

Christine Bläuer Böhm

Praktische Hinweise zur Vorgehensweise bei der Untersuchung und Beurteilung von salzbelasteten Baudenkmalern

Einleitung

Denkmalobjekte sind oftmals komplexe Gebilde, die im Laufe ihres oft jahrhundertelangen Bestehens immer wieder verändert wurden. Sie sind vielfältig aufgebaut und bestehen aus den unterschiedlichsten Materialien wie Stein, Mörtel, Holz, Metall, Glas, usw. Sie altern und zerfallen durch die verschiedensten Einwirkungen aus ihrer Umgebung wie Klimaeinflüsse, Bodenbewegungen und -feuchte, Beanspruchung durch Nutzung, u.a.m. Obwohl die Salzsprengung einer der häufigsten und stärksten Schadensprozesse an Baudenkmalern aus Stein und Mörtel ist, kann es nicht genügen, diese Vorgänge, isoliert von der Umgebung, in der sie geschehen, zu betrachten. Für die Untersuchung und Konservierung ist deshalb eine gesamtheitliche Betrachtungsweise notwendig, welche alle sich überlagernden Faktoren berücksichtigt [5], deren Zusammenspiel an jedem Objekt, bedingt durch seine individuelle Geschichte und seinen speziellen materiellen Aufbau, anders sein kann.

Fragen, die mittels Untersuchungen des Salzsystems an einem Bauwerk beantwortet werden sollen, können sehr verschieden sein, die Untersuchungen müssen folglich auf den Einzelfall abgestimmt werden. Trotzdem soll hier versucht werden, die grundsätzliche Art und Weise des Herangehens an salzbelastete Objekte darzustellen. Dabei soll der Schwerpunkt auf der phänomenologischen Betrachtung von Salzsystemen liegen und die Schlüsse, die aus den Untersuchungen gezogen werden können, sollen ausführlich dargelegt werden.

Eine wichtige Feststellung sei an den Anfang dieses Textes gestellt: Untersuchungen von Denkmalobjekten sollten immer im Dialog der beteiligten Disziplinen am Objekt geschehen, denn nur wenn alle Faktoren (Salze, Biologie, Klimaverhältnisse, Nutzungsart des Objektes etc.) berücksichtigt werden, können für die Erhaltung des Objektes optimale Lösungen gefunden werden.

Der vorliegende Text lehnt sich an einen in der Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung erschienenen Artikel [18] an, manches wird daraus übernommen. Allerdings soll hier der Schwerpunkt stärker auf die Vor-Ort-Untersuchungen und auf die Interpretation gelegt werden, auf die detaillierten Beschreibungen von Labor-Analysemethoden wird hier jedoch verzichtet.

Untersuchungsablauf und Fragestellungen

Die Schritte, die eine restauratorische Untersuchung eines Objektes umfassen, werden in [41] ausführlich dargelegt. Hier werden vor allem die Probleme besprochen, die sich stellen, wenn es darum geht, an einem Objekt, bei dem bereits festgestellt wurde, daß Salze eine wichtige Rolle beim Zerfall spielen, dieses Salzsystem eingehender zu untersuchen, das heißt eine diesbezügliche Schadensanalyse zu machen.

Eine Schadens- und Salzanalyse umfaßt die folgenden Schritte:
A Erkennen des ganzen Denkmals (Architektur, Konstruktion,

Materialien) in seiner Umgebung (Lage, Baugrund, Wetterexposition) mit seiner Geschichte (Archive, Restaurierungsgeschichte),

B Feststellen der speziellen Schadenssituationen, die mit dem Salzsystem im Zusammenhang stehen (z.B. Grundfeuchte, bestimmte Wassereinträge, etc.),

C Kartierung der Schadenssituationen und Schadensformen,

D Probenahmen und Feldtests,

E Laboruntersuchungen,

F Aufarbeiten der Ergebnisse (z.B. Schadensentwicklung, Beziehungen zum Raumklima, Zusammenhänge mit alkalischen Baustoffen, etc.),

G Eventuell Labortests oder -simulationen,

H Synthese, Schlußfolgerungen (Schadensursachen, -entwicklung, Beurteilung der Gefährdung),

I Empfehlungen für die Konservierung und allenfalls Restaurierung,

K Kontrolle der Auswirkungen der Maßnahmen.

Am Anfang der Untersuchung steht die Fragestellung. Es gibt Fragen, die mit einigen Stichproben beantwortet werden können. In anderen Fällen geht es um Gesamtuntersuchungen, bei welchen die Salze eine Rolle im Zerfallsgeschehen spielen.

Die Fragen, die sich in der Regel bei Schadensanalysen in Bezug auf die Salzsysteme stellen, sind:

a Welche Salze und Ionen kommen wo vor?

b In welcher Form liegen die Salze vor (Krusten, Ausblühungen oder in Lösung)?

c Welches sind die sichtbaren oder vermutlichen Quellen für die Salze?

d Wie sind die Mechanismen des Salz(lösungs)transports?

e Verändern sich die Salzausblühungen mit dem Klima und, wenn ja, wie?

f Für welche Schäden sind die Salze (mit)verantwortlich?

g Wie entwickeln sich die Schäden?

h Welche Schäden im Zusammenhang mit Salzen sind in Zukunft (mit oder ohne Restaurierung/Konservierung) zu erwarten (Beurteilung der Gefährdung)?

i Wie können zukünftige Salzsäuren verhindert oder minimiert werden?

Eine Voraussetzung zur Beantwortung der obigen Fragen ist die richtige Vorgehensweise bei der Untersuchung des Salzsystems.

Es würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen, alle aufgelisteten Fragen in all ihren Aspekten behandeln zu wollen. Insbesondere die Fragen g bis i können nur beantwortet werden, wenn außer den Salzen zusätzliche Einflußfaktoren wie die Art der vorkommenden Baumaterialien, Konservierungsmaßnahmen, Heizung oder Nutzung des Objektes bekannt sind. Für die anderen Fragen sollen, soweit eine Verallgemeinerung möglich ist, Konzepte dargestellt werden, die die Beantwortung der gestellten Fragen ermöglichen oder doch zumindest erleichtern.

Bei den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen ist zu beachten, daß eine Schädigung des Objektes unbedingt zu vermeiden ist. Es sei an dieser Stelle an die Berufsethik erinnert, die alle auf dem Gebiet der Denkmalpflege Tätigen dazu ver-

pflichtet, die ihnen anvertrauten Objekte zu schützen, dazu gehört nicht zuletzt auch die Vermeidung unnötiger Probenahmen.

Kartierung und andere Vor-Ort-Untersuchungen

Voruntersuchung

Die Voruntersuchung dient dazu, sich einen Überblick über die Schadenssituation zu verschaffen. Das Objekt wird dabei außen und innen während eines Rundgangs (wenn nötig mit einem Feldstecher) beobachtet. Dabei können Regen- und Windfassaden, mögliche Quellen für Salze oder Feuchtigkeit wie: Zementmörtel [4], Grundfeuchtebereiche [3], Feuchte aus der Dachentwässerung [15], Blumentöpfe [15] und vieles andere mehr erkannt werden.

Dann werden die zugänglichen Bereiche nach den auftretenden Salzen, Krusten und den zugehörigen Schäden abgesucht. Für diese Untersuchungen wird eine Lampe (z. B. Taschenlampe oder Videoleuchte) benötigt, mit deren Hilfe auch die nur im Streiflicht sichtbaren Salze (z. B. einzelne Whiskers, Salzrasen) erkannt werden können.

In der Regel sollen auch Teile des Bauwerkes in diese Untersuchung miteinbezogen werden, die nicht in direktem Zusammenhang mit dem eigentlich zu untersuchenden Objekt zu stehen scheinen, wie zum Beispiel Rückseiten der Wände, Dachstock über einer Wandmalerei oder ähnliches.

Detail-Schadens- und Salzkartierung

Die Kartierung kann nicht nach einem fixen Schema vorgenommen werden. Einiges muß sehr genau, anderes nur summarisch aufgenommen werden. Detaillierungsgrad und Maßstab müssen an die Fragestellung angepaßt sein. Es gilt den Gesamtaufwand minimal, die wesentlichen Informationen jedoch genügend detailliert zu halten. Dazu sind gute Kenntnisse der Grundlagen des Dokumentierens von Denkmalobjekten [41] notwendig.

Bei der Schadenskartierung können grundsätzlich zwei verschiedene Auffassungen vertreten werden, die sich allerdings in der Praxis teilweise überschneiden. Bei der einen Vorgehensweise wird versucht, nur die Schadensphänomene ohne Interpretation ihrer Entstehungsbedingungen zu kartieren [21]. Das hat die Vorteile, daß das Resultat der Kartierung relativ unabhängig von der Erfahrung der kartierenden Person und auch bis zu einem gewissen Grad quantifizierbar (zählbar) ist [20]. Von Nachteil erscheint dabei jedoch, daß auch offensichtliche Zusammenhänge mit einer Schadensursache (z. B. Grundfeuchte, Wasserläufe) auf der Kartierung oft nicht mehr erkannt werden können.

Demgegenüber stehen die Kartierungen, bei denen versucht wird Schadenssituationen zu erfassen. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, daß Zusammenhänge sichtbar gemacht werden, und daß bestimmte Schadenssituationen sehr schnell pauschal erfaßt werden können. Da dabei schon beim Kartieren teilweise interpretiert wird, hängt das Ergebnis von der Erfahrung der untersuchenden Person ab. Beispiele zu solchen Kartierungen finden sich in [10], [11], [13], [14], [16], [17], [46], [54].

Im Anhang C werden einige Beispiele für Schadenssituationen dargestellt. Dabei geht es nicht darum, alle vorkommenden Situationen darzustellen, sondern es soll lediglich die Vielfalt

der Möglichkeiten angedeutet werden. Das Erkennen spezifischer Schadenssituationen kann helfen, langes Rätselraten über die Ursache bestimmter Schäden oder die Herkunft der beobachteten Salze zu vermeiden. Oft können auch Schäden vermieden werden, indem ein Schadenspotential erkannt und die entsprechenden Schutzmaßnahmen ergriffen werden.

Welche Salz- und Krustenformen und anderen Phänomene in der Salzschaadenskartierung festgehalten werden sollen, hängt ganz von den Gegebenheiten des Objektes ab und entscheidet sich erst während der Voruntersuchung (einige häufig auftretende Salz- und Schadensformen werden im Anhang A beschrieben). Alle kartierten Einzelphänomene und Schadenssituationen müssen möglichst genau beschrieben werden, damit die Kartierung nachvollziehbar wird und wiederholt werden kann. Erst so lassen sich der Schadensfortschritt, periodisches Ausblühen der Salze oder der Erfolg einer Restaurierungs- oder Entsalzungsmaßnahme überprüfen.

Im Verlaufe der Kartierung wird der pH-Wert der Salze und etwaiger Kondenswassertropfen geprüft (Test B2 im Anhang). Die Verbreitung der alkalischen Salze kann so direkt am Objekt beobachtet und kartiert werden. Da alkalische Salze ausschließlich im Zusammenhang mit alkalischen Baumaterialien auftreten [4], kann diese Kartierung wichtige Hinweise über den Ursprung der Salze geben. Oft gibt das Auftreten alkalischer Salze überhaupt erst den Anstoß, nach Beton oder Wasserglasanwendungen zu suchen und damit eine Erklärung für bestimmte Schäden zu finden.

Weiter kann die Fähigkeit der Salze zur Abgabe von Kristallwasser geprüft werden (Test B3 im Anhang). Mit diesen beiden Tests können bereits vor Ort die beiden Salzminerale Natrit ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) und Mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) festgestellt werden. Natrit ist das einzige bisher bekannte Ausblühungssalz, das sowohl alkalisch ist, als auch bereits bei leichter Erwärmung im eigenen Kristallwasser gelöst wird, so daß ein Tropfen entsteht; demgegenüber ist Mirabilit das einzige häufig auftretende nicht alkalische Ausblühungssalz, das sich bei leichtem Erwärmen im eigenen Kristallwasser löst.

Es kann auch nützlich sein mittels Teststäbchen oder mikrochemischen Methoden [18] bereits vor Ort Tests auf Chlorid, Nitrat und Sulfat zu machen.

Durch diese Vor-Ort-Tests für bestimmte Salze oder Ionen kann oftmals die Anzahl der im Labor zu untersuchenden Proben verringert werden, ohne daß dadurch die Aussagekraft der Resultate leidet.

Manchmal ist die Unterscheidung zwischen Salzen und biogenem Bewuchs nicht mit bloßem Auge möglich. Im Unterschied zu Bewuchs sind die meisten Salze aber gut wasserlöslich, respektive im Gegensatz zu den Salzen ist der Bewuchs brennbar (Tests B4 und B5 im Anhang). Zudem läßt sich Bewuchs nicht abpinseln, klebt zusammen, haftet aber auf der Unterlage.

Da Salze die Fähigkeit haben je nach Umgebungsbedingungen auszublühen oder wieder in Lösung zu gehen, müssen die Salze regelmäßig auf ihre diesbezügliche Aktivität hin beobachtet werden [11]. Es hat sich bewährt, zu diesem Zweck Referenzflächen zu bestimmen, die in regelmäßigen Abständen (z. B. monatlich, beim Auswechseln des Blatts im Thermohygrographen o. ä.) auf Veränderungen hin untersucht werden. Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, daß es sinnvoller ist, die Beobachtung in relativ stur eingehaltenen Zeitabständen vorzunehmen, als zu versuchen, Tage mit einem spezifischen Klima auszuwählen. Dies trifft ganz besonders auf Salzreferenzflächen

im Außenbereich zu, wo Trocken- oder Naßperioden oft sehr schwer voraussehbar sind, es scheint sich aber ebenso in Innenräumen zu bestätigen. Der Hauptvorteil der Beobachtung des Ausblühungsgeschehens am Objekt selber liegt darin, daß die Aktivitäten nicht theoretisch vermutet werden müssen, sondern ganz konkret erkannt werden können. Wird gleichzeitig eine Klimauntersuchung vorgenommen, was die Regel sein sollte, so kann davon ausgegangen werden, daß bei zukünftigen gleichen Klimaabfolgen auch gleiche Ausblühungsmechanismen auftreten werden. Das heißt, solche Untersuchungen helfen unter anderem auch bei der Beurteilung der Gefährdung des Objektes.

Probenahme

Ob Proben entnommen werden sollen und wenn ja, wo und zur Beantwortung welcher Fragestellungen, entscheidet sich meistens während der Schadenskartierung.

Jede Probenahme ist ein Eingriff in das Objekt. Im Regelfall sollte sie durch Restaurator(inn)en geschehen. An unbedeutenden Objektteilen kann eine Probenahme, nach Absprache mit den Objektverantwortlichen, ausnahmsweise auch durch Naturwissenschaftler(innen) vorgenommen werden. Es wirkt sich allerdings immer positiv auf den Erkenntnisgewinn aus, wenn die Person, die die Probe untersucht, auch bei der Probenahme dabei ist.

Probenahmen ohne angemessene Dokumentation sind wenig effizient. Zur Dokumentation für jede Salzprobe gehört insbesondere, wenn sie zur Analyse eingeschickt wird:

- Probenehmer(in), (wichtig für Nachfragen),
- Zeitpunkt der Probenahme (Datum, Uhrzeit),
- Witterungsbedingungen,
- genaue Probenahmestelle; Plan, Skizze, Photo,
- Beschreibung des Substrats,
- Beschreibung der Probe,
- spezielle Fragestellung,
- weitere für die Untersuchung und Interpretation wichtige Einzelheiten.

Entnahme reiner Salzproben

Die Anzahl der Proben richtet sich in jedem Fall nach den gestellten Fragen. Da aber chemisch und/oder mineralogisch verschiedene Salze in der genau gleichen Gestalt (Habitus), beziehungsweise gleiche Salze in unterschiedlicher Gestalt ausblühen können, empfiehlt es sich, von jeder Ausblühungs- oder Krustenform mehrere Proben zur gegenseitigen Bestätigung (oder Falsifizierung) zu entnehmen.

Reine Salzproben sind viel einfacher und eindeutiger zu analysieren als Salzmischungen oder verschmutzte Proben. Dazu werden nur gerade die Salze selbst ohne ihren Untergrund entnommen, es genügen einige Körnchen (wenige mm³), so daß diese Probenahme dem Objekt normalerweise nicht schadet.

Manchmal treten an dichten Oberflächen auch Lösungströpfchen aus hygroskopischen Salzen auf, die mit kleinen Plastiktüten abgenommen und in die Untersuchung miteinbezogen werden können.

Der Zeitpunkt der Probenahme ist so zu wählen, daß die Proben unmittelbar anschließend mikroskopisch untersucht werden können, denn je nach Zustand der Salze können diese sich sehr bald nach dem Ablösen von ihrem Substrat verändern (z. B. Kri-

stallwasser verlieren), selbst wasserfreie Salze wie zum Beispiel Kochsalz (= Halit = NaCl) können nach der Entnahme ihre Form verändern.

Als Probengefäße eignen sich kleine, möglichst wasserdampfdicht verschließbare Plastiktüten, Röhrchen oder Schächtelchen. Gelatine kapseln sind dagegen nicht für die Aufbewahrung von Salzproben geeignet, da durch sie Feuchtigkeit entweichen oder eindringen kann und die Salze an ihnen festkleben können.

Für den Transport vom Objekt ins Labor müssen die Proben in einem gekühlten oder zumindest wärmeisolierten Behälter aufbewahrt werden. Wenn die Proben nicht unmittelbar anschließend untersucht werden können, müssen sie im Kühlschrank aufbewahrt werden. Weiter sollte darauf geachtet werden, daß die Proben nicht zerdrückt werden, damit die ursprüngliche Gestalt der Ausblühung erhalten bleibt.

Salzhaltige Materialien und Lösungen (inklusive Bohrkern und Entsalzungsproben)

Ausblühungssalze und Krusten spiegeln in gewisser Weise den Salzgehalt des Substrats wider. Im Substrat können sich Salze aus der Umgebung (Boden, Mauer, Luft etc.) angereichert haben, oder die Salze wurden zusammen mit dem betreffenden Material eingeschleppt. Allerdings bedeuten zum Beispiel hohe Sulfatanteile in den Ausblühungen noch nicht, daß auch das darunterliegende Mauerwerk bis in große Tiefen hinein hohe Sulfatgehalte aufweist, und ebensowenig bedeutet das Fehlen bestimmter Salze an der Oberfläche, daß diese Salze oder ihre Ionen nicht in erhöhter Konzentration im Mauerinnern vorkommen.

In den meisten Fällen genügt es zur Beantwortung der gestellten Fragen zum Salzgehalt des Substrats bereits, Salzgehalte in Entsalzungskompressen zu bestimmen oder kleine Materialproben von Ergänzungs-mörteln oder an Fehlstellen zu entnehmen und zu analysieren.

In seltenen Fällen ist eine Bohrkernentnahme, zur Bestimmung der Ionengehalte im Tiefenprofil, angezeigt. Es würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, das Thema „Bohrkernentnahme“ in all seinen Aspekten diskutieren zu wollen, deshalb sollen im folgenden nur einige wichtige Punkte angetippt werden.

Kerne dürfen, insbesondere bei Wandmalereien, höchstens in Flickstellen gebohrt werden, das heißt, es gibt keine denkmalpflegerische Indikation für Bohrungen in originalen Bereichen. Es muß zudem beachtet werden, daß auch unter Fehlstellen der Malerei meistens das originale Mauerwerk liegt, so daß auch hier der zu erwartende Schaden oder Nutzen bestmöglich abgeschätzt werden muß. Bevor eine Bohrkernentnahme überhaupt erwogen wird, müssen zuerst die oberflächlich erkennbaren Salzaktivitäten in all ihren Aspekten (Art und Zusammensetzung der Salze; Verhalten der Salze bezogen auf das angetroffene Klima; Art der durch die Salze verursachten Schäden usw.) bekannt sein. Erst wenn nach der sorgfältigen Abschätzung aller Gegebenheiten noch Fragen offen bleiben, die sich nur durch Tiefenprofile der Salze beantworten lassen, dürfen Kerne entnommen werden. Solche Fragestellungen können manchmal Fragen nach der Art sein wie und ob entsalzt werden soll, wobei hierbei manchmal aus einer Probeentsalzung genausoviel oder mehr Information zu erhalten ist. Ein besonders krasses Beispiel für überflüssige Bohrkernentnahmen wird im Anhang D dargestellt.

Wenn Bohrkern entnommen werden, dann handelt es sich dabei um vergleichsweise kostbare Proben, die auch entsprechend behandelt werden müssen. Die Kerne sollten orientiert (Markierung für oben / unten) und trocken gebohrt werden, damit zum Beispiel Dünnschliffe auch orientiert hergestellt werden können, was ihre Interpretation in der Regel sehr erleichtert.

Manchmal ist, insbesondere an Steinbauten, eine Bohrkernentnahme zur Ermittlung von statischen Kennwerten nötig [17], wenn diese Kerne trocken erbohrt werden, können an ihnen oder an kleinen Proben aus den entstandenen Bohrlöchern auch die Salztiefenprofile ermittelt werden. Es gibt noch viele weitere Gründe, warum an Objekten Löcher angebracht werden müssen, und sei es nur zum Anbringen von Dübeln, Leitungen oder ähnlichem. Wenn solche Eingriffe an, von den Salzschäden her gesehen, interessanten Stellen geschehen, kann das ausgebaute Material (z.B. Bohrkern, Ausspitzmaterial), unter der Voraussetzung, daß der Eingriff ohne Wasserzufuhr geschieht, für die Salzanalyse verwendet werden.

Aus den trocken gebohrten Kernen werden in verschiedenen Tiefen Proben entnommen und dazu Wasserauszüge hergestellt, in denen die Gehalte an Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- und Cl^- analysiert werden, nur die Anionen zu bestimmen ist nicht sinnvoll (siehe Abschnitt Technisch: aufwendige Untersuchungsmethoden ...).

Laboruntersuchungen

Bei der Laboruntersuchung von Salzausblühungs- und -krustenproben können die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Habitus (äußere Gestalt) der Salze,
 - vorkommende Salzminerale,
 - Zusammenhang der Salze untereinander (Paragenese),
 - chemische Zusammensetzung der Probe / Auftretende Ionen.
- In den meisten Fällen genügen zur Beantwortung der gestellten Fragen die nachstehenden qualitativen bis halbquantitativen Analysen:

- makroskopische Beschreibung,
- polarisationsmikroskopische Analyse,
- mikrochemische Untersuchung.

In Ausnahmefällen können weitere, technisch aufwendigere Methoden, wie IR-Spektroskopie, Röntgenbeugung oder Elektronenmikroskopie angewandt werden.

Im folgenden werden die mit Hilfe der einzelnen Untersuchungsmethoden zu ermittelnden Kennwerte und Beobachtungen kurz zusammengestellt. Detaillierte Angaben zum mikroskopischen und mikrochemischen Analysegang finden sich in [18]. Die Schlüsse, welche aus den verschiedenen Beobachtungen gezogen werden können, werden dann im anschließenden Abschnitt: Interpretation und Kombination... erläutert.

Makroskopische Beschreibung

Hierbei wird die Art der Probe (z.B. Kruste, Ausblühung, Mischform), der Habitus und die Größe der einzelnen Salze oder Krustenpartikel (z.B. nadelförmig, zuckerkörnig, pulverig, „Blumenkohl“), die Farbe (z.B. glasklar, milchig weiß, schwarz) und so weiter beschrieben.

Oftmals wird hier bereits eine Binokularlupe (Vergrößerungen bis etwa 40fach) verwendet. Hier geht es unter anderem auch darum, Veränderungen, die seit der Probeentnahme am Ob-

jekt statt gefunden haben können, festzuhalten. Es kann vorkommen, daß Proben am Objekt als kristallklare Partikel entnommen werden, und daß sie trotz aller Vorsicht beim Transport (Kühlung) ins Labor entwässern, so daß dort nur noch ein weißes Pulver festgestellt wird. Es sei hier noch einmal festgehalten, daß es für die richtige Interpretation wichtig ist, möglichst viele Beobachtungen bereits am Objekt selber festzuhalten.

Polarisationsmikroskopische Untersuchungen

Das Salz wird soweit möglich von Verunreinigungen (z.B. Mörtelteilchen, Sandkörnern etc.) getrennt und für die polarisationsmikroskopische Untersuchung in ein Öl von bekannter Lichtbrechung (z.B. Zeiss-Mikroskopieröl) eingebettet. Der ausführliche mikroskopische Analysegang wird in [18] beschrieben.

Einige der häufigsten Salze lassen sich wegen ihrer charakteristischen optischen Eigenschaften schon mit geringem Aufwand voneinander unterscheiden. Ihre eindeutige Bestimmung muß aber immer mikrochemisch abgesichert werden.

Bei der mikroskopischen Betrachtung der Präparate gilt es, sich zuerst einen Überblick über die Probe zu verschaffen. Dabei wird vorerst festgehalten, ob die Probe aus einer oder aus mehreren Salzphasen zusammengesetzt ist. Manchmal kann aus der Art, wie die Salze miteinander verwachsen sind auch darauf geschlossen werden, in welcher Reihenfolge sie kristallisiert sind. So wurde eine Kruste von St. Maria im Kapitol in Köln zu etwa 80 % aus idiomorphen Halitwürfelchen (NaCl) aufgebaut, und in den Zwischenräumen fanden sich Nitronatrikristalle (NaNO_3), die, aus ihrer Form und Lage innerhalb der Kruste zu schließen, eindeutig später, also nach dem Halit, gewachsen waren. Solche Beobachtungen können wichtig werden, wenn es abzuschätzen gilt, wie sich ein Salzsystem in Zukunft verhalten wird.

Mikrochemische Untersuchung

Die detaillierte Anleitung zur mikrochemischen Analyse wird in [18] gegeben.

Da bei der qualitativen mikrochemischen Untersuchung im wesentlichen die Anwesenheit von Ionen im Wasserauszug nachgewiesen wird, muß diese, im Gegensatz zu den mikroskopischen Untersuchungen, nicht unbedingt sofort nach der Probenahme durchgeführt werden, denn die Art der vorhandenen Ionen kann sich unter den gegebenen Bedingungen kaum verändern. Trotzdem empfiehlt es sich, die Proben so rasch wie möglich zu untersuchen oder zumindest im Kühlschrank aufzubewahren, um zu vermeiden, daß sich leichter lösliche Salze zu schwerer löslichen umwandeln.

Grundsätzlich gibt es drei Arten von Testmaterialien, die mittels mikrochemischer Methoden untersucht werden können:

- reine Salzphasen (Salzminerale),
- Salzgemische - wenn eine Trennung der verschiedenen Salze nicht möglich ist,
- Wasserauszüge aus salzhaltigen Materialproben.

Die Testmethoden sind, mit geringen Abweichungen, für alle drei Fälle die gleichen, die Aussagekraft der Resultate variiert jedoch. Bei den mikrochemischen Methoden werden Ionen in wässriger Lösung nachgewiesen. Voraussetzung für den Nach-

weis ist also, daß die Ionen überhaupt in Lösung gebracht werden können. Bereits bei diesem Vorgang können chemische Reaktionen ablaufen [18], die die Resultate der Untersuchung verfälschen.

Weitere einfache Untersuchungen

Wenn ein zuvor auf der Heizplatte eingedampfter Salzlösungstropfen im normalen Raumklima (in unseren Breiten meist um 50 % rel. Feuchte) bereits Feuchtigkeit aufzusaugen beginnt (sichtbar unter dem Mikroskop am allmählichen Flüssigwerden des zuvor eingetrockneten Tropfenrandes), bedeutet dies, daß es sich um eine sehr hygroskopische Salzmischung handeln muß. Wurde die Probenlösung aus dem Wasserauszug aus einer Mörtel oder Steinprobe gewonnen, und waren an der Probenahmestelle auch keine Salzausblühungen zu beobachten, so bedeutet dies, daß die in der Mörtelprobe gefundenen Salze nur unter sehr trockenen Bedingungen ausblühen werden. Es kann jedoch vorkommen, daß auch aus hygroskopischen Salzmischungen Salze ausblühen. So konnte zum Beispiel in einer von uns untersuchten Salzkruste mikroskopisch einzig Halit (NaCl) beobachtet werden und die Kruste war nicht hygroskopisch. Nachdem die gleiche Probe jedoch gelöst worden war, war der eingetrocknete Lösungstropfen hygroskopisch und es wurde neben Natrium und Chlorid auch noch Nitrat festgestellt.

Vor Ort angetroffene Lösungstropfen hygroskopischer Salze können ebenfalls mit mikrochemischen Untersuchungsmethoden [18] analysiert werden.

Technisch aufwendigere Untersuchungsmethoden für Salzsyste-me und einige Bemerkungen zur quantitativen Salzanalyse

Die meisten Salze können mit der kombinierten mikroskopisch-mikrochemischen Methode, einschließlich ihres Habitus, ihrer Form und Aggregate bestimmt werden [18]. Manche Proben erfordern zu ihrer vollständigen Analyse weitere, aufwendigere Methoden.

Röntgendiffraktion (XRD)

Wegen der in der Regel sehr geringen Probenmengen braucht es speziell eingerichtete Röntgengeräte. Zudem können manche wasserhaltigen Salze beim Vorbereiten der Probe oder beim Röntgen selber ihr Kristallwasser verlieren, es braucht also gewisse Vorsichtsmaßnahmen (zum Beispiel einschmelzen der Proben in Röhrchen aus Lindemann-Glas). Da viele Salze sehr viele Reflexlinien zeigen, sind der Interpretation von Röntgen-diagrammen insbesondere von Salzgemischen Grenzen gesetzt. Zusätzlich gibt es Salze, die kryptokristallin und dadurch fast röntgenamorph auftreten (zum Beispiel Hydromagnesit = $Mg_5[OH(CO_3)_2]_2 \cdot 4H_2O$).

Infrarotspektroskopie (IR)

Manche Salze lassen sich mittels IR-Spektroskopie sehr gut analysieren, auch hier sind aber der Analyse von Salzgemischen Grenzen gesetzt (mündliche Mitteilung E. Jägers). Da hierbei jedoch prinzipiell Molekülschwingungen gemessen wer-

den, können auch röntgenamorphe Materialien nachgewiesen werden.

Raster-Elektronen-Mikroskop (REM)

REM-Untersuchungen von Salzen bringen analytisch meist keine zusätzlichen Informationen. Bereits bekannte Salze können allerdings mit Hilfe von REM-Beobachtungen auf den Ort ihrer Kristallisation, zum Beispiel im Porenraum, hin untersucht werden. [49] Dabei ist jedoch zu beachten, daß manche Salze im Vakuum ihr Kristallwasser verlieren und so ihren Habitus verändern können. [45]

Wenn das REM mit einer elektronendispersiven Röntgenanalyse (EDX) ausgerüstet ist, können die damit gemessenen Elemente zusätzliche Indizien liefern. Leichte chemische Elemente (leichter als Natrium) lassen sich jedoch nur mit speziellen EDX-Detektoren analysieren, was insbesondere dann zu beachten ist, wenn Nitrate oder Karbonate nachgewiesen werden sollen.

Keine der drei Methoden (XRD, IR und REM mit EDX) eignet sich als Routine-Untersuchungsmethode für Salze, da sie bei den oft anfallenden relativ großen Probenmengen (siehe z.B. [17]) zu teuer sind. Die Methoden können jedoch ergänzende Informationen bei Problemfällen liefern.

Quantitative Salzanalyse

Diese Problematik soll hier nur kurz angeschnitten werden, denn eine umfassende Diskussion aller Aspekte würde den gesetzten Rahmen sprengen.

Zur quantitativen Bestimmung von Salzgehalten in Baumaterialien gibt es nur die Analyse der einzelnen Ionen im Wasserauszug, da die Salzgehalte für einen quantitativen Nachweis mittels Röntgendiffraktometrie in der Regel zu gering sind (Nachweisgrenze für Gips = $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ etwa 1 Gew.-%) und viele Salzphasen in Materialgemischen nicht mit Sicherheit erkannt werden können. Das größte Problem bei der quantitativen Analyse stellt damit die Herstellung der Wasserauszüge dar, denn die Salze können miteinander Fällungsreaktionen eingehen [2], manche Salze sind zu gering löslich um quantitativ in Lösung zu gehen, die Korngröße der zerkleinerten Probe spielt eine wichtige Rolle [15] und heterogene Salzverteilung in den untersuchten Proben kann zu einer Verfälschung der Resultate führen [32], um nur einige Punkte zu nennen. Anleitungen zur Herstellung von Wasserauszügen aus Baumaterialien werden in [15] oder [51] gegeben.

Die Analyse des einmal erstellten Wasserauszugs stellt kein Problem mehr dar. Sie kann zum Beispiel mittels Ionenchromatografie, Atomabsorptionsspektroskopie oder/und auch photometrisch, also mit den üblichen Wasseranalysemethoden, erfolgen.

Es ist eine verbreitete Unsitte, nur die Anionen in Wasseraus-zügen aus Bohrkernen zu bestimmen. Meist wird dies damit „begründet“, daß die Anionen darüber entscheiden würden wie sich ein Salz verhalte. Diese Aussage ist aber, wie sich anhand eines Beispiels leicht zeigen läßt, falsch. Ist zum Beispiel Chlorid in Form von Calciumchlorid vorhanden, so handelt es sich dabei um ein sehr hygroskopisches Salz mit einer Gleichgewichtsfeuchte von 30,8 % bei 20 °C (gilt für Antarcit = $CaCl_2 \cdot 6H_2O$), besteht es jedoch aus Natriumchlorid beträgt seine Gleichgewichtsfeuchte 75,5 % bei 20 °C (Angaben nach [9]).

Festhalten der Resultate

Im Untersuchungsbericht sollte immer angegeben werden, mit welcher Methode die Salze untersucht wurden. Weiter sollte bei den mikrochemischen Tests angegeben werden, auf welche Ionen hin geprüft wurde, damit die Analysen nachvollziehbar sind. Die Resultate der mikroskopischen und der mikrochemischen Untersuchungen müssen so festgehalten werden, daß daraus deutlich hervorgeht, welche Salze als Mineralphasen, also in fester respektive ausgeblühter Form beobachtet wurden. Wenn dagegen nur Ionen bestimmt wurden, dürfen als Schlußresultate der Untersuchung auch nur die Ionen angegeben werden. Diese Ionen sollen also nicht zu Salzen kombiniert werden. Wenn in einer Probe mikrochemisch zum Beispiel Na^+ und SO_4^{2-} nachgewiesen wurden, wird dies auch so, als Ionen oder als Natrium und Sulfat festgehalten, und niemals als Thenardit (Na_2SO_4) oder Mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), sofern diese Salzminerale nicht auch mikroskopisch oder röntgenographisch nachgewiesen wurden.

Interpretation und Kombination der Ergebnisse

Es gibt Fragestellungen, die sich direkt aus den Resultaten der Analysen beantworten lassen. Andere Befunde lassen sich nur teilweise oder (noch) nicht erklären. Deshalb können hier im folgenden nur einige Ratschläge für die Interpretation gegeben werden.

Insbesondere die bei der Kartierung beobachteten Fakten sind sehr vielschichtig und lassen sich nicht isoliert für die Salze darstellen. Beispiele für vor-Ort-Befunde an Salzsystemen und ihre Interpretation finden sich in [8], [10], [11], [15], [16], [17], [20], [27], [28], [29], [36], [42], [51], [54].

Auch die unter C im Anhang aufgeführten Beispiele können zeigen, welche Schlüsse aus Kartierungen in Kombination mit Salzanalysen gezogen werden können. Dabei wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, sondern einige Schadenssituationen aus dem Außenbereich werden beispielhaft durchdiskutiert.

Art und Zusammensetzung der Salze

In manchen Fällen läßt der Chemismus der Salze mehr oder weniger eindeutige Schlüsse auf die Salzquelle zu, diese werden im folgenden dargestellt.

Das Auftreten alkalischer Salze läßt mit Sicherheit auf früher einmal verwendete alkalische Baumaterialien, wie Zement oder Wasserglas, schließen [4]. Das Fehlen alkalischer Salze bedeutet aber nicht, daß an dem Objekt keine solchen Baumaterialien verwendet wurden, denn innerhalb eines Baumaterials können chemische Reaktionen zwischen den alkalischen und den anderen in ihm enthaltenen Salzen ablaufen [2]. Deshalb sollte, vor allem bei Anwesenheit von Alkalisulfaten, immer auch damit gerechnet werden, daß alkalische Baumaterialien als Salzquelle in Frage kommen.

Wenn viele Calcium- oder/und Magnesiumkarbonate festgestellt werden, und insbesondere wenn Sinterkrusten oder Tropfsteine vorgefunden werden, ist ebenfalls eine frühere Wasserglas- oder Beton-/Zement-Anwendung zu vermuten.

Nitratsalze sind immer biogen entstanden. Entweder gelangten sie durch die Infiltration von Grundfeuchte an ihren Aus-

blühungsort, oder sie befinden sich im Bereich von Abwässern (Ställe, Simse mit Vogelkot oder Blumentöpfen, lecke Kanalisation), oder die Nitratsalze entstehen an Ort und Stelle durch Ammonium-nitrifizierende Bakterien.

Größere Mengen von Alkalichloriden deuten daraufhin, daß das Objekt zum Beispiel zu früheren Zeiten als Salzlager gedient hat, daß ein Salzbergwerk oder das Meer in der Nähe ist oder war [45], oder sie weisen auf einen besonders hohen Streusalzeinfluß [17] hin. In der „normalen“ Grundfeuchte sind die Chloride dagegen meist als sehr hygroskopische Kalksalze in den obersten Bereichen des Grundfeuchteaufstiegs vorzufinden. [3]

Daß Gips in großen Mengen auf Wandoberflächen in Innenräumen vorkommt, hat oft einen speziellen Grund, wie zum Beispiel Heizungsabgase oder die Verwendung gipshaltiger Materialien (Gipsgrundierungen, gipshaltige Mörtel). Die trockene Schwefeldeposition aus der Luftverschmutzung beträgt in Innenräumen oft nur einen Bruchteil dessen was an Außenwänden abgelagert wird (in der Kathedrale von Lausanne beträgt die Schwefeldeposition im Innern nur einen Achzigstel der Deposition an der Außenfassade [25]; laut mündlicher Mitteilung von A. Arnold ist jedoch die Gipsdeposition in Innenräumen anderer Objekte deutlich höher). Die oberflächliche Gipsanreicherung dürfte aber auch abhängig vom Substrat sein, so beobachtet Zehnder [52] einen Zusammenhang von Gipsschleiern mit dem Vorhandensein von hygroskopischen Mauer- und Putzsalzen. Es zeigt sich, daß die Entstehung von Gipsausblühungen und -krusten in Innenräumen ein Problem ist, das noch viele Fragen aufwirft und auf keinen Fall als gelöst gelten kann.

Die trockene Schwefeldeposition aus der Luftverschmutzung kann dagegen als Hauptquelle für dunkle Gipskrusten im Außenbereich angesehen werden. Messungen von Schwefeldepositionsraten [24] und in den Krusten enthaltene, kugelige Flugstaubpartikel [12], die diesen Krusten die dunkle Farbe verleihen, sind ein Indiz für die Richtigkeit dieser These. Wieweit Mikroorganismen an der Bildung dieser Krusten beteiligt sind, bleibt noch abzuklären. Die Interpretation der in solchen Krusten auftretenden kugeligen Gebilde als versteinerte Mikroorganismen [23] erscheint jedoch wenig glaubwürdig.

Magnesiumsulfate kommen besonders oft auf Materialien vor, die selber Magnesium enthalten. So gehören Magnesiumsulfate zum Beispiel auf Berner Sandsteinen (bis 8 % Dolomit enthaltend) zu den häufig anzutreffenden Salzen. [15]

Erdalkalinitratsalze und -chloride sind in unseren Breiten kaum je als Ausblühungen anzutreffen, denn sie bilden sehr hygroskopische bis deliquescente (zerfließende) Salze, die nur bei sehr tiefen Luftfeuchtigkeiten kristallisieren können. Diese Salze befinden sich mit anderen Worten meistens innerhalb des Baumaterials in Lösung.

Salzverteilung am Objekt

Wo, worauf und in welcher Form das Salz wächst, kann Hinweise geben auf spezielle Umweltbedingungen, Herkunft, Kristallisationsbedingungen oder andere Schadenszusammenhänge; zum Beispiel Kapillarkondensation in Rissen, Umwandlung der Salzphasen mit Beteiligung von Mikroorganismen, Nähe alkalischer Baumaterialien, Infiltration von Salzlösungen aus benachbarten Materialien etc.

In manchen Fällen lassen sich auch Schlüsse aus der Form der mit Ausblühungen und/oder Krusten bedeckten Fläche ziehen

(Salzausblühungen, die durch mehr oder weniger punktuelle Wassereinträge entstanden sind, breiten sich zum Beispiel manchmal über einen mehr oder weniger runden Fleck aus), deshalb sollte, wenn immer möglich, die untersuchte Wand auch von der Rückseite her betrachtet und potentielle Feuchtigkeitsquellen festgehalten werden. Nicht weiter erläutert werden muß hier die typische Schadens- und Salzverteilung im Grundfeuchtebereich [3].

Aggregat und Habitus

Der Habitus der Salze gibt Aufschluß über die Wachstumsbedingungen (Raumklima, Durchfeuchtung des Substrats) am Ort der Kristallisation [10]. Die genaue Beschreibung der einzelnen hier diskutierten Salzformen findet sich unter A im Anhang.

Einzelne Whiskers, Salzrasen und Salzfläume wachsen auf fast trockenen Untergründen.

Faserkrusten (= Whiskerkrusten) entstehen in der Regel auf einem gut durchfeuchteten Substrat [53].

Zuckerkörnige Krusten bilden sich innerhalb eines Feuchtigkeitsfilms [53]. Diese Krusten kristallisieren direkt aus einer an die betreffende Stelle gelangten Salzlösung. Oder sie können auch Rekristallite einer Salzausblühung sein, die bei einer entsprechenden Feuchtigkeitszunahme in der umgebenden Luft, Wasser hygroskopisch aufnahm und in Lösung ging und anschließend durch erneuten Klimawechsel, diesmal zu trockeneren Verhältnissen hin, wieder aus der Lösung auskristallisiert.

Dicke Seidenglanzkrusten aus Gips scheinen erst durch mehrmaliges Umkristallisieren und über längere Zeiträume hinweg zu entstehen [45].

Blumenkohlrusten entstehen bevorzugt an kleinen Fehlstellen (Rissen oder ähnlichem) auf der sonst relativ dichten Putzoberfläche [16], [45].

Pulverige Ausblühungen entstehen je nach Salzart unterschiedlich. Einige Salze, insbesondere die etwas schwerer löslichen, welche dann schleierartig dicht auftreten, können von Anfang an in dieser sehr feinkristallinen Form ausblühen (dies ist manchmal bei Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) der Fall) [52].

Bei anderen Salzen (zum Beispiel bei Natriumsulfat) ist diese Form dagegen meist ein Zeichen dafür, daß es sich um ein Entwässerungsprodukt der ehemals wasserhaltigen Salzform handelt. Solche Entwässerungsprodukte lassen sich oft wie Asche wegblasen.

Einige Hinweise zur Korrelation der Ergebnisse mit Klimamessungen

Die gefundenen Salzarten geben bis zu einem gewissen Grad Auskunft über das herrschende Klima. Salzphasen mit tiefen Gleichgewichtsfeuchten werden erst bei trockenen klimatischen Verhältnissen, solche mit hohen Gleichgewichtsfeuchten jedoch schon bei feuchten Verhältnissen ausblühen [6], [9], [11]. Dabei ist zu beachten, daß die Gleichgewichtsfeuchten ausschließlich für reine Salze (und auch da nicht für alle) bekannt sind [10], und daß sich dagegen Salzmischungen, wie sie üblicherweise an Objekten auftreten, deutlich anders verhalten können als reine Salze [11], [35].

Wenn die Salzausblühungen vor Ort als klare, durchsichtige Kristalle entnommen wurden, bei der mikroskopischen Untersuchung aber nur feinkörnige, submikroskopische Gemenge be-

obachtet werden, dann muß davon ausgegangen werden, daß die Salze zwischen Entnahme und Untersuchung ihr Kristallwasser verloren haben.

Wenn an einem Objekt beobachtet werden kann, daß die Salze in Abhängigkeit zum Umgebungsklima ausblühen und wieder in Lösung gehen, kann aus der Frequenz dieser Vorgänge, falls die Umgebungsbedingungen unverändert bleiben, auf den zu erwartenden Schadensfortschritt geschlossen werden, respektive es können daraus wichtige Schlüsse für die Sanierung der Situation abgeleitet werden (Beispiele in [11], [54]). Voraussetzung dazu sind periodische Beobachtung der Salzausblühungen und parallel dazu, kontinuierliche Klimamessungen. Durch regelmäßige Beobachtung können auch Alterungsformen und Entwässerungsstrukturen der Salze erkannt werden.

Zusammenfassung und Schluß

Mit der vorliegenden Arbeit wurde versucht aufzuzeigen, welche Schlüsse aus technisch einfachen Untersuchungen von Salzsystemen am Objekt und im Labor gezogen werden können und wie diese Resultate kombiniert und korreliert werden können. Dabei wurde der Schwerpunkt bewußt auf technisch einfache Untersuchungsmethoden gelegt. Diese Methoden haben den Vorteil, daß sie für alle am Objekt Beteiligten weitgehend nachvollziehbar und dadurch transparent sind. Von Nachteil ist, daß bei beobachtenden Methoden (z.B. Kartierung) und bei qualitativen Laboranalysen meist keine (vermeintlich) unumstößlichen Zahlen herauskommen, das heißt, die beobachteten Phänomene sind nicht quantifizierbar und die Qualität der Resultate hängt von der Erfahrung der untersuchenden Person ab. Dieser Nachteil wird aber durch eine Betrachtungsweise aufgewogen, welche dem Objekt als Ganzes gerecht zu werden versucht.

Anhang

A Beschreibung einiger Salz- und Schadensformen

(nach [7], [11], [16], [54]. In diesen Publikationen sind auch einige Vergleichsbilder zu finden)

Es geht hier nicht darum, ein normiertes Vokabular zu geben, denn je nach Objekt müssen andere Formen unterschieden und individuell beschrieben werden. Es sollen vielmehr einige Beispiele für häufig vorkommende Phänomene gegeben werden und die Begriffe, wie sie in dieser Publikation verwendet werden, erläutert werden.

Whisker (= Haarkristalle): mm- bis cm-lange, wenige μm -dünne, oft gebogene, haarähnliche Nadeln.

Salzflaum: sehr lockere, wolle- oder watteartige Salzausblühung, bestehend aus Häufchen von meist gebogenen Haarkristallen.

Salzrasen: lockerer Belag nadeliger bis stengeliger, mehr oder weniger senkrecht auf der Unterlage stehender, 0,1 bis mehrere Millimeter großer Whiskerkristalle. Salzrasen sind oft erst im Streiflicht gut sichtbar.

Pulverige Salzausblühung: weißer, mehlig, dichter oder lockerer bis flockiger Überzug.

Salzpusteln: voneinander getrennte, lockere bis kompakte, bis etwa 1 mm Durchmesser große Salzhäufchen oder -höcker.

Dunkle, feucht aussehende Flecken: dabei kann es sich um sehr dünne Salzkrusten handeln, die, ähnlich einem Feuchtigkeitsfilm, die Oberfläche dunkler erscheinen lassen.

Salzkrusten: kompakte, manchmal fest auf der Unterlage haftende, manchmal aber auch druckempfindliche Salzaggregate, mit flächigem Zusammenhalt und von sehr unterschiedlicher Dicke (einige μm bis mm).

Weißer, lockere Salzkruste (= zuckerkörnige Kruste): besteht aus Aggregaten von mit bloßem Auge oder mit einer schwachen Lupe gut erkennbaren, glasklaren Kristallen.

Seidenglanzkrusten: Flächige, beige, matt glänzende Salzkruste.

Blumenkohlruste: Kruste aus weißen, kugeligen Aggregaten, die eng zusammenliegen, so daß ihre Oberfläche derjenigen eines Blumenkohls gleicht.

Faserkruste (= Whiskerkruste): Kruste aus eng beieinander, senkrecht zur Wand stehenden Haarkristallen.

Alveolen: Fehlstellen mit mehreren mm bis cm Durchmesser, in denen der Mörtel oder Stein absandet.

Trichterchen: Kleine, meist kreisrunde Fehlstellen, die sich in der Tiefe kraterförmig verengen. Ihr Durchmesser liegt in der Regel bei 1 bis 2 mm und in ihrem Zentrum befindet sich oft ein einzelnes Zuschlagkorn.

B Feldtests

B1 Benötigte Utensilien:

- Lupe
- Plastiktütchen (ca. 3 x 5 cm und 7 x 10 cm groß)
- Löschpapierstreifen zum Aufnehmen von Salztröpfchen
- pH-Papier (pH 1-14)
- Messer oder Skalpell
- Nadel
- Pinsel
- Taschenlampe
- Feuerzeug
- evtl. Teststäbchen für Chlorid, Nitrat und Sulfat

B2 pH-Test: Einige Körnchen Salz auf ein feuchtes pH-Papier (gewöhnliches Wasser genügt) legen und sie so lösen. Der pH-Wert wird auf der Vergleichsskala abgelesen.

B3 Prüfung der Fähigkeit Kristallwasser abzugeben: Salzprobe in kleine Plastiktüte bringen und zum Beispiel in der Hand, an einer handwarmen Kaffeetasse oder warmen (nicht heißen! 36 °C genügen) Lampe, leicht erwärmen.

B4 Test auf Salz: wenig Probe am besten in einem Tütchen mit etwas Wasser mischen, wenn sie sich auflöst, handelt es sich um ein Salz, wenn nicht, Test 4 auf biogenes Material machen.

B5 Test auf biogenes Material: Probe auf eine Messerspitze legen, mit dem Feuerzeug die Messerklinge von unten erhitzen. Wenn die Probe verkohlt oder verbrennt, handelt es sich um biogenes Material, Salze dagegen schmelzen oder sie bleiben unverändert weiß.

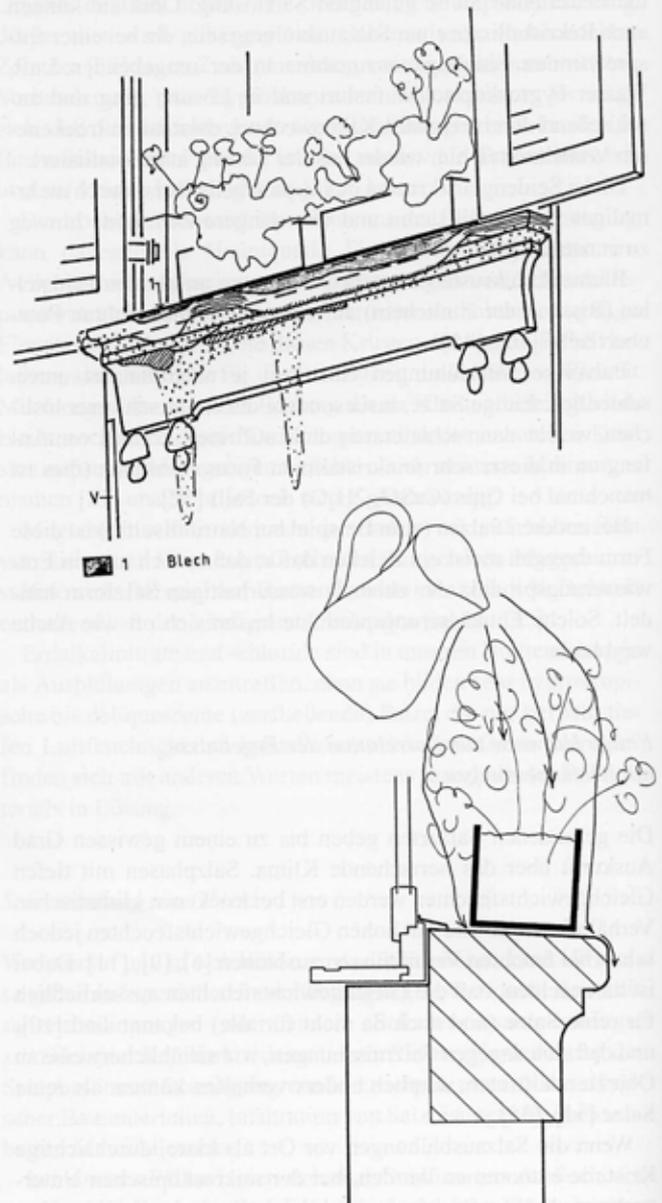
C Beispiele für Schadenssituationen

(Alle Beispiele aus [15])

Im folgenden geht es nicht darum, alle möglichen Schadenssituationen darzustellen, sondern anhand einiger Beispiele soll vielmehr die Denkweise aufgezeigt werden, mit deren Hilfe bestimmte beobachtete Phänomene interpretiert werden können.

Generelle Legende zu den dargestellten Schadenssituationen:

	Ausblühungen		Absanden stark
	Krusten		Absanden schwach
	Algen, Flechten, Moos		Schale
	Risse		Abblättern
	Wasserläufe		Aufblättern
	Fuge		





Beregnete Exposition, freistehender Geländerpfosten:
(Abb. 3):

Kleine Schanze, Bern

An der Stelle, an der der Pfosten regelmäßig von direktem Regen getroffen und ab(aus)gewaschen wird (oben am etwas vorstehenden Sockel und auf der W-Seite), ist er von Flechten und Algen bewachsen und in gutem Zustand. Auf der E-Seite, wo die Feuchtigkeit am längsten braucht, um zu verdunsten und sich somit die Salze aufkonzentrieren (die Salze bleiben beim Austrocknen so lange in Lösung, wie diese noch nicht konzentriert ist), bilden sich tiefe Löcher, Alveolen, durch Salzkristallisation, Absanden und Ausblasen des Sandes durch Wind.



Schaden durch ein leckes Dachablaufrohr:
(Abb. 4, 5)

Länggass-Schulhaus, Bern:

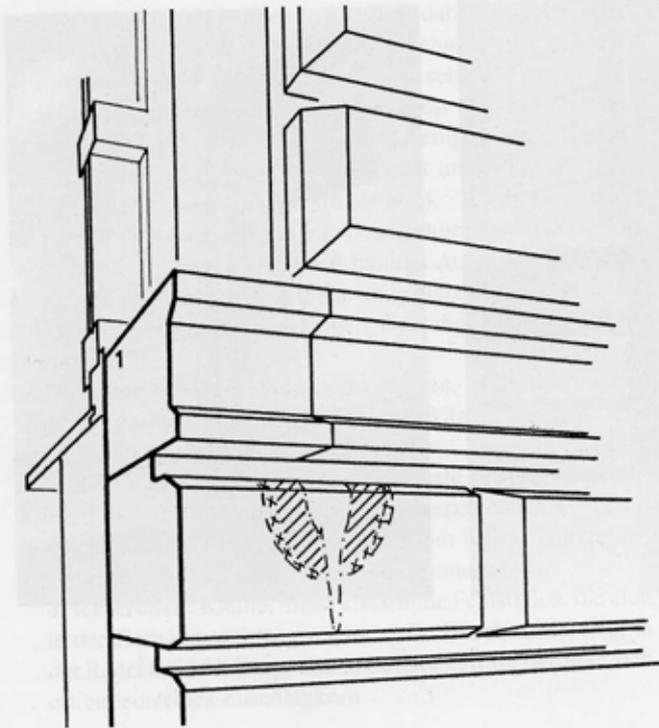
Das Dachablaufrohr war bei A (oben im rechten Bild) auseinandergezogen, so daß das Wasser der Fassade entlang herunterlief. Ein solcher Schaden, mit Abblättern, Ansanden und den zugehörigen Salzausblühungen (hier Gips und Epsomit), kann in wenigen Monaten entstehen. Der Schaden hätte durch Zusammenschieben der beiden Rohrteile vermieden oder gestoppt werden können.

Schäden durch Blumengießen:
◁ (Abb. 1, 2)

Polizeihauptwache Waisenhausplatz, Bern

Die Stadt Bern ist stolz auf ihre Fassaden aus Berner Sandstein und fast ebenso sehr auf den Blumenschmuck überall auf den Fensterbänken. Dieser Blumenschmuck wird auch alljährlich prämiert. Viele Fensterbänke, soweit sie nicht schon längst in Kunststein ersetzt worden sind, leiden allerdings unter dem Blumengießwasser. Die Bänke werden in dieser Exposition regelmäßig genetzt und bleiben lange feucht. Zudem werden die Blumen wahrscheinlich regelmäßig gedüngt (Salze!).

Gerade bei dem hier abgebildeten Beispiel ließ sich sehr gut zeigen, daß die Blumen auf den Fensterbänken die Hauptschadensursache waren – die Fassade ist inzwischen renoviert worden. Die Fensterbänke im Parterre und im zweiten Stock trugen keine Geranien und waren in gutem Zustand. Im ersten Stock, waren die Fensterbänke, wie auf dem Bild dargestellt, weitestgehend verwittert, so daß sogar ein Blech darübergelegt werden mußte, damit die Geranien nicht herunterfielen (das Blech war also nicht etwa als Schutz für die Fensterbank gedacht).

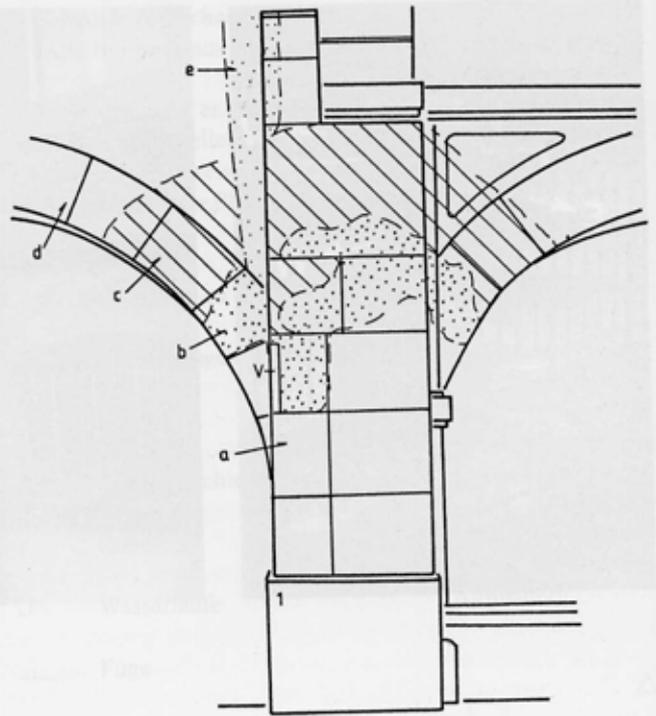
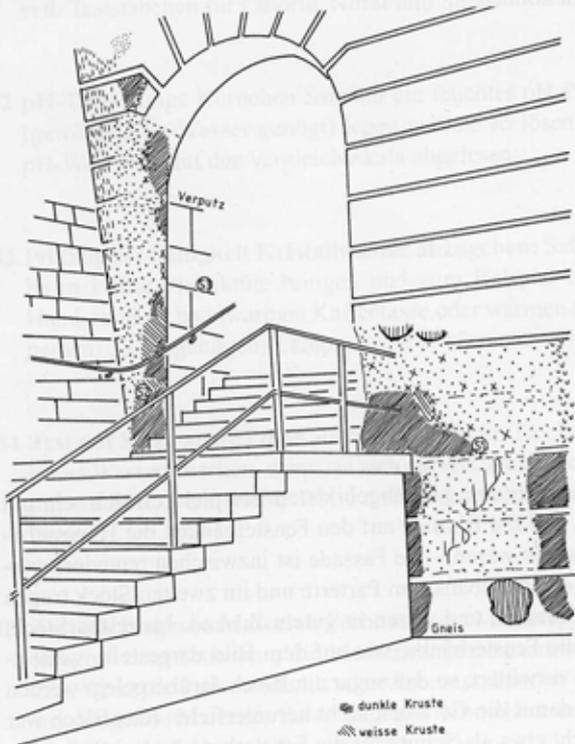


Durch Fugen kanalisiertes Wasser:
(Abb. 6)

Bundeshaus, S-Fassade, Bern

1 = Zementgebundener Kunststein

Die leicht vertiefte Fuge kanalisiert das Wasser, so daß es bevorzugt hier abfließt. Dadurch daß der Fugenmörtel in solchen Situationen zudem oft aufgerissen ist (oder fehlt), wird dieser Effekt noch verstärkt. Hier liegt die Fuge direkt unter der Fensterfläche, wo, verglichen zur Sandsteinfassade daneben, mehr Wasser abfließt, da es nicht vom Fassadenmaterial aufgesaugt wird.



Grundfeuchte:
(Abb. 7)

Arkadenpfeiler, Münsterergasse 4, Bern

1 = Kalkstein

Zonen a bis d entsprechen den Zonen A bis D wie sie in [3] definiert sind.

- a) Keine sichtbaren Grundfeuchteschäden
- b) Starkes Absanden, Salzausblühungen vor allem im Winter (Nitrokalit = KNO_3)
- c) Dunkle, feucht aussehende Zone, von Organismen bewachsen
- d) Bereich ohne sichtbare Grundfeuchteschäden
- e) Im Bereich e wird die oberste Grundfeuchtezone durch einen Wasserlauf überlagert, das heißt die Schäden in e haben nichts mit der Grundfeuchte zu tun.

Durchgang mit intensiver winterlicher Salzstreuung:
(Abb. 8)

Treppe von der Kleinen Schanze nach dem Bundesrain, Bern
Hier traten am 13.08.1985 die folgenden Ausblühungssalze auf:

S1 Halit (NaCl), Ca^{2+}

S2 Halit (NaCl), Ca^{2+} , NO_3^-

S3 Glaserit ($\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$), Thenardit (Na_2SO_4)

Dabei dürfte die Stelle S1 fast ausschließlich durch Streusalze beeinflusst sein, während bei S2 davon ausgegangen werden kann, daß es sich hier um eine Ecke handelt, die ab und zu von Hunden markiert wird (Nitrat). Bei S3 wird ein Einfluß durch im Verputz enthaltene Salze (Alkalien) vermutet.

Kellergeschoß eines Hauses auf Straßenniveau, mit überlagernden Bereichen von Grundfeuchte, trockener Deposition, Zementanwendung und möglicherweise Streusalzen: (Abb. 9)

Rappenthalstraße 78, Bern

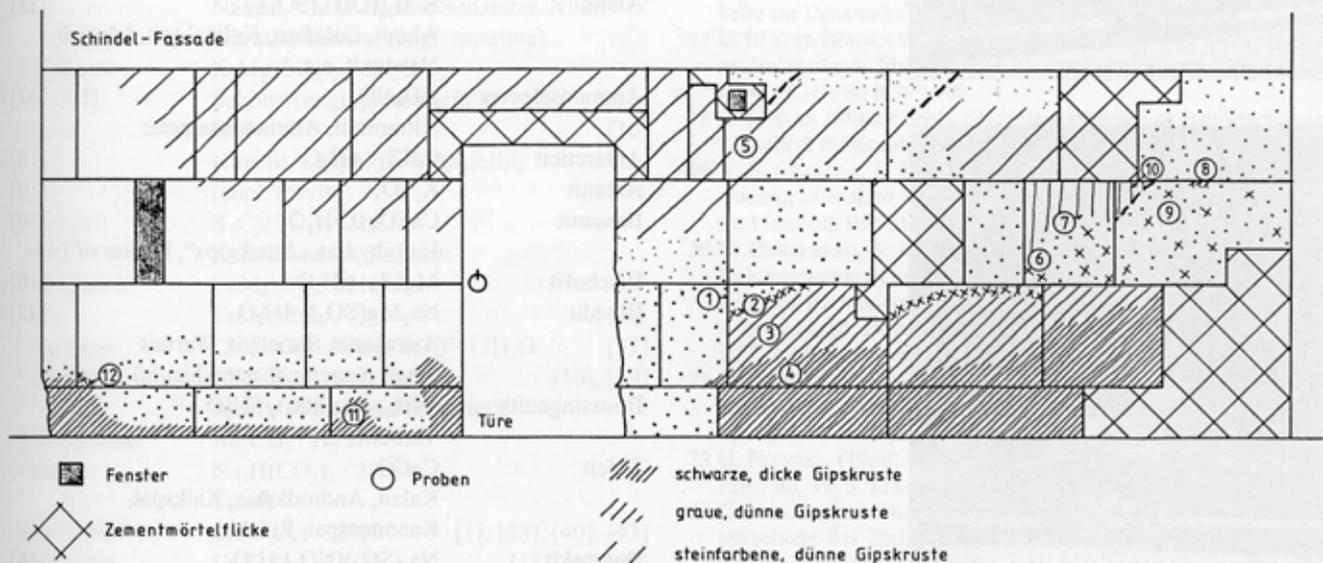
In den entnommenen Ausblühungs- und Krustenproben (07.07.1986) wurden die folgenden Salze und Ionen nachgewiesen:

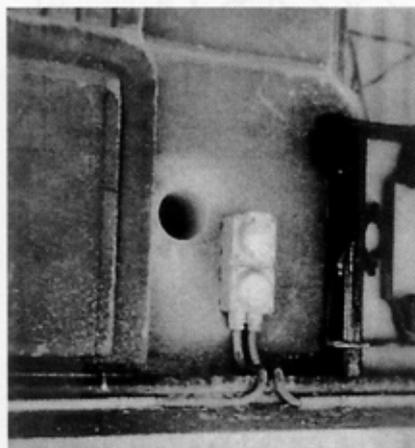
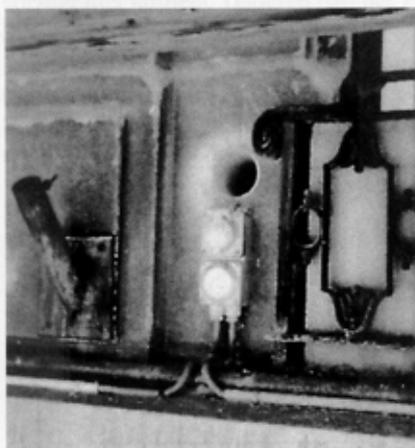
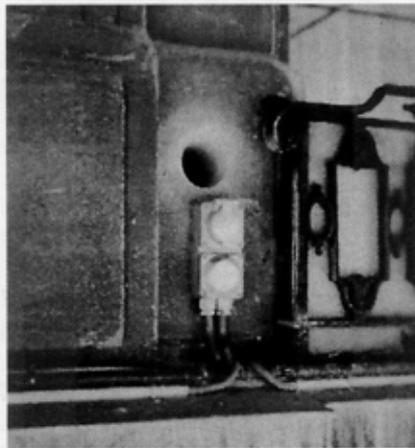
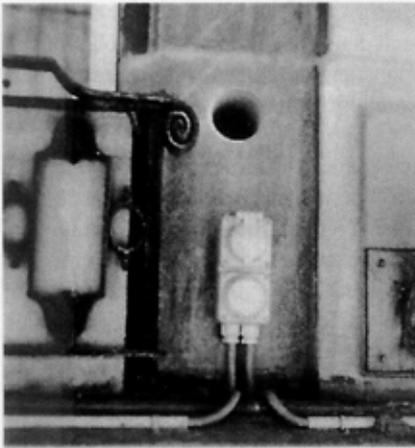
Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Proben: 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11
Nitrokalit	KNO_3	Proben: 6, 8, 9, 10
Thenardit	Na_2SO_4	Proben: 1, 2, 12
Syngenit	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Probe: 9
Arcanit	K_2SO_4	Probe: 8
Sylvin	KCl	Probe: 8
Kalium-Karbonat	$\text{K}^+, \text{CO}_3^{2-}$	Probe: 8
Natrium-Karbonat	$\text{Na}^+, \text{CO}_3^{2-}$	Probe: 2
Natrium-Nitrat	$\text{Na}^+, \text{NO}_3^-$	Probe: 2

Alkalikarbonate treten in der Nähe von Fugen auf und stehen wohl mit dem verwendeten Fugenmaterial (Zementmörtel) im Zusammenhang. Arcanit und Syngenit (Probe 8 und 9) sind möglicherweise als Reaktionsprodukte der alkalischen Salze aus dem Zementmörtel mit dem hier überall anzutreffenden Gips entstanden.

In der rechten Ecke wird die Grundfeuchte (hier angezeigt durch Kaliumnitrat) durch den großen Mörtelflick höher hinauf gezwungen, da die Verdunstung durch den, verglichen mit dem Sandstein dichten Zement, im unteren Bereich nur langsam möglich ist.

Es treten drei verschiedene Gipskrustenbereiche auf. Zu oberst, im durch die etwas vorstehende Schindelfassade und das Dach geschützten Bereich (A), ist die Gipskruste dünn und steinfarbig. Hier ist die Gipskruste das Resultat der trockenen Deposition von Sulfaten aus der Luft auf trockenem Stein. Auf Straßenniveau (Bereich C) und bis ca. 50 cm darüber findet sich eine dicke schwarze Gipskruste. Dieser Bereich ist stark durchfeuchtet, da hier neben Regenwasser auch Spritzwasser von durchfahrenden Fahrzeugen auftritt. In diesem Bereich dürfte die Gipskruste das Resultat von trockener Deposition auf nassem Stein sein. Es muß davon ausgegangen werden, daß der Stein hier noch weitere Salze und Ionen enthält (Salzstreuung), die aber zum Zeitpunkt der Probenahme nicht ausgeblüht waren. Hier wäre es also angezeigt, die Situation periodisch zu beobachten und zu einem anderen Zeitpunkt (Winter) weitere Ausblühungsproben zu entnehmen. Der Bereich B, der eine graue dünne Gipskruste trägt, dürfte das Mischprodukt zwischen den Einflüssen der Grundfeuchte und den Einflüssen des Bereichs C sein.





D Beispiel für eine unnötige Bohrkernentnahme

Die abgebildeten Bohrlöcher wurden (zusammen mit weiteren 8 Kernen) an der, durch ein 1 m ausragendes Dach geschützten, Nordfassade eines Berner Altstadthauses erbohrt. Die vier Bohrlöcher befanden sich alle in der ersten Etage jeweils in der genau gleichen Exposition. Der Zustand der betreffenden Fassade läßt sich in Kürze wie folgt beschreiben: alle Fensterbänke mit Blumentöpfen darauf blätterten auf, darunterliegende Fassadenteile waren entlang von Wasserläufen abgewaschen und sandeten mehr oder weniger stark ab. Die Gurtgesimse waren stellenweise durch Vogelkot verschmutzt. Die restliche Fassade war gleichmäßig von einer, einige Zehntelmillimeter dicken Gipskruste überzogen, die sich an Ecken und Kanten von Relieftteilen vom Stein löste. In einer solchen Situation wäre keine einzige Bohrkernentnahme zur Ermittlung von Schadensursachen oder Restaurierungsmöglichkeiten nötig, das heißt sämtliche hier entnommenen Bohrkern wurden überflüssigerweise gebohrt.

E Alphabetische Liste einiger Ausblühsalze

Name	Formel	
Alaun	$KAl_3[(OH)_6(SO_4)_2]$	[23]
	Alunit, Galafatit, Kalioalunit, Löwigit, Newtonit, etc.	
Ammonsalpeter	NH_4NO_3	[10], [42]
	Nitrammit, Ammoniasalpeter	
Antarcticit	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	[10]
Arcanit	K_2SO_4	[10]
Bassanit	$CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$	[30]
	Hemihydrat, „Stuckgips“, Plaster of Paris	
Bischofit	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	[10]
Bloedit	$Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$	[42]
	Astrakanit, Simonyit, Warthit (engl. manchmal astrakhanite)	
Boussingaultit	$(NH_4)_2Mg(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	
	Verbolit	
Calcit	$CaCO_3$	
	Kalzit, Androdamas, Kalkspat, Kanonenspat, Reichit	
Darapskit	$Na_3(SO_4)(NO_3) \cdot H_2O$	[26]

Dolomit	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ Bitterkalk, Magnesioalcalit, Ridolfit, etc.	
Epsomit	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ Reichardt, Bittersalz, Gletschersalz, etc.	[10]
Ettringit	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ Woodfordit, Zementbazillus	[37]
Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Alabaster, Gipsspat, Fraueneis, Selenit, etc.	[45], [47], [48], [52]
Glaserit	$\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$ Aphthitalit, Aphthalose, Duplicatsalz	[38]
Görgeyit	$\text{K}_2\text{Ca}_3(\text{SO}_4)_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ Mikheevit, Pentasalz	
Halit	NaCl Steinsalz, Kochsalz	[10], [22]
Hexahydrat	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Sakiit	
Humbertsonit	$\text{K}_3\text{Na}_7\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_6(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	[31]
Hydroglauberit	$\text{Na}_{10}\text{Ca}_3(\text{SO}_4)_8 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	[39]
Hydromagnesit	$\text{Mg}_3[\text{OH}(\text{CO}_3)_2]_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Hydro-Magnesit	
Kalicinit	KHCO_3	
Kalziumformiat	$\text{Ca}(\text{HCO}_2)_2$	[8]
Kieserit	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	
Lansfordit	$\text{MgCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	[50]
Magnesit	MgCO_3 Bandisserit, Baudisserit, Bitterspat, Gioberit, etc.	
Magnesiumformiat	$\text{Mg}(\text{HCO}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	[8]
Mirabilit	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ Glaubersalz, Reussin, Wundersalz	[10], [19]
Nahcolit	NaHCO_3 baking soda	[50]
Natrit	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ Soda, kohlen-saures Natron, Mineral- laugensalz, {engl. natron}	[10]
Nesquehonit	$\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	
Nitrocalcit	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Kalksalpeter, Saliter	[34]
Nitrokalit	KNO_3 Kalisalpeter (engl. niter)	[10]
Nitromagnesit	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Magnesio-Salpeter	[10]
Nitronatrit	NaNO_3 Natron, Chilesalpeter, Sodaniter, Niter, Nitratin, Salniter (engl. nitratine)	[10]
Pikromerit	$\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Schönit (engl. picromerite)	
Sylvin	KCl Hövelit, Leopoldit, Schätzellit, (engl. sylvite)	[10]
Syngent	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ Kalkkalisulfat, Kaluszit	
Tachyhydrat	$\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Tachyhydrat	
Thaumasit	$\text{Ca}_3\text{Si}(\text{OH})_6(\text{CO}_3)(\text{SO}_4) \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	[37]
Thenardit	Na_2SO_4 Makit, Menardit, Pyrotechnit	[10], [19]
Thermonatrit	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	
Trona	$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Tronit	
Weddellit	$\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	[1], [33], [40], [43]
Whewellit	$\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$	[1], [40], [43]

Literatur

- 1 T. ARMBRUSTER, (1981): Minerale in menschlichen Harnkonkretionen, Teil II, Oxalate, Urate und andere kristalline organische Verbindungen. – Aufschluß, 32, S. 313-321.
- 2 A. ARNOLD, (1981): Salzminerale in Mauerwerken. – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt., 61, S. 147-166
- 3 A. ARNOLD, (1982): Rising damp and saline minerals. – 4th Int. Congr. on Deterioration a. Preservation of Stone Objects, July 7.-9., Louisville, Kentucky, S. 11-28.
- 4 A. ARNOLD, (1985): Moderne alkalische Baustoffe und die Probleme bei der Konservierung. – Arbeitsheft 31, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, S. 152-162.
- 5 A. ARNOLD, (1991): Naturwissenschaft und Denkmalpflege. – Denkmalpflege, Tendenzen im Umgang mit historischen Bauten in Graubünden. Verl. Bündner Monatsbl. Chur, S. 127-150.
- 6 A. ARNOLD, (1992): Salze: Lästige weiße Ausblühungen oder Hauptschadensursache? – In Snethlage, R. (Hrsg.) Jahresberichte Steinerfall – Steinkonservierung, 1990, Verl. Ernst & Sohn, Berlin, S. 1-9.
- 7 A. ARNOLD, A. KÜNG, (1985): Crystallization and habits of salt efflorescences on walls I. Methods of investigation and habits. – 5th Int. Congr. Deterior. Conserv. of Stone, Lausanne, 25.-27. Sept., P. 255-267.
- 8 A. ARNOLD, K. ZEHNDER, (1983): Verwitterungsschäden durch Ameisensäure. – Schweiz. Ing. u. Architekt, Vol. 36.
- 9 A. ARNOLD, K. ZEHNDER, (1990): Salt weathering on monuments. – Advanced workshop on anal. methodologies for the invest. of damaged stones, Pavia, Italy, 14.-21. Sept.
- 10 A. ARNOLD, K. ZEHNDER, (1991): Monitoring wall paintings affected by soluble salts. – The Conserv. of Wall Paintings, Sympos. by Courtauld Inst. of Art and the Getty Conserv. Inst., Lond., July 13-16, 1987, p. 103-135.
- 11 A. ARNOLD, K. ZEHNDER, A. KÜNG, O. EMMENEGGER, (1991): Wandmalereierfall, Salze und Raumklima in der Klosterkirche von Müstair. – Ztschr. f. Kunsttechnol. u. Konservier., H. 2, Jg. 5, S. 171-200.
- 12 P. AUSSET, F. BANNERY, R. LEFEVRE, (1992): Les microparticules dans l'air et dans une croûte noire de Saint-Trophime d'arles. – 7th Int. Congr. Deter. Conserv. Stone, Lissabon, 15.-18. 6., p. 325-334.
- 13 D. BEEGER, (1988a): Zur Dokumentation der in Architektur und Plastik verwendeten Gesteinsarten und der auftretenden Verwitterungsformen. – Abh. Staatl. Museum. Mineral. Geol. Dres., Leipz., Bd. 35, S. 129-137.
- 14 D. BEEGER, (1988b): Steininventar und Verwitterungsschäden an der Südfassade der Stadtkirche St. Marien in Zwickau. – Abh. Staatl. Museum. Mineral. Geol. Dresden, Leipzig, Bd. 35, S. 21-31.
- 15 C. BLÄUER, (1987): Verwitterung der Berner Sandsteine. – Unpubl. Diss. Univ. Bern.
- 16 C. BLÄUER, (1990): Salze und Salzkrusten in der Ev.-ref. Kirche in Eilsam. – In: H.-H. Möller (Hrsg.): Wandmalerei-Schäden. Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, 8, S. 110-114.
- 17 C. BLÄUER BÖHM, (1992): Weathering of the Nydegg Bridge in Berne, Switzerland. 7th Int. Congr. Deterioration Preserv. Stone, Lissabon, 16.-19. 6., P. 979-988.
- 18 C. BLÄUER BÖHM, (1994): Salzuntersuchungen an Baudenkmalern. Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, 8/1, 86-106.
- 19 A. E. CHAROLA, J. WEBER, (1992): The hydration-dehydration mechanism of sodium sulphate. – 7th Int. Congr. Deter. Conserv. Stone, Lissabon, Port., 15.-18. Jun. '92, Vol. 2, p. 581-590.
- 20 U. EICKELBERG, S. HERPPICH, J. ZALLMANZIG, (Hrsg.) (1990): Die Dokumentation in der Bestandsaufnahme – Untersuchung, Bewertung und Restaurierung denkmalpflegerischer Objekte. Bericht der Arbeitsgruppe „Bestandsaufnahme“ des BMFT-Projektes „Steinerfall“, 1990. Sonderdr. aus: Bautenschutz Bausanierung.
- 21 B. FITZNER, R. KOWNATZKI, (1990): Bauwerkskartierung, Schadensaufnahme an Naturwerksteinen. – Sonderdr. aus: Der Freiberufl. Restaurator, H. 4, 25-40.
- 22 G. FRENZEL, (1980): Natriumchlorid im Tafoni-Granit. – Chem. d. Erde, Bd. 39, S. 158-169.
- 23 G. FRENZEL, R. MÜHE, (1991): Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung des Zwingers und der Hofkirche in Dresden (BRD). Chemie der Erde, 51, S. 1-12.

- 24 V. FURLAN, F. GIRARDET, (1988): Vitesse d'accumulation des composés atmosphériques du soufre sur diverses natures de pierre. – Proc. VIth Int. Congr. Deterior. Conserv. of Stone, 12.-14.9., Torun, Pol., p. 187-196.
- 25 F. GIRARDET, V. FURLAN, (1982): Mesure de la vitesse d'accumulation des composés soufrés sur des éprouvettes en atmosphère rurale et urbaine. – 4th Int. Congr. Deterior. Preserv. Stone Objects, July 7.-9., Louisville, Ky., p. 159-168.
- 26 M. H. P. C. HOLTkamp, W. M. M. HEIJNEN, (1991): The mineral dapskite in the efflorescence on two dutch churches. – Stud. in Conserv. 36, p. 175-178.
- 27 E. KAISER, (1907): Ueber die Verwitterungserscheinungen an Bausteinen, I. – N. Jb. Mineral. Geol. Paläont., 2, S. 42-64.
- 28 E. KAISER, (1930): Ueber die Grundfrage der natürlichen Verwitterung und die chemische Verwitterung der Bausteine im Vergleich mit der freien Natur. – Chem. d. Erde, 4, S. 290-342.
- 29 A. KIESLINGER, (1932): Zerstörungen an Steinbauten, ihre Ursachen und ihre Abwehr. – Verl. Deuticke, Leipzig-Wien.
- 30 G. A. LAGER, TH. ARMBRUSTER, F. J. ROTELLA, J. D. JORGENSEN, D. G. HINKS, (1984): A crystallographic study of the low-temperature dehydration products of gypsum, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Hemihydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$, and $\beta\text{-CaSO}_4$. – Amer. Mineralogist, 69, p. 910-918.
- 31 L. MARTIN, M. A. BELLO, A. MARTIN, (1992): The efflorescences of the cathedral of Almeria (Spain). – 7th Int. Congr. Deter. Conserv. Stone, Lissabon, Port., 15.-18. Jun. '92, Vol. 2, p. 869-874.
- 32 M. MATTEINI, (1987): In review: an assessment of florentine methods of wall painting conservation based on the use of mineral treatments. – The Conserv. of Wall Paintings, Sympos. by the Courtauld Inst. of Art and the Getty Conserv. Inst., London, July 13-16, 1987, p. 137-148.
- 33 M. DEL MONTE, C. SABBIONI, (1983): Weddellite on limestone in the Venice environment. – Environ. Sci. Technol., Vol. 17, p. 518-522.
- 34 F. PIQUÉ, L. DEL, (1992): Physicochemical aspects of the deliquescence of calcium nitrate and its implications for wall painting conservation. – Studies in Conservation, 37/4, p. 217-227.
- 35 C. PRICE, P. BRIMBLECOMBE, (1994): Preventing salt damage in porous materials. IIC Congr. Ottawa, 90-93.
- 36 F. DE QUERVAIN, (1945): Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz, Teil 1. – Beitr. Geol. Schweiz. geotech. Ser., S. 23.
- 37 H. ROSCHER, G. BAUER, H.-J. OEL, (1985): Analysis of deterioration of ancient masonry, made on of brick. – 5th Int. Congr. Deterior. Conserv. of Stone, Laus., 25.-27. Sept., p. 289-298.
- 38 A. SANCHEZ-NAVAS, C. CARDELL, J. M. GARCIA-RUIZ, (1992): Conservational study of ornamental tiles of the „Hospital de San Juan de Dios“ cloister (Granada, Spain). – 7th Int. Congr. Deter. Conserv. Stone, Lissabon, Port., 15.-18. Jun. '92, Vol. 3, p. 1527-1535.
- 39 S. L. SARKAR, S. CHANDRA, (1992): Microstructural investigation of masonry deterioration in an historical church tower, Gothenburg, Sweden. – 7th Int. Congr. Deter. Conserv. Stone, Lissabon, Port., 15.-18. Jun. '92, Vol. 2, p. 659-665.
- 40 A. SCHÄFER, (1975): Das System Calcium – Oxalat – Wasser bei 38 °C. – Unpubl. Diplomarb., Joh. Gutenberg Universität, Mainz.
- 41 U. SCHIESSL, (1991): Untersuchen und Dokumentieren von bemalten Holzdecken und Tafelungen. – Verl. Paul Haupt, Bern.
- 42 A. SCHMÖLZER, (1936): Zur Entstehung der Verwitterungsskulpturen an Bausteinen. – Chemie der Erde, 10, S. 479-520.
- 43 H.-H. SEYFART, B. HAHNE, (1978): Microscopic examinations of urinary calculi. – Jena Review, 4/78, p. 182-187.
- 44 G. STRÜBEL, S. H. ZIMMER, (1982): Lexikon der Mineralogie. – Enke-Verl., Stuttgart
- 45 M. TENNIKAT, (1992): Wandmalereischäden durch Salzkristallisation. REM-Untersuchungen und Laborexperimente zu Salzausscheidungen in romanischen Kirchen. – Diss. Universität Hannover.
- 46 V. VERGÈS-BELMIN, (1992): Répartition des sels et cartographie des altération sur la façade de l'église Notre-Dame-La-Grande à Poitiers, France. – 7th Int. Congr. Deterior. Conserv. Stone, 15-18 June, Lissabon, Portugal.
- 47 V. VERGÈS-BELMIN, C. PICHOT, G. ORIAL, (1993): Elimination de croûtes noires sur marbre et craie: à quel niveau arrêter le nettoyage? – Conservation Stone and Other Materials, Vol. 2, Proc. Int. RILEM Congr., Paris, p. 534-541.
- 48 J. WEBER, (1993): Salt-induced deterioration of romanesque wall paintings in the church of St. Georgen, Styria, Austria. – Conserv. of architectural surfaces : stones and wall covering, int. workshop 12.-14.03.92 Venice, il Cadro editore, Venedig, p. 97-103.
- 49 G. WEISS, (1992): Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinspezifischer Parameter. – Münchner Geowiss. Abh., R. B. Allg. u. Angew. Geologie, Verl. F. Pfeil.
- 50 N. WINCHELL, H. WINCHELL, (1964): The microscopical characters of artificial inorganic substances. – Academic Press, New York and London.
- 51 K. ZEHNDER, (1982): Verwitterung von Molassesandsteinen an Baudenkmalern und Naturaufschlüssen. – Beitr. Geol. Schweiz., geotech. Ser., S. 61.
- 52 K. ZEHNDER, (1993): New aspects of decay caused by crystallization of gypsum. UNESCO RILEM Kolloquium, Paris, Vol. 1, p. 107-114.
- 53 K. ZEHNDER, A. ARNOLD, (1988): New experiments on salt crystallization. – Proc. VIth Int. Congr. Deterior. Conserv. Stone, 12.-14.9., Torun, Poland, p. 320-329.
- 54 K. ZEHNDER, A. ARNOLD, H. SPIRIG, (1985): Zerfall von Wandmalerei durch lösliche Salze am Beispiel der Krypta des Großmünsters Zürich. – Histor. Technol. u. Konservierung v. Wandmalerei. Verl. Paul Haupt, Bern, S. 14-39.

Dank

Diese Arbeit wurde durch das an der Fachhochschule Köln, Fachbereich Restaurierung, angegliederte Projekt BAU 5022F (Projektleitung K. L. Dasser und E. Jägers), einem Forschungsprojekt im Rahmen des Fördervorhabens „Forschung und Entwicklung zur baulichen Substanzerhaltung und Denkmalpflege“ des BMFT finanziert. Mein Dank gilt allen im Kölner Projekt Mitarbeitenden für ihre stete Unterstützung. Wichtige Anregungen für diese Arbeit verdanke ich insbesondere den Diskussionen mit A. Arnold, K. Häfner, E. Jägers, und K. Zehnder.