Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae
Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft
Band: 77 (1984)
Heft: 2

Artikel: Evaporite und Verwitterung an Bauwerken
Autor: Arnold, Andreas / Zehnder, Konrad
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-165511

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Eclogae geol. Helv.	Vol. 77	Nr. 2	Seiten 287–300	Basel, August 1984

Evaporite und Verwitterung an Bauwerken

Von ANDREAS ARNOLD und KONRAD ZEHNDER[1])

ZUSAMMENFASSUNG

Die Salze, die an Bauwerken aus Steinen verwitterungsaktiv sind, finden sich auch in Naturvorkommen von Evaporiten. Sie beziehen ihre Ionen zum Teil aus denselben verwitternden Gesteinen und Böden, wobei an Bauwerken, durch menschliche Einwirkung bedingt, Nitrate und Chloride sowie Sulfate aus Immissionen angereichert sind. Der als Modellbeispiel beschriebene Grundfeuchteaufstieg bringt verdünnte Salzlösungen aus dem Boden in die Zone der Mauer, wo das Wasser verdampft. Dabei werden die Salze aufkonzentriert und in einer Abfolge nach ihrer Löslichkeit in verschiedener Höhe an der Mauer ausgeschieden. Die löslichsten Salze wandern am weitesten nach oben, und sie können in unserem Klima nicht kristallisieren, da sie hygroskopisch Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen. Die festgestellten Verhältnisse lassen sich auch auf die anderen Situationen anwenden, wo Wasser durch Steine und Mauern sickert. Daraus werden einige praktische Schlussfolgerungen gezogen.

ABSTRACT

The salts involved in weathering of building stones are the same as found in natural occurrences of evaporites. The ions partially originate from the same stones and soils beeing weathered, yet due to human influence nitrates and chlorides as well as sulfates from immissions are enriched on buildings. As an example rising damp shows how diluted saline solutions are transported from the soil into a zone of the wall where water evaporates. Thereby the salts are concentrated and precipitated at different levels on the wall in a sequence according to their solubility. The most soluble salts are transported highest up, and since they take water from the surrounding air they cannot crystallize in our humid climate. The observed phenomena are valid for any situation where water percolates through stones and walls. Some practical conclusions are drawn up.

RÉSUMÉ

Les sels agissant dans l'altération des constructions en pierre se trouvent également dans les évaporites en milieu naturel. Leurs ions sont en grande partie des produits de l'altération et proviennent des mêmes pierres et sols. Cependant les nitrates et les chlorures ainsi que les sulfates provenant des immissions sont enrichis dans les sites humains. La remontée de l'eau dans les murs est un exemple qui démontre le transport des solutions salines diluées du sol aux zones du mur où l'eau s'évapore. Ainsi les solutions salines se concentrent et leurs sels se déposent à différents niveaux suivant leur solubilités. Les sels les plus solubles sont transportés le plus haut, et, étant hygroscopiques, ils attirent de l'humidité de l'air et ne peuvent donc pas cristalliser dans notre climat humide. Les phénomènes constatés peuvent s'appliquer à tous les cas où des eaux percolent à travers des pierres et des murs. Des conclusions pratiques sont tirées.

[1]) Institut für Denkmalpflege der ETH, Technologisches Labor, Fabrikstrasse 46, CH–8005 Zürich.

1. Einleitung

Dem Zerfall der Steine, Mörtel und Farben historischer Bau- und Kunstwerke wirksam zu begegnen setzt voraus, dass man die Verwitterungsvorgänge möglichst genau erkennt. Unter den verschiedenen degradierenden Wirkungen der Bausteinverwitterung ist die Salzsprengung eine der wichtigsten. Sie ist deshalb ein zentrales Gebiet der Verwitterungsforschung.

Dass Salpeter die Mauern zerfressen kann, ist sicher schon seit Jahrhunderten bekannt. Wissenschaftlich ist die Salzsprengung belegt, seit HERICART (1828) den Salzsprengversuch beschrieben hat und damit bewies, dass kristallisierende und hydratisierende Salze das Gefüge von Steinen zu sprengen vermögen. Das Problem der Salze an Bauwerken ist seither immer wieder aufgegriffen, aber nie systematisch in seinen Zusammenhängen als Verwitterungsphänomen untersucht worden. Eine sehr gute Zusammenstellung über die Arbeiten vor 1970 gibt EVANS (1970), der auch die verschiedenen Theorien auslegt über die Entstehung der Drücke bei der Kristallisation und der Hydratation von Salzen. Druckaufbau durch Volumenvermehrung des Gesamtsystems «Salz und Wasser» – analog zur Ausdehnung des Wassers beim Gefrieren – wird darin als sekundär betrachtet gegenüber dem linearen Wachstumsdruck, der sich aufbaut, wenn in zwei Dimensionen frei liegende Kristalle zwischen zwei Flächen wachsen. Solches Wachstum und seine Folgen sind direkt beobachtbar, wenn wachsende Nadeln (Whiskers-Wachstum) auch kristallwasserfreier Salze Mineralkörner oder Farbpartikel von der Oberfläche eines Steines oder Mörtels absprengen.

Das Problem, wie der Druck zustande kommt, steht hier jedoch nicht im Vordergrund. Unabhängig davon, ob wir es im Detail verstehen und berechnen können, stellen wir fest, dass die sprengende Wirkung der Salze auf und in porösen Steinen in Feld und Labor eindeutig und reproduzierbar nachgewiesen und als eine der Hauptwirkungen der Verwitterung im Naturaufschluss und am Bauwerk erkannt ist. Davon betroffen sind Fassaden, Steine, Mörtel und Malereien. Besonders Wandmalereien zerfallen heute durch Salze oft viel schneller als vor ihrer Restaurierung in unserem Jahrhundert.

Was hat das Phänomen Salzverwitterung an Bauwerken zu tun mit marinen und kontinentalen Evaporiten? Die Evaporite entstehen aus Lösungen, die aus chemisch verwitternden Gesteinen kommen (FÜCHTBAUER & MÜLLER 1977, STUMM & MORGAN 1981, EUGSTER & HARDIE 1978). Wässer in porösen Gesteinen und Böden sind also stets Salzlösungen, die ihre Ionen mitgebracht haben oder durch Lösungs- und Redoxreaktionen aus ihrer Umgebung beziehen. Wo Wasser an der Gesteins- oder Bodenoberfläche verdampft, bildet sich ein Wasserstrom, der die Ionen an die Oberfläche transportiert und die Salze an der Oberfläche aufkonzentriert. So entstehen bekanntlich die Salzkrusten und -ausblühungen in ariden Gebieten. Weniger bekannt ist, dass solche auch in unseren humiden Klimazonen häufig anzutreffen sind, sofern regengeschützte Oberflächen wie überhängende Felsen und Schipfen oder eben Baufassaden vorhanden sind (ZEHNDER 1982). Diese erste Ablagerung ist ein Stadium der Evaporitbildung.

In diesem Stadium sind die Salze sehr verwitterungsaktiv durch Salzsprengung. Sie verursachen unter anderem die früher oft äolischer Erosion zugeschriebene Zellen- oder Alveolarverwitterung, die wiederum in ariden Gebieten sehr verbreitet und bekannt ist, aber auch in humidem Klima an Naturaufschlüssen wie an Bauwerken auf-

tritt (SCHMOELZER 1936, PAULY 1976, ZEHNDER 1982). ZEHNDER hat am Beispiel der Sulfate nachgewiesen, dass Entstehung, Transport und Anreicherung der Salze im Naturaufschluss und am Bauwerk ähnlich ablaufen und unter analogen Expositionsbedingungen zu analogen Zerfalls- bzw. Verwitterungsformen führen.

In beiden Milieus sanden die Steine oberflächlich ab, wenn Salze an der Oberfläche angereichert sind, und Schalen lösen sich ab, wenn die Salze unter der Oberfläche aufkonzentriert sind. Dabei ist es sekundär, ob die Sulfate aus Immissionen oder anderen Quellen stammen.

An Bauwerken ist der menschliche Einfluss auf die Zusammensetzung der Salze besonders daran spürbar, dass einerseits Nitrate und Chloride angereichert vorkommen und anderseits alte Salzsysteme in Mauerwerken verändert werden durch Alkalien aus zugefügten modernen Baustoffen (ARNOLD 1981). Abgesehen von diesen Besonderheiten aber sind es dieselben Salze, die am Bauwerk und in der Natur verwitterungsaktiv sind und die, wenn sie in marine und kontinentale Becken abtransportiert werden, dort zur Endablagerung der Evaporite führen. So gesehen sind die Salze, die Steine an Bauwerken und in Naturaufschlüssen verwittern lassen, Produkte einer Stufe derselben Evaporitgenese.

Tabelle 1: *Die wichtigsten Salzmineralien an Mauerwerken.*

1. Karbonate	
Kalzit	$CaCO_3$
Dolomit	$CaMg(CO_3)_2$
Magnesit	$MgCO_3$
Nesquehonit	$MgCO_3.3\ H_2O$
Hydromagnesit	$Mg_5[OH(CO_3)_2]_2.4\ H_2O$
Natrit	$Na_2CO_3.10\ H_2O$
Thermonatrit	$Na_2CO_3.H_2O$
Nahcolit	$NaHCO_3$
Trona	$Na_3H(CO_3)_2.2\ H_2O$
	$K_2CO_3.2\ H_2O$?
Kalicinit	$KHCO_3$
2. Sulfate	
Gips	$CaSO_4.2\ H_2O$
Bassanit	$CaSO_4.\frac{1}{2}\ H_2O$
Epsomit	$MgSO_4.7\ H_2O$
Hexahydrit	$MgSO_4.6\ H_2O$
Kieserit	$MgSO_4.\ H_2O$
Mirabilit	$Na_2SO_4.10\ H_2O$
Thenardit	Na_2SO_4
Arcanit	K_2SO_4
Astrakanit	$Na_2Mg(SO_4)_2.4\ H_2O$
Picromerit	$K_2Mg(SO_4)_2.6\ H_2O$
Syngenit	$K_2Ca(SO_4)_2.\ H_2O$
Glaserit	$K_3Na(SO_4)_2$
3. Chloride	
Bischofit	$MgCl_2.6\ H_2O$
Antarticit	$CaCl_2.6\ H_2O$?
Tachyhydrit	$CaMg_2Cl_6.12\ H_2O$
Halit	$NaCl$
Sylvin	KCl
4. Nitrate	
Nitrocalcit	$Ca(NO_3)_2.4\ H_2O$
Nitromagnesit	$Mg(NO_3)_2.6\ H_2O$
Nitronatrit	$NaNO_3$
Nitrokalit	KNO_3
Ammonsalpeter	NH_4NO_3
Darapskit	$Na_3(SO_4)(NO_3).\ H_2O$

2. Die Salze an Bauwerken

In den Naturvorkommen und an Bauwerken sind die Ausblühungen nur der sichtbare Teil der vorhandenen Salzsysteme; meist sind zugleich gelöste und kristalline Salze vorhanden. Deshalb geben Ausblühungen und Krusten nur sehr bedingt Aufschluss über die Gesamtzusammensetzung der Systeme.

Die an Bauwerken bekannten Salze sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Es sind im wesentlichen Karbonate, Sulfate, Nitrate und Chloride der Elemente Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium. Die Liste gibt die häufigsten Salze und verzichtet auf Raritäten. Nicht enthalten sind ferner organische Salze wie Natriumacetat oder Calcium- und Magnesiumformiate aus Injektionsmaterialien oder Reinigungsmitteln (ARNOLD & ZEHNDER 1983). Enthalten sind aber die sehr häufigen alkalischen Mauersalze, die seit der Einführung der modernen alkalischen Baumaterialien wie Portlandzement und Wasserglas im 19. Jahrhundert an und in alte Mauerwerke gebracht werden.

Es handelt sich um Salzmineralien, die auch Hauptbestandteile der Evaporite kontinentaler und mariner Becken sind. Die an Bauwerken sehr wichtigen Nitrate sind dort allerdings nur in den Nitratvorkommen von Chile vertreten.

3. Herkunft der Mauersalze

Im Unterschied zu den in Becken abgelagerten Evaporiten mit regionalen Einzugsgebieten liefern bei Bauwerken vor allem lokale Quellen die Salzionen, nämlich
— die Natursteine und Mörtel,
— die Böden unter den Bauwerken,
— die Immissionen aus der Atmosphäre und
— moderne Baustoffe.

Über den Salzgehalt von *Natursteinen* wissen wir wenig. ZEHNDER (1982) findet in den Molassesandsteinen der Ostschweiz Gehalte an löslichen Sulfaten der Grössenordnung von 150 bis 1500 ppm. Auf ähnliche Gehalte kommen ARNOLD & ZEHNDER (1983) beim Bernersandstein von Krauchtal. Indirekte Angaben geben ferner Ausblühungen und Krusten von Gips und Magnesiumsulfat an Naturaufschlüssen von Bündnerschiefern, dolomitischen Kalksteinen und von Sandsteinen. Auch die dolomitischen Kalksteine, die zur Herstellung der *Bindemittel der Kalkmörtel* verwendet wurden, liefern Magnesiumsulfat, das in sehr vielen alten Bauwerken als Hauptsalz der Mauern erscheint. Daneben sind natürlich auch andere Salze anzutreffen.

Die Böden im Bereich von Siedlungen enthalten – das wissen wir aus der Zusammensetzung der Mauersalze im Grundfeuchtebereich – die von Menschen angereicherten Chloride (aus Kochsalz) und Nitrate (Abfälle und Landwirtschaft). Im übrigen ist uns noch recht wenig über die gesamte Salzführung solcher Bodenwässer bekannt.

Die Immissionen vor allem aus den Verbrennungsgasen bringen Schwefelderivate, aber auch Stickoxyde und andere Stoffe auf Steine und Mörtel.

In städtischen Gebieten der Schweiz z. B. betragen die Schwefelimmissionen etwa 3–10 g Sulfat pro Jahr und Quadratmeter Stein (GIRARDET & FURLAN 1982). Beredtes Zeugnis für ihre Wirkung sind die bekannten schwarzen Gipskrusten und andere Sulfatsalze. Der Einfluss der Stickoxyde, die Nitrate bilden sollten, ist bisher an Bauwerken unbekannt.

Moderne Baustoffe enthalten viele organische und anorganische Komponenten, die Salze sind oder zu Salzen führen. Neben dem Portlandzement liefern Wassergläser und alkalische Reinigungsmittel vorab Alkalikarbonate, die schon im Feld an ihrer alkalischen Reaktion gut erkennbar sind. Sie gehen mit den autochthonen Salzen alter Mauerwerke zumindest die Reaktionen ein, die von ARNOLD (1981) beschrieben worden sind. Das Gebiet der Salzionen aus organischen Baustoffen ist heute nicht überblickbar.

4. Salze im Bereich der Grundfeuchte

4.1 *Allgemeines*

Wässer in Gesteinen, Böden und Mauern sind stets mehr oder weniger verdünnte Salzlösungen. Ihre Salze werden erst dann verwitterungsaktiv, wenn die Ionen sich aufkonzentrieren bis zur Übersättigung und dadurch die Salze kristallisieren. Das geschieht unter anderem dort, wo die Grundfeuchte unter ständigem Wassernachschub von unten aus einer Mauer verdampft. Diese normale Situation soll hier als Beispiel dienen, um den Transport und die Aufkonzentrierung der Salzlösungen an Mauerwerken zu verfolgen.

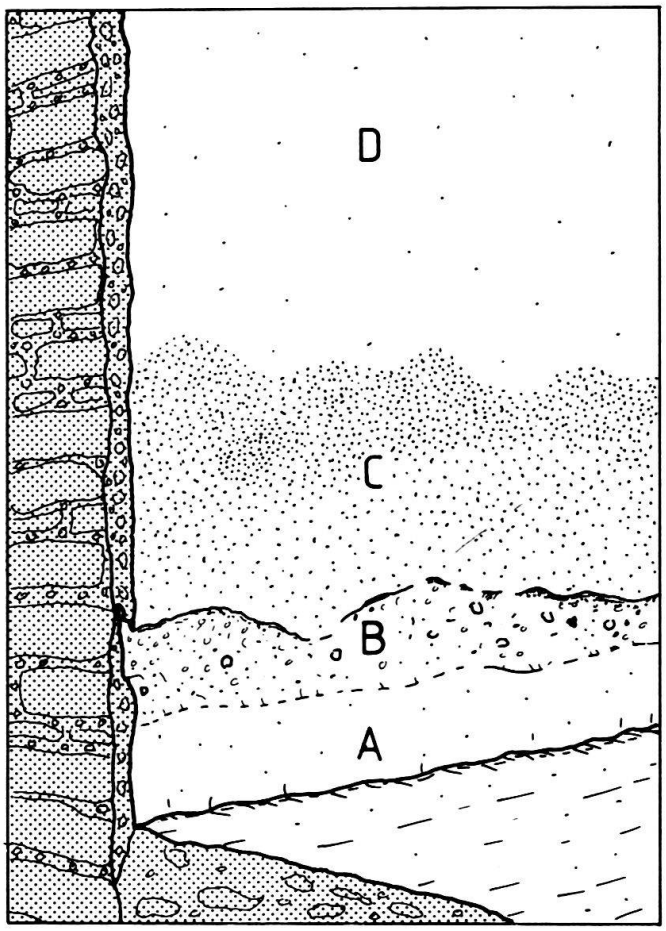

Fig. 1. Die verschiedenen Zonen im Bereich aufsteigender Grundfeuchte.

Im Bereich der Grundfeuchte eines Bauwerks beobachtet man die mehr oder weniger gut entwickelte zonare Abfolge, wie sie in Figur 1 dargestellt ist. Direkt über dem Boden liegt eine Zone A, die weniger Schäden zeigt als die darüber folgende Zone B, wo Steine und Mörtel als erste und am stärksten zerfallen. In der Zone B zeigen sich auch periodisch Salzausblühungen z. B. von Natriumsulfat, Magnesiumsulfat und Kaliumnitrat in verschiedenen Mengen. Zusätzlich findet sich dort Natriumkarbonat an Mauern mit modernen alkalischen Baumaterialien wie Portlandzement und Wasserglas. Über diesen beiden liegt eine dunkle, sonst aber meist intakte Zone C, die mehr oder weniger feucht scheint. Sie wird bei feuchter Witterung dunkler und bei trockener heller, wie dies TRAUNECKER & WUTTMANN (1982) auch in Karnak (Ägypten) beobachten. Diese Zone ist einige Zentimeter bis mehrere Meter hoch und nach oben oft scharf begrenzt. Sie zeigt in unseren humiden Klimazonen im Freien kaum je eine Salzausblühung. Nun fällt auf, dass trotz grosser Mengen gestreuter Tausalze (NaCl, $CaCl_2$) an Mauern kaum Chloride und nur selten Nitrate ausblühen. Indessen gibt es schon Hinweise darauf, dass diese Salze in hygroskopisch feuchten Zonen anzutreffen sind

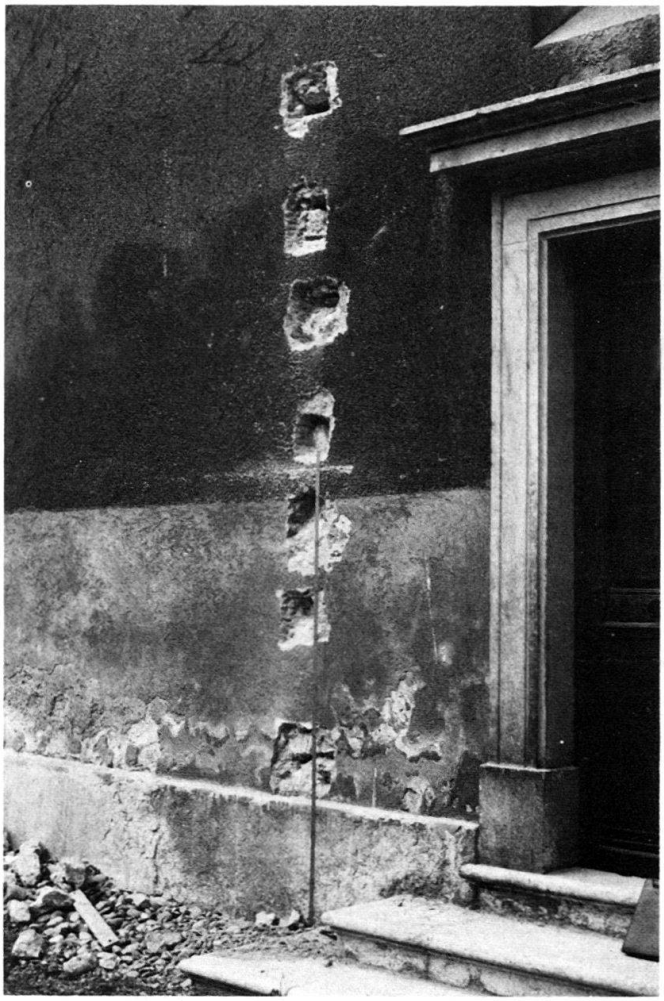

Fig. 2. Zone der aufsteigenden Feuchtigkeit an der Franziskanerkirche in Solothurn: Über dem Sockel aus Solothurner Kalk die stark beschädigte Zone B, darüber die dunkle Zone C. Die Löcher im Putz zeigen die Entnahmestellen der Proben. Der rauhe Besenwurfputz oben ist von 1900, der weniger rauhe Putz darunter von 1969. (Photo P. Widmer.)

(ARNOLD 1981). Darum ist es entscheidend, zu untersuchen, wo sich die Chloride und Nitrate befinden und wie sie an der Mauer verteilt sind.

Eine Gelegenheit, dies zu tun, bot die Franziskanerkirche in Solothurn.

4.2 *Der Fall Franziskanerkirche Solothurn*

Die aus dem 15. Jahrhundert stammende, damals gotische Franziskanerkirche in Solothurn erhielt 1822/23 eine klassizistische Innengestaltung und eine entsprechende äussere Anpassung. Zu Beginn dieses Jahrhunderts erhielt sie den in Figur 2 oben gut sichtbaren zementgebundenen Besenwurfputz. Der glattere untere Teil des Verputzes in der Figur ist von 1969. Weil die Grundfeuchte besonders stark war, wurde die Mauer damals entfeuchtet, indem man eine Schlämme aus 79 t Portlandzement, 24 t Wasserglas und 5 t Essigester durch Bohrlöcher in den Mauersockel injizierte. Da Portlandzement und Wasserglas alkalische Salze enthalten, wurden damit mehrere Tonnen Salze (Natriumkarbonat, Natriumacetat) eingebracht. Schon bald nach der Entfeuchtung tauchten neue Salzausblühungen auf, die bis heute den neuen Verputz absanden und den sehr beständigen Solothurner Kalk abbröckeln lassen. Die Ausblühungen sind ein Gemisch aus Natriumkarbonat, Natriumsulfat und Natriumacetat und stammen somit eindeutig aus dem Injektionsgut. Diese Salze und Schäden in den Zonen A und B waren der Anlass unserer Untersuchung. In Figur 2 ist der Zustand von 1979 festgehalten. Über dem Sockelstein aus Solothurner Kalk (Zone A) ist die stark absandende und mit Ausblühungen belegte Zone B erkennbar. Darüber folgt die über beide Putze

Tabelle 2: *Resultate der chemischen Analysen an Proben durch die Grundfeuchtezone der Franziskanerkirche in Solothurn. (Analyse Dr. E. Wirz, Kantonales Laboratorium, Solothurn.)*

Probe	Höhe m	% H_2O	pH	Nitrat ppm	Chlorid ppm	lösl. Anteil %
Putz						
5.1.1	0.7	1.87	8.40	52	22	1.5
5.2.1	1.3	1.40	8.20	2220	854	1.2
5.3.1	1.7	1.48	8.10	1400	834	1.1
5.4.1	2.1	1.66	8.25	2160	1589	2.0
5.5.1	2.6	1.81	7.96	2572	2011	2.2
5.6.1	3.0	0.84	8.37	268	247	0.9
5.7.1	3.5	0.83	8.28	108	106	1.5
Mauer						
5.1.2	0.7	1.25	8.31	144	71	0.9
5.2.2	1.3	1.33	8.14	104	34	0.6
5.3.2	1.7	1.71	8.08	2524	1930	1.3
5.4.2	2.1	2.16	7.90	2620	2219	2.6
5.5.2	2.6	1.10	8.40	2024	1142	1.0
5.6.2	3.0	0.94	8.35	1328	922	0.8
5.7.2	3.5	0.31	8.83	216	39	0.2

sich ausdehnende, dunkle, aber sonst schadenfreie Zone C. Sie war schon vor der Sanierung von 1969 so vorhanden und hat mit den Injektionen und Salzen in deren Gefolge nichts zu tun; hier erwarteten wir aber die für die Salzsysteme der Grundfeuchtezone entscheidenden Nitrate und Chloride.

Deshalb wurde – wie in Figur 2 ersichtlich – eine Probenserie durch die Zone B und die ganze Zone C entnommen, um daraus den Wassergehalt, den wasserlöslichen Anteil, die Chlorid- und Nitratgehalte sowie den pH-Wert zu bestimmen, und zwar jeweils an einer Verputzprobe und einer Mörtelprobe aus der Mauer hinter dem Verputz. Die Resultate sind in Tabelle 2 und Figur 3 dargestellt: Sowohl die Chloride und Nitrate (links) wie die wasserlöslichen Salze insgesamt (Mitte) als auch die Wassergehalte (rechts) sind in Zone C klar angereichert. Die Chloride und Nitrate finden sich sogar nur in der Zone C in nennenswerten Mengen.

Dieser Befund wird erhärtet durch viele teils qualitative, teils quantitative Ergebnisse aus anderen Objekten. Vor allem in der Klosterkirche Müstair ergaben noch nicht publizierte Untersuchungen eine durchaus analoge Verteilung der Nitrate und Chloride in der Zone C, wobei parallel dazu Magnesium, Natrium und Kalium angereichert sind. Der dort ebenfalls mitanalysierte Sulfatgehalt nimmt über der Zone B stark ab und verschwindet ganz, wo die Chloride und Nitrate stark zunehmen. Nach Messungen an der Oberfläche der entfeuchteten Mauer ist Zone C viel feuchter als die darunterliegenden A und B. – Ebenso ist es an allen untersuchten Objekten.

Zur *Erklärung dieser Verteilung* gehen wir zunächst davon aus, dass beim Grundfeuchteaufstieg im Modell der Wassergehalt in der Mauer ab einer bestimmten Höhe einfach abnimmt (MAMILLAN 1981); es fehlt aber eine starke Zunahme desselben in einer bestimmten Höhe. Demgegenüber deckt sich die hier beobachtete «abnormale» Verteilung der Feuchtigkeit mit der Verteilung der Chloride und Nitrate, die besonders zusammen mit Magnesium und Calcium hygroskopische Lösungen ergeben. Somit muss der Zusammenhang in Betracht gezogen werden, der zwischen hygroskopischen Salzen und der Luftfeuchtigkeit herrscht (ARNOLD 1981, TRAUNECKER & WUTTMANN 1982): Hygroskopische Salze und Salzlösungen können aus der Luft beträchtliche Feuchtigkeitsmengen aufnehmen, wenn die relative Luftfeuchtigkeit über der Gleichgewichtsfeuchtigkeit des entsprechenden Salzes liegt. Wie dies ARNOLD festhält, gehen z.B. Ca- und Mg-Chloride in Lösung, wenn die relative Luftfeuchtigkeit wesentlich über rund 30% liegt; die entsprechenden Nitrate tun dies bei einer solchen über 55%. Nur wenn die Luft an der Maueroberfläche trockener ist, könnten die betreffenden Salze kristallisieren. Weil das in unserem Klima und im Bereich der Grundfeuchte praktisch nie der Fall ist, halten die Salzlösungen in der Zone C die Mauer feucht. – Salzsprengung in der Zone C wurde bisher in grösserem Ausmass nur in beheizten Innenräumen beobachtet, wo dann vor allem Natriumnitrat und Natriumchlorid, selten auch Magnesiumnitrat kristallisieren. Hier kann die Raumfeuchtigkeit wie in der Krypta des Grossmünsters Zürich ohne weiteres auf Werte unter 40% absinken, wenn geheizt wird (ZEHNDER & ARNOLD 1982).

Die Anreicherung der Nitrate und Chloride in der Zone C ist also eine Folge des Grundfeuchteaufstiegs, bei welchem die Salze in einer bestimmten Sequenz an der Mauer verteilt werden. Der erhöhte Wassergehalt in der Zone C aber ist eine Folge der Feuchtigkeitsaufnahme der hygroskopischen Chloride und Nitrate aus der umgebenden Luft, wodurch deren Kristallisation verhindert wird.

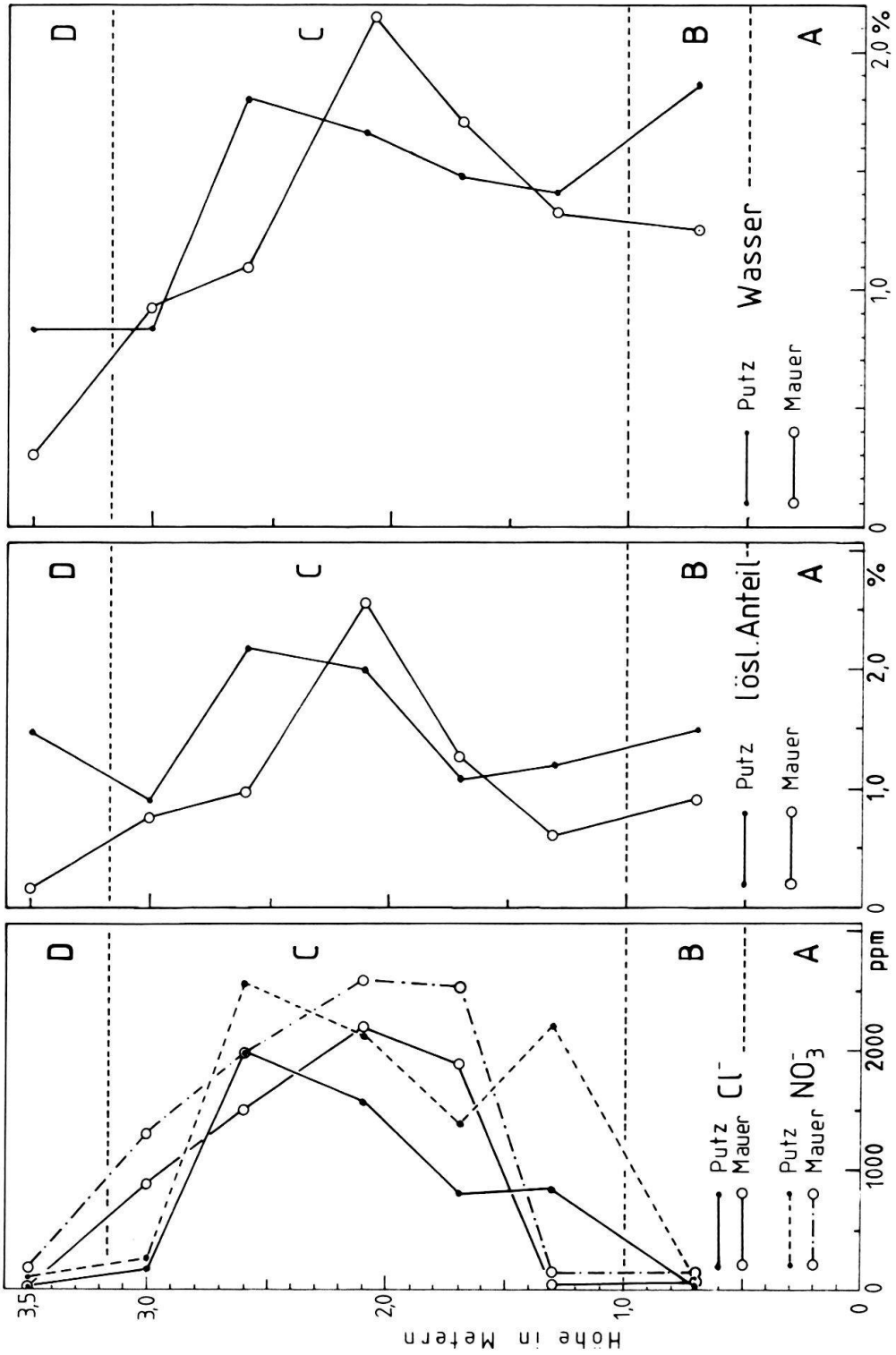

Fig. 3. Verteilung der Chloride und Nitrate, des wasserlöslichen Anteils und des Wassergehaltes in der Grundfeuchtezone der Franziskanerkirche (vgl. Tab. 2).

5. Modell für den Transport und die Aufkonzentrierung der Salze

Die bekannte selektive Salzausfällung bei der Entstehung von Evaporiten findet sich in anderer Form und im kleineren Maßstab am Bauwerk wieder. Wenn die bisherigen Beobachtungen und Analysen kombiniert werden mit den Literaturangaben (ARNOLD 1981, EVANS 1970, KIESLINGER 1932, SPRY 1981), können die Verhältnisse im Grundfeuchtebereich mit dem in Figur 4 schematisch aufgezeigten Modell erklärt werden: Die aufsteigende Grundfeuchte ist eine Salzlösung, die in der Mauer hochsteigt. Die Salze kristallisieren in einer ihrer Löslichkeit entsprechenden Abfolge, wodurch sie von der Lösung abgetrennt werden (Zonen A und B). Die Restlösung kann zufolge ihrer Hygroskopizität dauernd bestehen und wird kontinuierlich angereichert (Zone C). Im Freien wird zusätzlich an der ganzen Oberfläche Sulfat aus Immissionen gebildet oder abgelagert. Hiezu nun einige Erläuterungen:

— *Die aufsteigende Feuchtigkeit* besteht aus einer verdünnten Salzlösung, welche im wesentlichen die Ionen Ca, Mg, Na und K sowie SO_4, NO_3, Cl und etwas CO_3

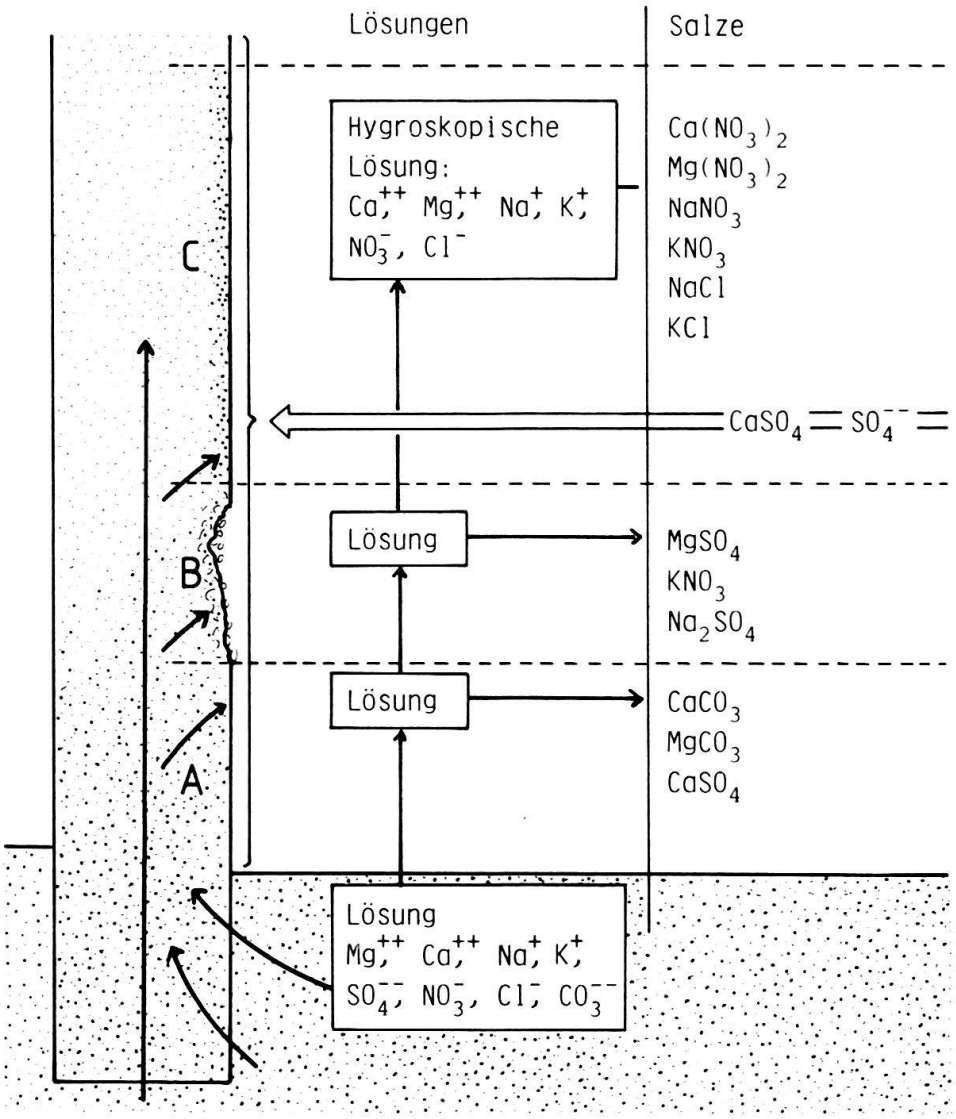

Fig. 4. Modell für die Verteilung der Salze und Salzlösungen im Bereich der aufsteigenden Grundfeuchte.

enthält. Im Bereich menschlicher Siedlungen sind die Bodenlösungen angereichert an Cl (Kochsalz) und NO_3 (organische Abfälle, Landwirtschaft). Die Bodenlösungen sind aber nur ein Spezialfall von Salzen in Mauern, denn Salzlösungen finden sich überall, auch in Bereichen weit über der Grundfeuchte. Das bezeugen Ausblühungen, die überall dort an einer Fassade erscheinen, wo Wasser durchsickert oder der Oberfläche entlang abrinnt.

— *Der Transport* der aufsteigenden Lösung erfolgt durch Kapillarkraft; der Wasserstrom wird unterhalten durch die Verdampfung im oberen Bereich. Die Richtung des Transports wird bestimmt durch das Gefälle zwischen dem mehr oder weniger wassergesättigten Grund und dem trockeneren oberen Bereich der Mauer. Das gilt nicht nur für den Grundfeuchteanstieg, sondern für den kapillaren Wassertransport in Mauern allgemein: Wasser, das auf irgendeine Art an oder in eine Mauer gebracht wird, breitet sich infolge der Kapillarkraft nach allen Richtungen, wegen der Schwerkraft aber bevorzugt nach unten aus. So ist der Grundfeuchteaufstieg nur ein Spezialfall des Wassertransports in Mauern allgemein.

— *Die Aufkonzentrierung* der Salze erfolgt durch das Verdampfen des Wassers über dem Boden. Da dies ein kontinuierlicher und lang anhaltender Prozess ist, können auch sehr verdünnte Lösungen im Verlauf der Jahre und Jahrhunderrte zu beträchtlichen Mengen angereicherter Salze und Salzlösungen führen.

— *Die Ausscheidung* der Salze findet dort statt, wo die Lösung während der Aufkonzentrierung für ein bestimmtes Salz übersättigt wird. Da die Restlösung aber jeweils weiter hochsteigt und verdampft, werden die Salze in einer Sequenz nach ihrer Löslichkeit ausgeschieden bzw. auskristallisiert. Diese allgemeine Feststellung ist nur eine grobe Annäherung; denn im Detail werden die Verhältnisse thermodynamisch sehr kompliziert, da wir es nun mit konzentrierten Lösungen zu tun haben. Die im Modell (Fig. 4) dargestellte Abfolge gilt für klassische Mauerwerke ohne moderne alkalische Baustoffe:

In der *Zone A* fallen die schwerlöslichen Salze wie Ca- und Mg-Karbonate sowie Gips aus. Diese sind aber Hauptbestandteile der Steine und Mörtel und deshalb praktisch nicht als Salze aus der Grundfeuchte zu identifizieren.

In der *Zone B* werden aus der weiter hochgestiegenen Restlösung von A vor allem Mg- und Na-Sulfate sowie etwas Kaliumnitrat ausgeschieden. Es sind Salze mittlerer Löslichkeit und schwacher Hygroskopizität. (Dazu gehören die als besonders verwitterungsaktiv bekannten hydratisierenden Salze, deren Hydratstufen bei täglichen Klimaschwankungen ändern können; vgl. ARNOLD 1976.) Da hier die grössten Schäden auftreten, fallen die Salze zum Teil mit den Gesteins- und Mörtelbruchstücken ab. Die Anreicherung an Salzen wird so teilweise kompensiert.

In der *Zone C* blühen nur hie und da vor allem in Innenräumen NaCl- und $NaNO_3$-Salze aus. Sonst bleiben die Ionen in unseren Klimabereichen in Lösung: Sie enthält ja Cl und NO_3 sowie Mg, Ca, Na und K, was ein sehr hygroskopisches Salzgemisch ergibt. Die Folge davon ist, dass die Salze in der Oberflächenzone der Mauer verbleiben und dort praktisch beliebig lange angereichert werden, d.h. solange Feuchtigkeit hochsteigt. Da aber hygroskopische Salze auch mehr Feuchtigkeit aufnehmen, wird die Zone C immer feuchter werden, und gleichzeitig hat sie die Tendenz, sich auszudehnen. Sie kann schliesslich beinahe eine ganze Mauerfläche einnehmen, wie es bei den Wirtschaftsgebäuden des Schlosses Seehof in Bayern der Fall ist. Es ist aber leicht einzuse-

hen, dass Zone C auch dann feucht bleibt, wenn der Feuchtigkeitsnachschub von unten durch Isolierung abgestellt wird, denn der Austausch mit der feuchten Luft bleibt bestehen. Somit haben wir in der Zone C eine kontinuierliche Anreicherung hygroskopischer Salze, die normalerweise nicht kristallisieren und die Mauer auch dann feucht halten, wenn der Grundfeuchteanstieg versiegt ist.

Der Niederschlag von Sulfat oder Gips ist ein weiterer im Modell berücksichtigter Prozess. Dabei wird aus Immissionen Gips auf der ganzen Oberfläche gebildet oder abgelagert, und zwar bevorzugt an den feuchten Zonen.

6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

6.1 *Zusammenfassung*

An Bauwerken findet man Salzmineralien, die durchwegs auch in Evaporiten natürlicher Vorkommen anzutreffen sind. Die Nitrate sind hier jedoch viel häufiger und bedeutender als in natürlichen Evaporiten. Bezogen auf die Evaporitgenese, entsprechen die Salze an Bauwerken den ersten Ausblühungen von Salzen an der Oberfläche von Gesteinen, bevor sie zu den kontinentalen und marinen Becken abtransportiert werden. In diesem Stadium sind die Salze in beiden Milieus sehr stark an der physikalischen Verwitterung der Steine und anderer Materialien beteiligt.

Die Phänomene der Salzverwitterung an Bauwerken, von der Entstehung der Salze über ihren Transport, ihre Aufkonzentrierung bis hin zur Ausfällung bzw. Kristallisation, lassen sich an der Situation des Grundfeuchteaufstiegs sehr gut verfolgen. Dort entwickeln sich bestimmte Zonen, die zeigen, dass die Salze aus der aufsteigenden Feuchte in einer bestimmten Abfolge ausgeschieden werden.

Die Grundfeuchte besteht aus verdünnten wässerigen Lösungen, die hauptsächlich Sulfate, Nitrate, Chloride und Karbonate der Alkali- und Erdalkalimetalle enthalten. In einer ersten Zone A, direkt über dem Boden, werden die Ca- und Mg-Karbonate sowie Gips ausgefällt. Diese Zone hat weniger Schäden als die darüberliegende, meist stark verwitternde Zone B, die besetzt ist mit Krusten und Ausblühungen von $MgSO_4$, Na_2SO_4 und manchmal auch etwas KNO_3 sowie Na_2CO_3 an Mauern mit modernen alkalischen Baustoffen. Diese Salze haben sich ausgeschieden aus der Restlösung der Zone A, während die neue Restlösung die noch verbliebenen Ionen weiter transportiert in die Zone C, wo schliesslich Nitrate und Chloride zusammen mit Ca, Mg, Na und K angereichert werden. Abgesehen von der teilweisen Kristallisation als NaCl- und $NaNO_3$-Ausblühungen in beheizten Innenräumen, bleibt dieses stark hygroskopische Salzgemisch dauernd in Lösung, weil es in unserem Klima Feuchtigkeit aus der Luft aufnimmt. Hier reichern sich die Salze an, solange Grundfeuchte aufsteigt, und sie breiten sich dabei allmählich weiter aus. Diese Zone ist dunkel und erscheint feucht; sie weist sonst aber (im normalen Aussenklima) keine Schäden auf.

Solche Kristallisationsabfolgen durch Auftrennung nach der Löslichkeit sind nicht auf die Grundfeuchte beschränkt. Sie entwickeln sich überall, wo Wasser durch Steinstrukturen dringt oder an der Oberfläche abrinnt; an Bauwerken und in Naturaufschlüssen.

6.2 *Folgerungen für die Praxis der Restaurierung*

Die unerwünschten Folgen aufsteigender Feuchte werden in der Praxis dadurch behoben, dass man mit mehr oder weniger Erfolg versucht, eine wirksame Isolierung anzubringen. Damit glaubt man die Probleme gelöst zu haben. Wie wird sich eine Isolierung auf das Verhalten der Salze auswirken?

In einer ersten Phase, nachdem die Wasserzufuhr abgestellt ist, wird für die gleiche Menge Salze durch das Austrocknen immer weniger Wasser zur Verfügung stehen. Das konzentriert die Lösungen auf und bringt die Salze zum Kristallisieren. Es ist also zu erwarten, dass nach einer Trockenlegung die Salzausblühungen und damit die Schäden zuerst zunehmen – was auch beobachtet wird. Dies geschieht vor allem in den Zonen A und B. Erst wenn die Mauer genügend ausgetrocknet ist und die ausgeblühten Salze entfernt sind, ist eine Abnahme der Schäden zu erwarten.

Die Salzlösung in der Zone C wird zunächst ebenfalls konzentrierter. Es ist zu erwarten, dass auch hier einige weniger hygroskopische Salze zum Kristallisieren kommen, die dies auf der noch feuchteren Mauer nicht taten. Man beobachtet dann auch dort Schäden, wo vorher keine waren. Der Hauptanteil der hygroskopischen Nitrate und Chloride wird aber die Feuchtigkeit festhalten und so auch den Stein oder Mörtel weiterhin feucht halten. Die dunkle Zone C wird nach der Entfeuchtung also nicht verschwinden. Im Gegenteil, sie wird mit einiger Wahrscheinlichkeit mit der Zeit auch durch neu angebrachte Anstriche und Verputze an die Oberfläche dringen, denn wie wir mit den Analysen festgestellt haben, können Chloride und Nitrate auch in der Mauer hinter dem Verputz angereichert sein. So wird denn auch oft beobachtet, dass einige Jahre bis Jahrzehnte nach einer Trockenlegung in dieser Zone neue Feuchtigkeitsflecken entstehen, wobei man dann glaubt, dass die Entfeuchtung versagt habe.

Bei Wandmalereien im Inneren gilt es zu beachten, dass hygroskopische Salze kristallisieren können, wenn die Luft sehr trocken wird. Das ist der Fall während der Heizperioden im Winter. So sind die wegen der Beheizung kristallisierenden Salze in der Zone C die Hauptursache des beschleunigten Zerfalls vieler Wandmalereien (ZEHNDER & ARNOLD 1982).

Schliesslich ist zu beachten, dass hygroskopische Salze an Mauern bewirken, dass Kondensation schon bei relativen Luftfeuchtigkeiten weit unter 100% eintreten kann (ARNOLD 1981).

Verdankungen

Wir danken Herrn Dr. E. Wirz vom Kantonalen Laboratorium Solothurn für die Analysen; Herrn P. Widmer, Architekt in Solothurn, für die Photoaufnahme und andere Unterlagen. Frau Grimbühler danken wir herzlich für die zuvorkommende Hilfe bei unserer Arbeit.

LITERATURVERZEICHNIS

ARNOLD, A. (1976): Behaviour of some soluble salts in stone deterioration. – 2nd int. Symp. Deterior. Build. Stones, Athen, S. 27–36.

— (1981): Salzmineralien in Mauerwerken. – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *61*, 147–166.

ARNOLD, A., & ZEHNDER, K. (1983): Verwitterungsschäden durch Ameisensäure. Eine Fallstudie am Erlacherhof in Bern. – Schweiz. Ingenieur und Architekt *36*/83, 841–845.

EUGSTER, H. P., & HARDIE, A. (1978): Saline Lakes. In: LERMAN, A. (Ed.): Lakes; Chemistry, Geology, Physics (S. 237–293). – Springer, New York.

EVANS, I. S. (1970): Salt crystallization and rock weathering: a review. – Rev. Géomorph. dyn. *19*, 153–177.

FÜCHTBAUER, H., & MÜLLER, G. (1977): Sediment-Petrologie 2: Sedimente und Sedimentgesteine. – Schweizerbart, Stuttgart.

GIRARDET, F., & FURLAN, V. (1982): Méthode de détermination de la vitesse d'accumulation des polluants soufrés dans les pierres en œuvre. – GP News Lett. (ETH Zürich u. Univ. Strasbourg) *3*, 25–30.

HERICART DE THURY et al. (1828): Sur le procédé proposé par M. Brard pour reconnaître, immédiatement, les pierres qui ne peuvent pas résister à la gelée, et que l'on désigne ordinairement par les noms de pierres gélives ou pierres gélisses. – Ann. Chim. Phys. *38*, 160–192.

KIESLINGER, A. (1932): Zerstörungen an Steinbauten. – Deuticke, Leipzig.

MAMILLAN, M. (1981): Connaissances actuelles des problèmes de remontées d'eau par capillarité dans les murs. – The Conservation of Stone 2, Int. Symp., Bologna, S. 59–72.

PAULY, J. P. (1976): Le rôle des chlorures dans les maladies alvéolaire et desquamente. – 2nd int. Symp. Deterior. Build. Stones, Athen, S. 79–91.

SCHMOELZER, A. M. (1936): Zur Entstehung der Verwitterungsskulpturen an Bausteinen. – Chem. Erde *10*, 479–520.

SPRY, A. (1981): The chemistry of salt attack in masonry. In: Rising damp and salt attack; recent developments (S. 3.1–3.12). – Univ. New South Wales.

STUMM, W., & MORGAN, J. J. (1981): Aquatic chemistry (2. Aufl.). – Wiley, New York.

TRAUNECKER, C., & WUTTMANN, M. (1982): Les maladies de la pierre à Karnak. – Hist. Archéol. *61*, 96–103.

ZEHNDER, K. (1982): Verwitterung von Molassesandsteinen an Bauwerken und in Naturaufschlüssen. – Beitr. Geol. Schweiz., geotech. Ser. *61*.

ZEHNDER, K., & ARNOLD, A. (1982): Steinverwitterung in der Krypta des Grossmünsters Zürich. – Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. *62*, 487–488.