannten Ziegeln bei Durchfeuchtung und Austrocknung führen. Die hier festgestellten Salze sind vor allem Alkali- und Erdalkalisulfate.



Abbildung 7: Salzbildung auf Postaer Elbsandstein durch trasshaltigen Fugenmörtel (Foto: H. Siedel)

Bindemittelbaustoffe wie Kalke oder Zemente in Mörteln enthalten insbesondere kurz nach der Verarbeitung Porenwässer, die hoch alkalisch reagieren. Neutralisationsreaktionen mit dem Luft- CO_2 oder mit schwefelsauren Porenlösungen im angrenzenden Naturstein führen zur Bildung von Alkalicarbonaten, Gips oder Alkalisulfaten. Das häufig auf diesem Wege aus Porenwässern von Zementmörteln gebildete Natriumsulfat gehört zu den aggressivsten bauschädlichen Salzen.

Ebenso sind (z.B. bei Neuverfugung) komplexe Reaktionen der alkalischen Lösungen mit bereits früher im Naturstein gebildeten Sulfatsalzen möglich (ARNOLD, 1985). Rheinischer Trass mit hohen Alkaligehalten als hydraulische Komponente in Kalk- oder Zementmörteln führt im Kontakt mit grobporigen Natursteinen oft zu Ausblühungen (Abb. 7) von Natriumcarbonat oder -sulfat im Kontaktbereich Fuge - Naturstein.

2.3 Bestimmung der Herkunft von Salzen am Bauwerk

Obwohl die grundsätzlich möglichen Quellen für bauschädliche Salze und die Eintragswege in Baustoffe weitgehend bekannt sind, ist die genaue Analyse der Herkunft im Einzelfall oft nicht einfach. In der Praxis behilft man sich meist mit der allgemeinen Feststellung, dass Sulfatsalze „aus der Umwelt“, Chloride „aus Streusalzen“ und Nitrate „aus dem Boden“ ins Bauwerk gelangt sind. Für manche Fälle mögen solche pauschalen Feststellungen ausreichend sein. Oft sind auch die finanziellen Mittel, die in der Praxis für naturwissenschaftliche Begleituntersuchungen von Instandsetzungsmaßnahmen zu Verfügung stehen, gering. Mitunter ist es jedoch entscheidend für die Nachhaltigkeit einer Instandsetzung, ob bzw. dass die Salzquellen „eingedämmt“ werden können. Dies kann erhebliche Konsequenzen für notwendige Folgemaßnahmen und damit Folgekosten haben. Ein gangbarer Weg, der mit einer überschaubaren Anzahl von Analysen möglich ist, ist die Feststellung der räumlichen Verteilung der Salze im Mauerwerk bzw. Objekt. Vielfach sagt die Verteilung der Nitrate, Chloride und Sulfate im Höhen- und Tiefenprofil zumindest etwas über Transportwege der salzhaltigen Lösungen und damit indirekt auch über mögliche Salzquellen aus. So gibt es typische Muster für aufsteigende Feuchtigkeit, nach denen sich die Salzarten mit unterschiedlicher Löslichkeit in verschiedenen Höhen über der Bodenkante im Mauerwerk konzentrieren (ARNOLD et al., 1989).

Eine Möglichkeit die Herkunft von Sulfatsalzen direkt zu bestimmen ist die Analyse ihres Schwefelisotopenverhältnisses $\delta^{34}\text{S}$ (KLEMM und SIEDEL, 1999). Das Verhältnis der stabilen Isotope ^{32}S und ^{34}S in Sulfaten kann Hinweise auf deren Schwefelquellen geben, weil es innerhalb gewisser Streubreiten für unterschiedliche natürliche oder anthropogene Quellen konstant ist, sich durch Transport- und Depositionsprozesse meist nur unwesentlich verändert und damit eine Art chemischen „Fingerabdruck“ für die Herkunft des Schwefels liefert. In Einzelfällen konnte das Verfahren bereits erfolgreich an Objekten angewendet werden. Es setzt allerdings eine spezielle Analytik voraus, die in der Regel nur Hochschul- oder Forschungseinrichtungen zur Verfügung steht. Weiterhin muss für die Region, in der das zu analysierende Objekt steht, ein möglichst vollständiger Datensatz von Isotopenwerten für den Umwelthintergrund (Luft, Regenwasser, Staub, Grundwasser) und die verwendeten Baustoffe vorliegen oder erstellt werden.

2.4 Offene Fragen / Forschungsbedarf

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Belastung der Umwelt mit Schadstoffen verändert. „Klassische“ Quellen für bauschädliche Salze, wie der Schwefel aus der Verbrennung fossiler Energieträger, sind heute von minderer Bedeutung als in der Vergangenheit. Das hat politisch zum Verschwinden des Themas von der Agenda der dringenden Aufgaben und zur Reduzierung der Forschungsförderung geführt. Dies bedeutet jedoch nicht, dass alle Gefahren für Kulturgüter beseitigt und alle Vorgänge, die mit ihrer Zerstörung verbunden sind, wirklich vollständig verstanden sind. So haben z.B. Untersuchungen des Zusammenhangs der SO₂-Konzentration in der Luft mit der Schwefeldeposition auf Materialoberflächen ergeben, dass die Menge des abgelagerten Schwefels nicht direkt proportional zur Konzentration des Gases ist. Eine starke Reduzierung der Luftbelastung bedeutet also nicht automatisch, dass der Eintrag von Schadstoffen in Bauwerksoberflächen gleichermaßen reduziert wird. Hier und bei der Einschätzung der zukünftigen Wirkung globaler Umweltprozesse (Anstieg der Produktion von Schadstoffen in den Schwellenländern, globale Transportmechanismen) besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Auch regionale oder lokale Schadenfaktoren wie der Stadtverkehr sind in ihrer Wirkung auf Kulturgüter noch nicht in ausreichendem Maße untersucht und verstanden.

Das Potenzial der Schwefelisotopenanalyse für die Beschreibung der Schadstoffquellen sollte für die Praxis besser nutzbar gemacht werden. Dazu ist eine Erweiterung der Datenbasis für potenzielle Schwefelquellen wie auch weitere Grundlagenforschung zur Wirkung von Transport- und Umwandlungsprozessen von Schwefel auf sein Isotopenverhältnis notwendig.

2.5 Literatur

- ARNOLD A. (1985): Moderne alkalische Baustoffe und die Probleme bei der Konservierung von Denkmälern. - *Arbeitshefte des bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege* 31, S. 152-162.
- ARNOLD A., ZEHNDER K., KÜNG A. (1989): Verwitterung und Erhaltung von Wandmalerei. Salzverwitterung - Raumklima - Konservierung. - In: Schweizer, F. & Villiger, V. (Hg.): *Methoden zur Erhaltung von Kulturgütern*, Verlag Paul Haupt, Bern und Stuttgart, S. 63-70.
- BECKER K.-H., BRÜGGERHOFF S., STEIGER M., WARSCHIED T. (2005): Luftschadstoffe und Natursteinschäden. - In: Siegesmund, S.; Auras, M. & Sneathlage, R. (Hg.): *Stein. Zerfall und Konservierung*. Leipzig, Edition, S. 36-45.
- BØLLINGTOFT P., LARSEN P.K. (2002): The use of passive climate control to prevent salt decay in Danish churches. - In: Leitner, H., Laue, S. & Siedel, H. (Hg.): *Mauersalze und Architekturoberflächen*. Hochschule für bildende Künste Dresden, S. 90-93.

- HOFERICK F., SIEDEL H. (1999): Die Ablaugung von Ölfarbanstrichen am Dresdner Zwinger – Geschichte und Folgeschäden. – *Denkmalpflege in Sachsen. - Mitteilungen des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen* 1999, 80-88.
- KLEMM W., SIEDEL H. (1999): Schwefelisotopenanalyse von bauschädlichen Sulfatsalzen an historischen Bauwerken. - *Wiss. Mitt. Institut für Geologie* 8, TU Bergakademie Freiberg, 100 S.
- KLEMM W., SIEDEL H. (2002): Evaluation of the origin of sulphate compounds in building stone by sulphur isotope ratio. - *Geological Society of London, Special Publications vol. 205*, 419-429.
- SIEDEL H. (2002): Dolomitkalkmörtel und Salzbildung an historischer Bausubstanz. - In: Leitner H., Laue S., Siedel H. (Hg.): *Mauersalze und Architekturoberflächen*. Hochschule für bildende Künste Dresden, S. 57-64.
- SIEDEL H., v. PLEHWE-LEISEN E., LEISEN H. (2006): Salzbelastung und Steinschäden am Tempel Angkor Wat, Kambodscha. - *Praxisorientierte Forschung in der Denkmalpflege - 10 Jahre IDK*. Beiträge der Fachtagung, Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Dresden, S. 93-108.