

Salze im historischen Natursteinmauerwerk

IFS - Tagung 2002

Bericht Nr. 14 - 2002



INSTITUT FÜR
STEINKONSERVIERUNG

IFS



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

Mainz, 29.05.2012

Institut für Steinkonservierung e. V.

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



Salze im historischen Natursteinmauerwerk

Aktuelles zu Herkunft, Schadenswirkung und Restaurierungsmaßnahmen

IFS-Tagung 2002

Bericht Nr. 14 - 2002

Michael Auras und Gabriele Melisa

Kompressenentsalzung – Wirkungsprinzip, Materialien, Anwendung, Fallbeispiele

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

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

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

verbunden sind.

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

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

Typische Salzverteilungen

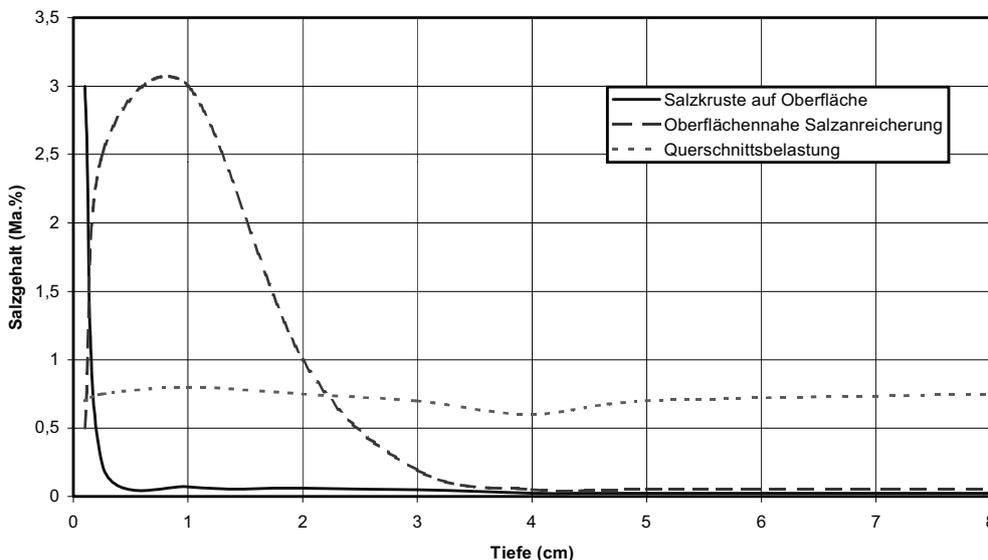


Abb. 1:
Typische Salzverteilungen im Mauerwerk

Wirkprinzipien der Kompressenentsalzung

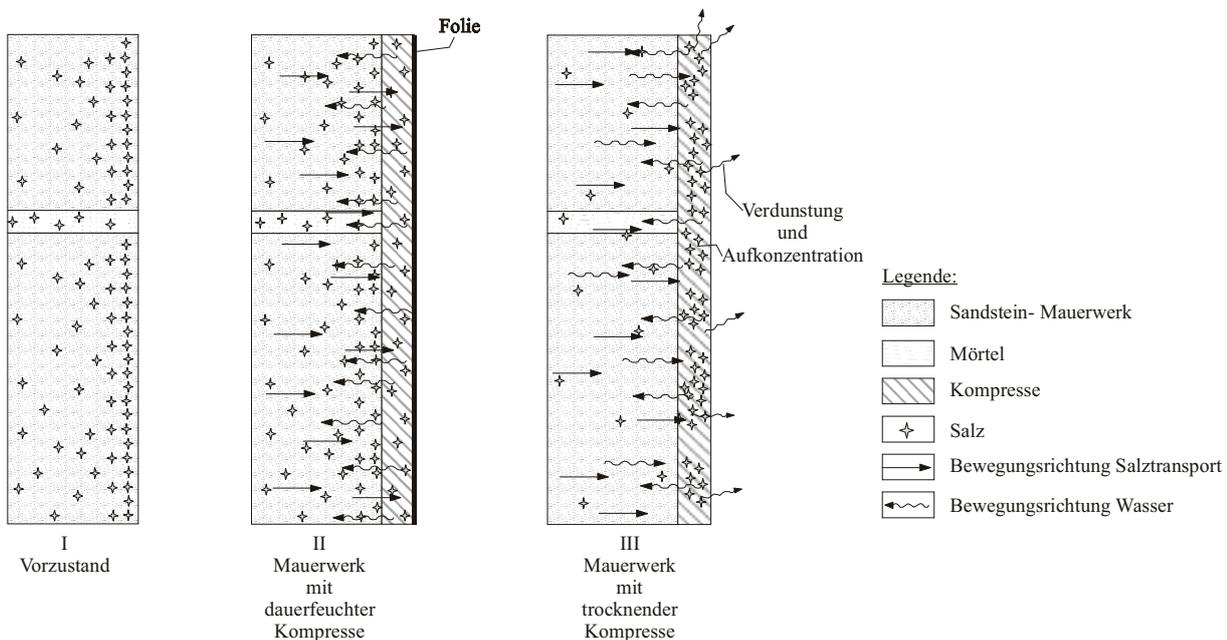


Abb. 2: Wirkprinzip trocknender und dauerfeuchter Kompressen

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

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

Wirkprinzip

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

Dauerfeuchte Kompressen werden mit Folien abgedeckt, um eine Verdunstung des Wassers zu vermeiden. Gelöste Salzionen diffundieren aus der Porenflüssigkeit des Baustoffs in das in der Komresse gespeicherte, zunächst salzfreie Wasser bis ein Konzentrationsaus-

gleich erreicht ist. Die entzogene Salzmenge hängt also zunächst vom Verhältnis der Volumina der Porenflüssigkeiten von Baustoff und Komresse ab.

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

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

Materialien und Verfahrensvarianten

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

Wirkung dauerfeuchter und trocknender Kompressen

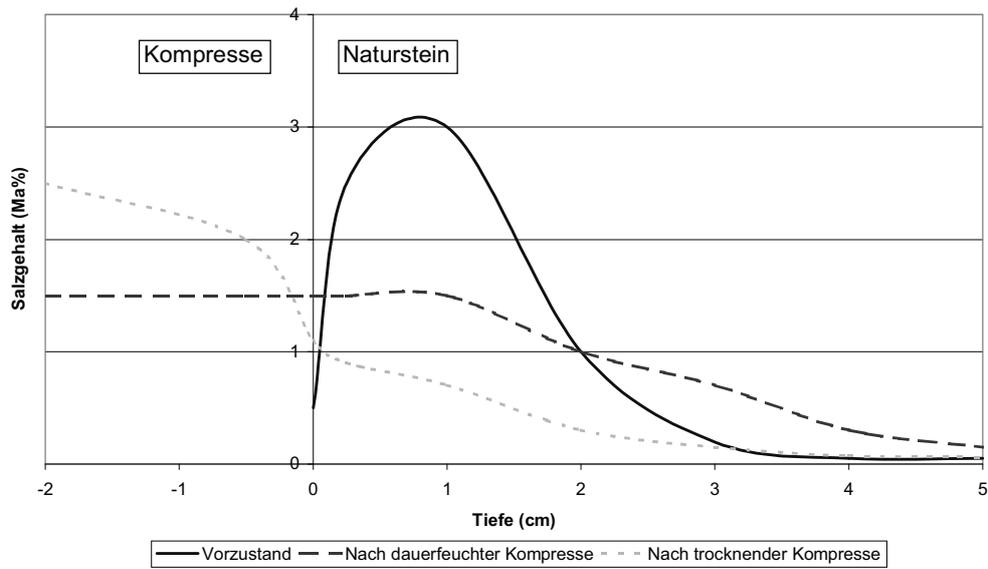
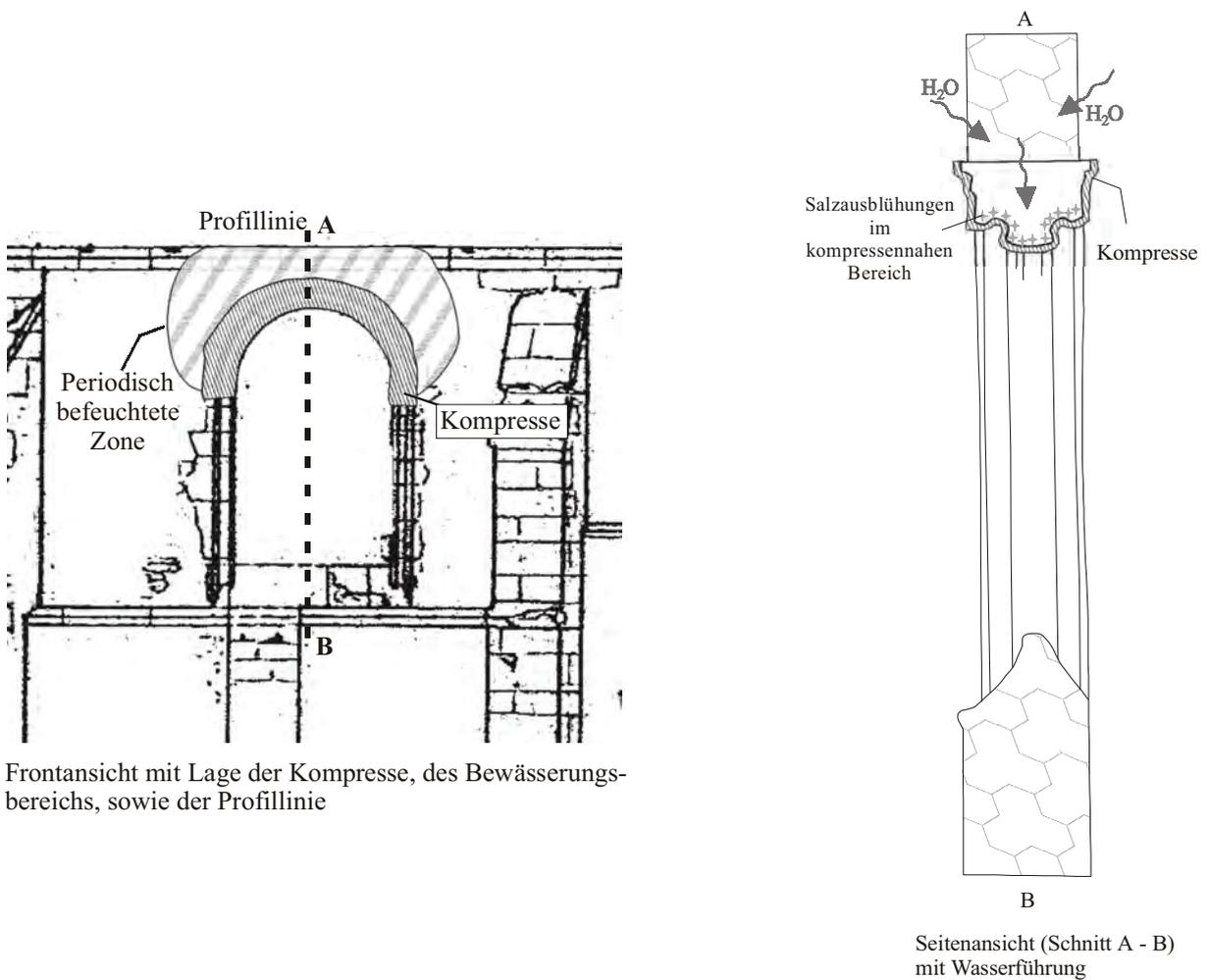


Abb. 3: Schematische Salzprofile vor und nach der Entsalzung mit einer dauerfeuchten und einer trocknenden Komprese



Frontansicht mit Lage der Komprese, des Bewässerungsbereichs, sowie der Profillinie

Seitenansicht (Schnitt A - B) mit Wasserführung

Abb. 4: Komprese am Rundbogenfenster der Augustinerkirche Trier

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

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

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

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

Bewertungskriterien

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

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

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

Einige tonmineralhaltige Kompressen werden sehr fest, andere haften stark an der Oberfläche, manche lassen sich nicht rückstandsfrei entfernen. Häufig können derartige Probleme durch die Wahl eines entsprechenden Kompressenmaterials und durch die Kombination mit

trennenden Zwischenschichten (z.B. Japanpapier, Zellulosefasern) gemindert werden.

Fallbeispiele

I. Materialvergleich trocknender Kompressen an der ehemaligen Augustinerkirche Trier

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

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

Musterflächen

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

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

Ergebnisse

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

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

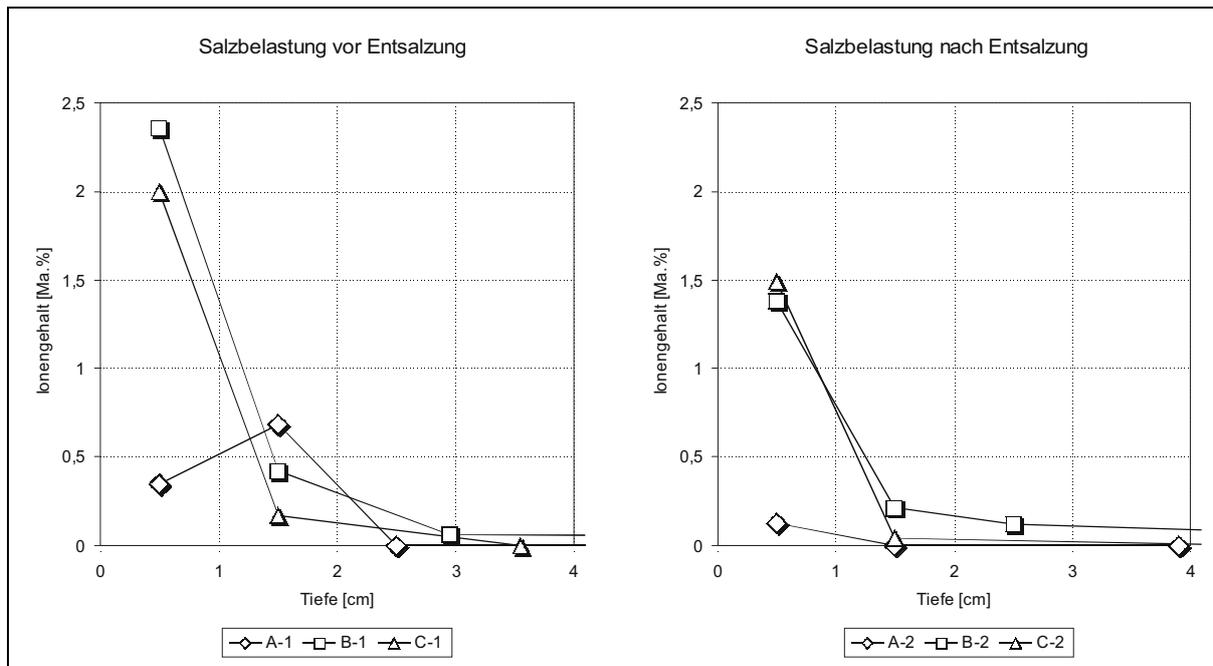


Abb. 5: Gesamtgehalte wasserlöslicher Ionen im Tiefenprofil der Sandsteine vor und nach der Entsalzung. A, B und C kennzeichnen Proben, die im Bereich entsprechender Musterflächen entnommen wurden.

Tab. 1: Untersuchte Kompressenmaterialien.

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

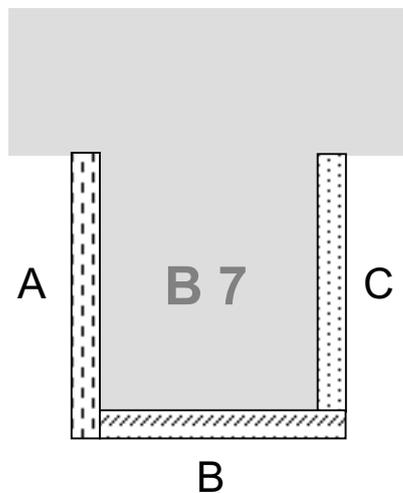


Abb. 6: Schema der angelegten Musterflächen im Querschnitt des Strebe Pfeilers B7. Feld A: Kaolin-Cellulose-Sand-, Feld B: Cellulose-Sand-, Feld C: Bentonit-Cellulose-Sand-Kompresse.

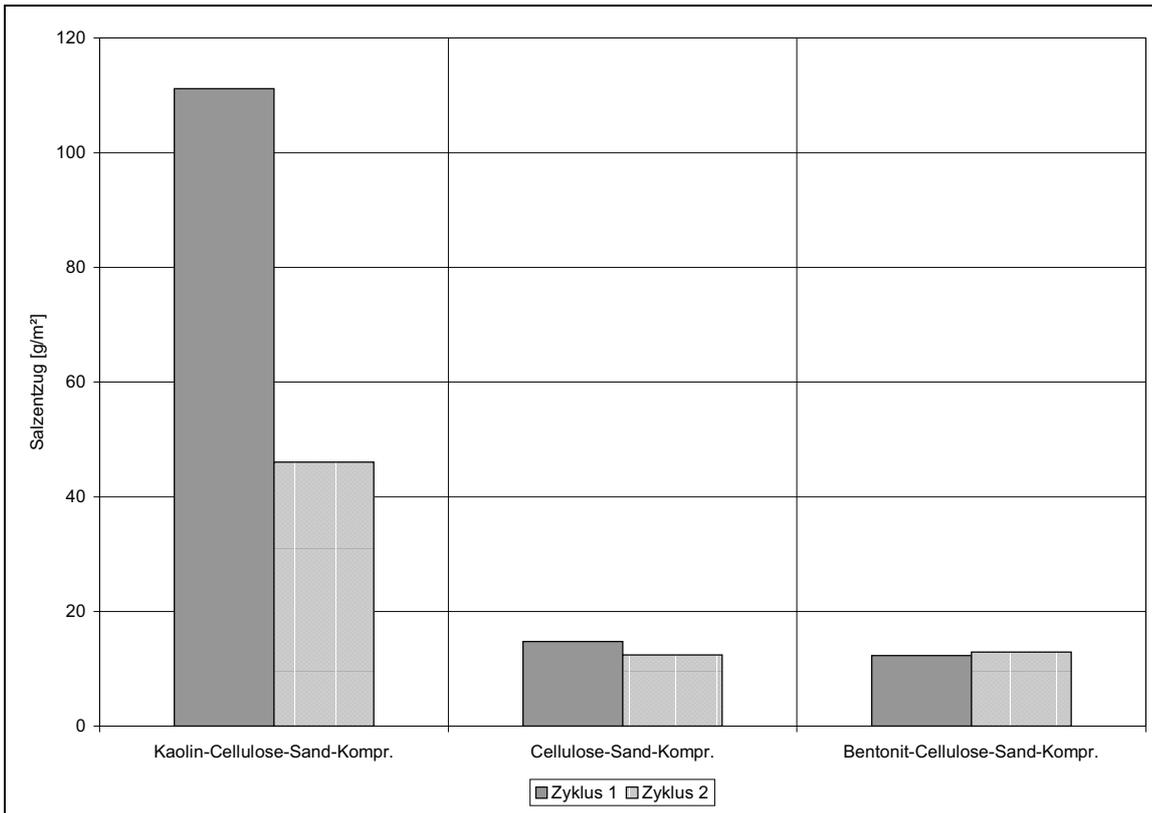


Abb. 7: Die dem Mauerwerk nach erstem und zweitem Kompressenauftrag entzogene Salzmenge im Vergleich. Dargestellt sind Durchschnittswerte aus drei Höhenniveaus der Musterflächen.

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

Bewertung

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

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

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



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

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

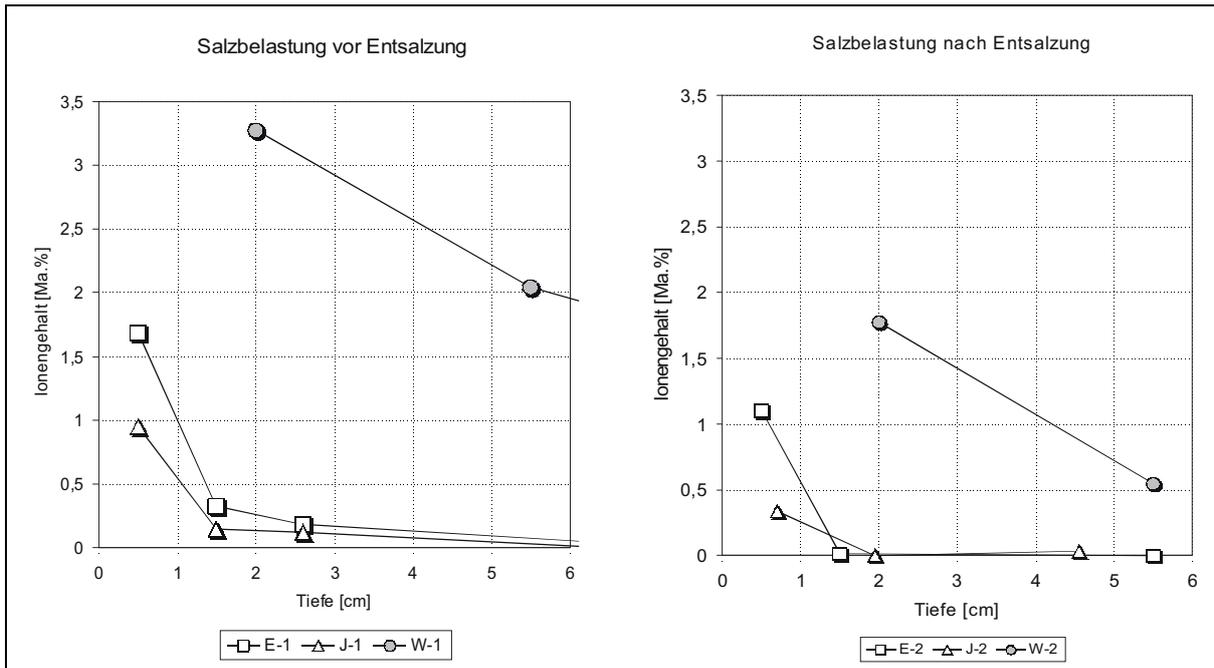


Abb. 9: Gesamtgehalte wasserlösliche Ionen [in Ma.%] im Tiefenprofil der Sandsteine der Augustinerkirche (Proben E und J) und des Ziegelmauerwerks des Kamins in Weilerbach (Probe W) vor und nach der Entsalzung.

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

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

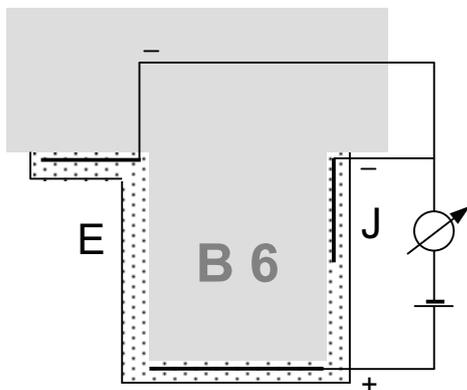


Abb. 10: Schema der Musterfläche zur elektrochemischen Kompressenentsalzung an der Augustinerkirche im Querschnitt des Strebepfeilers B 6.

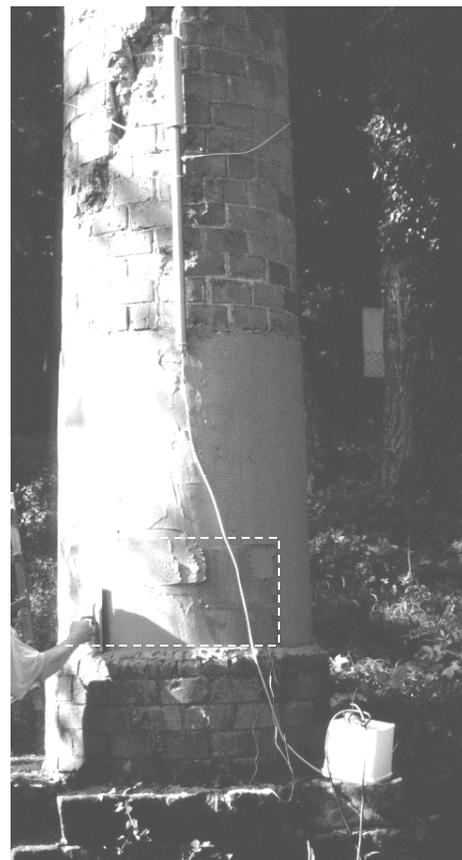


Abb. 11: Kamin der ehemaligen Eisenhütte in Weilerbach. Die Komresse wurde ringsum auf das Mauerwerk aufgetragen. Der gestrichelte Bereich kennzeichnet die in der Komresse eingebettete Kathode. Die Anode wurde auf der gegenüberliegenden Seite des Kamins platziert. Oberhalb der Komresse ist die Antenne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

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

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

Ergebnisse

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

Aus der Analyse der Kompressenproben geht hervor, dass höhere Salzmenge dem Mauerwerk nur im Bereich der Elektroden entzogen wurden (Abbildung 14). Sehr unterschiedlich waren ebenfalls die pH-Werte der

untersuchten Eluate. Sie reichten von pH 3 im Bereich der Anoden bis pH 10 an den Kathoden.

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

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

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

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

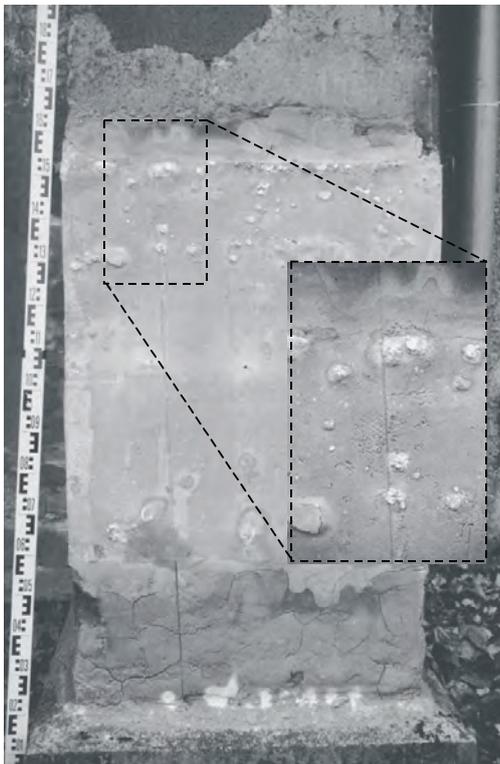


Abb. 12: Kompresse mit elektrochemischer Unterstützung im Bereich der Anode (Beschreibung im Text).



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

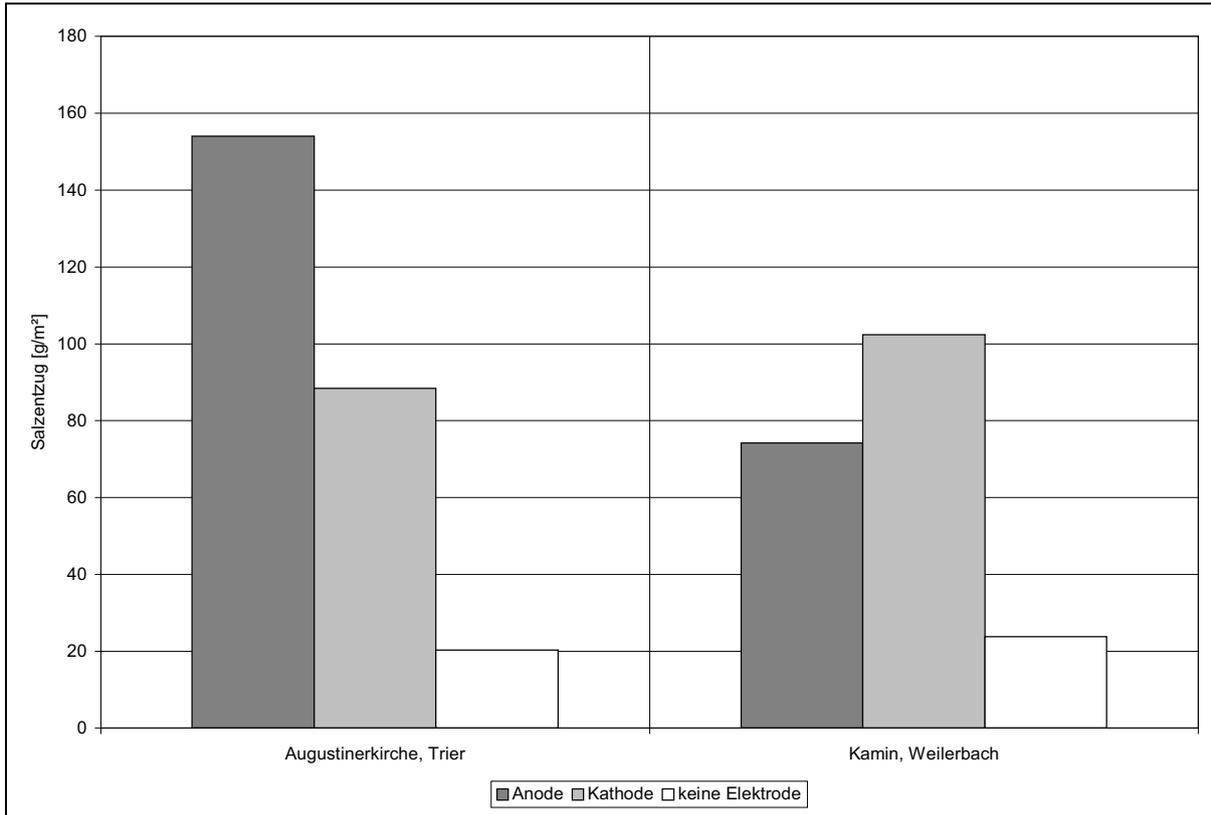


Abb. 14: Salzentzug durch die elektrochemisch unterstützte Komresse.

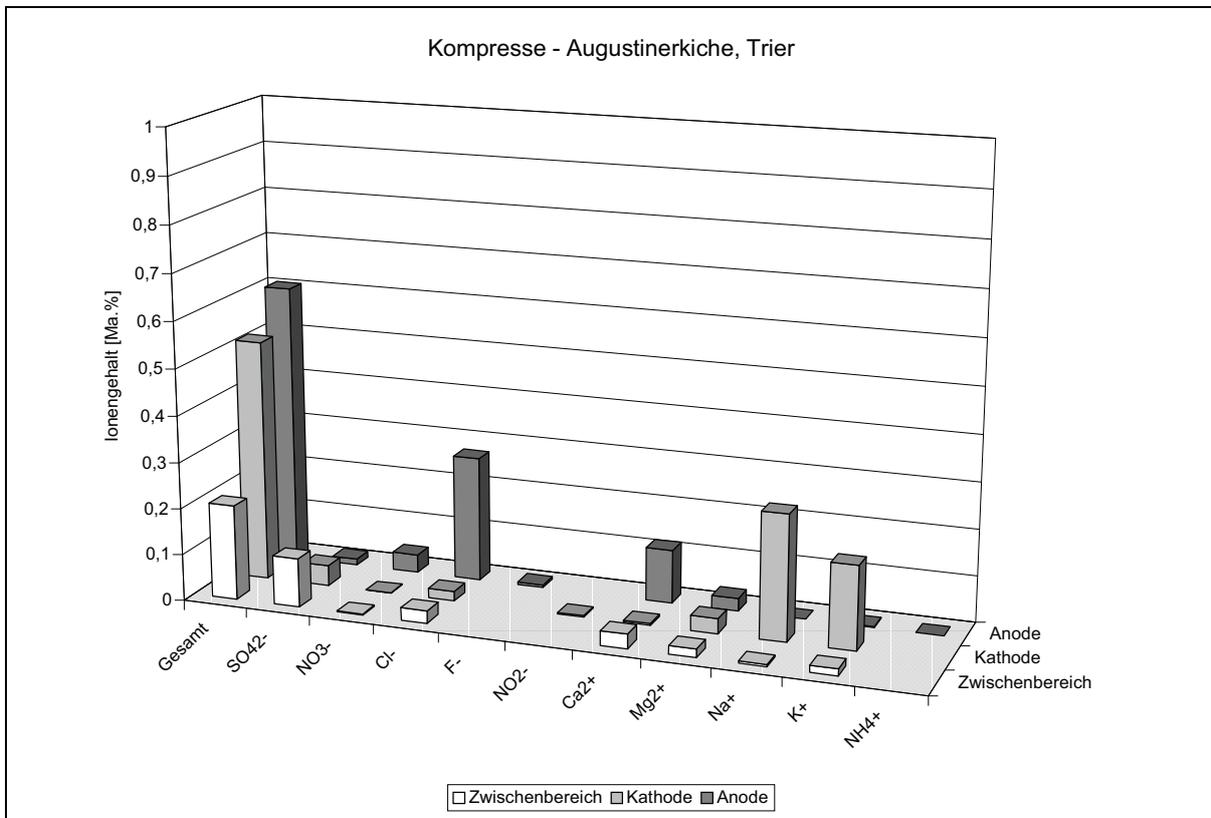


Abb. 15: Durchschnittliche Ionengehalte der Komresseproben von der Augustinerkirche in Trier entnommen aus dem Bereich beider Elektroden sowie den Zwischenräumen.

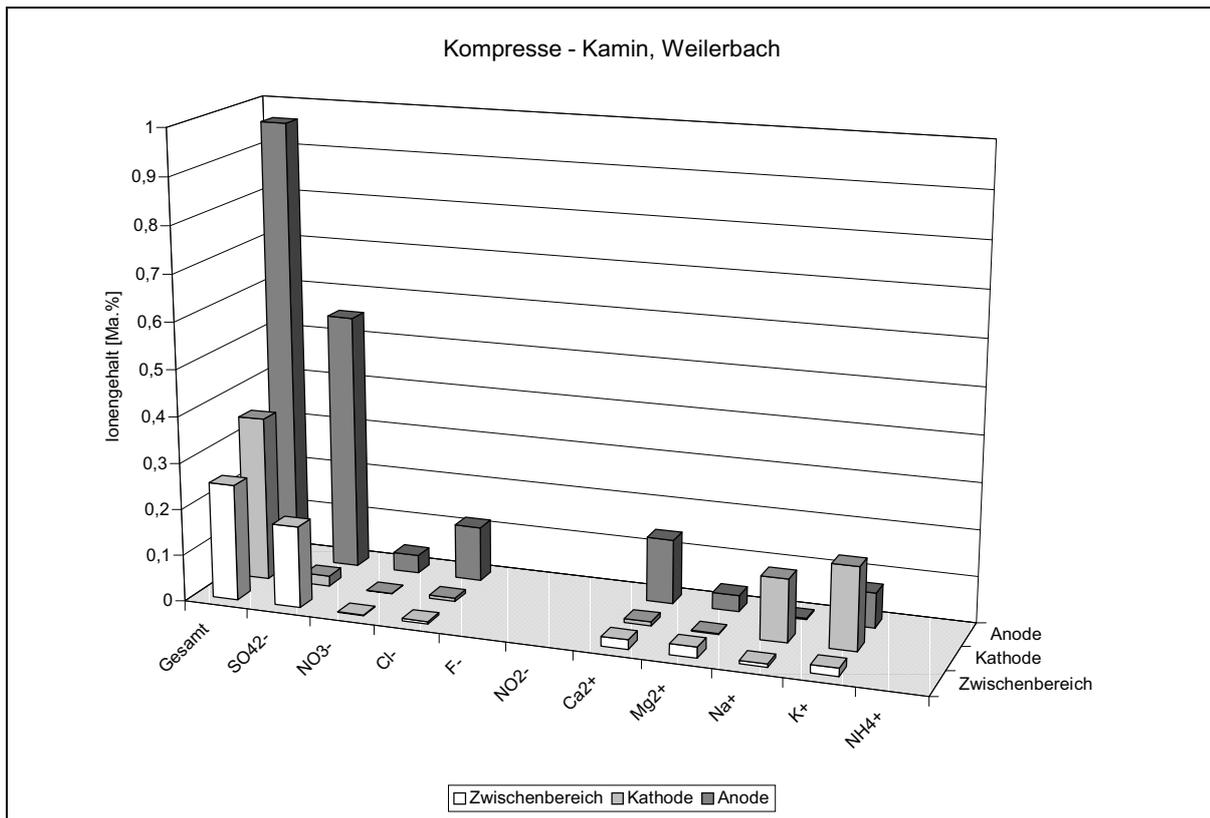


Abb. 16: Durchschnittliche Ionengehalte der Kompressenproben des Kamins in Weilerbach aus dem Bereich beider Elektroden und den Zwischenräumen.

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

Bewertung

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

Die hohe Treibspannung und das Vorhandensein von Sulfat im Mauerwerk verursachte im Bereich der Elektroden die Zersetzung von Wasser in H^+ und OH^- -Ionen (NÄGELE, 1991). Dadurch veränderte sich der pH-Wert der Kompressen in den stark sauren (pH 3) beziehungsweise stark alkalischen Bereich (pH 10). Bei säure- oder laugenempfindlichen Untergründen (Mörtel,

Farbfassungen) muss daher mit Substanzschäden gerechnet werden. Zudem können durch die sauren Lösungen schwer lösliche Verbindungen im Mauerwerk mobilisiert werden.

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

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

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

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

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

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

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

Schlussfolgerungen

Für die Durchführung von Kompressenentsalzungen sind einige Voraussetzungen zu beachten:

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

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

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

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

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

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

Wirksamkeitsunterschiede von Materialien und Methoden

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

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

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

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

Literatur

- Drobig, A., Lesnych, N. & Venzmer, H. (2001): *Bakterieller Nitratabbau an Ziegeln im Labor – Basis für eine umwelt- und substanzschonende Methode der Mauerwerksentsalzung?* In: Venzmer, H. (Hrsg.): *Altbauinstandsetzung - Mikroorganismen und Bauwerksinstandsetzung*. Sonderheft Dahlberg-Kolloquium. Verlag Bauwesen Berlin. S. 25-33.
- Egloffstein, P. & Auras, M. (2000): *Kompressenentsalzung – Ein Materialvergleich*. Festschrift 10 Jahre Institut für Steinkonservierung e.V., Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz, S. 63 – 74.
- Ettl, H. & Krus, M. (2001): *Salzreduzierung mit verschiedenen Kompressen am Schloss Frankenberg und begleitende rechnerische Untersuchungen*. In: Venzmer, H. (Hrsg.): *Altbauinstandsetzung 2*. FAS-Schriftenreihe, Heft 12, Verlag Bauwesen Berlin, S. 187 - 196.
- Ettl, H. & Schuh, H. (1992): *Entsalzungsversuche an Sandsteinen - Umweltbedingte Gebäudeschäden am Zisterzienserkloster Eberbach*. Die Geowissenschaften 10, S. 285 – 287.
- Friese, P. & Protz, A. (1999): *Salze im Mauerwerk – Möglichkeiten zur Entsalzung und Salzumwandlung*. In: Venzmer, H. (Hrsg.): *Entfeuchtung – Entsalzung*. FAS-Schriftenreihe H. 10, Verlag Bauwesen, Berlin.
- Goretzki, L. (1996): *Verfahren zum Entsalzen von Naturstein, Mauerwerk und Putz*. WTA-Schriftenreihe Heft 8. Aedificatio Verlag, Freiburg.
- Grassegger, G. & Adam, S. (1994): *Untersuchungen zur Entwicklung der mikroskopischen Gefüge von Kieselsäureester-Gelen in Porenräumen mit und ohne Salz,- Feuchtestöreffekte*. In: Snethlage, R. (Hrsg.): *Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall - Steinkonservierung*, Band 4 - 1992, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 127 - 133.
- Nägele, E. (1991): *Praktische Aspekte der elektrischen Trocknung und Entsalzung poröser mineralischer Baustoffe, Teil 1*. Bautenschutz und Bausanierung 17, 7/91, S. 128-129.
- Sattler, L. (1992b): *Steinfestigung an salzbelasteten Gesteinen*. In: Snethlage, R. (Hrsg.): *Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall - Steinkonservierung*, Band 2 - 1990, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 165-168.
- Venzmer, H., Lesnych, N. & Wolko, F. (1999): *Positive und negative Argumente zum Einsatz der Kerasan-Entsalzung am Schnickmannspeicher in Rostock*. In: Venzmer, H. (Hrsg.): *Entfeuchtung/Entsalzung*. FAS-Schriftenreihe, Heft 10. Verlag Bauwesen Berlin. S. 231-240.
- Wilimzig, M. (1996): *Desalting of nitrates by denitrification*. In: *Le dessalement des matériaux poreux*. 7^{es} Journées d'études de la SFIIC, Poitiers, 9-10 mai 1996.
- Windsheimer, B., Snethlage, R. & Wihr, R. (1991): *Die Entsalzung von Steindenkmälern*. Bayer. Landesamt für Denkmalpflege, München, Forschungsbericht 4.
- WTA-Merkblatt E 3-13-01/D (2001): *Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen*. WTA Publications, Freiburg.

Danksagung

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

