

Hans Ettl

# **Salzreduzierung mit verschiedenen Kompressen am Schloss Frankenberg und begleitende rechnerische Untersuchungen**

## **1 Einleitung**

Bei vielen Entsalzungsmaßnahmen werden keine naturwissenschaftlichen Untersuchungen wie Messung des Salzgehalts etc. durchgeführt. Dies liegt zum Teil an fehlenden Finanzmitteln oder der Entnahme von geeigneten Proben sind aus Gründen des Denkmalschutzes enge Grenzen gesetzt bzw. sie wird gänzlich ausgeschlossen. Um dennoch Aussagen zur Salzverminderung mittels Kompressenentsalzung zu bekommen, wurde im Rahmen eines DBU-Projekts neben der Erfassung der Stoffkennwerte und der Salzgehalte im Gestein erstmals versucht, die Eignung der unterschiedlichen Kompressenmaterialien rechnerisch abzuschätzen. (Im Weiteren ist mit Entsalzung immer eine Salzreduzierung gemeint.) Untersucht wurden dabei Bentonit- und Kalkputz-Kompressen, mit denen nach der Bestimmung der Stoffkennwerte von Mai bis November 2000 Musterflächen an dem zu entsalzenden Schilfsandstein der Vorderburg des Schlosses Frankenberg angelegt worden sind.

## **2 Zustand des Mauerwerks**

Bei der Untersuchung verschiedener Mauerwerksabschnitte an der Vorderburg des Schlosses Frankenberg (1) zeigt sich, dass neben Chlorid- und Sulfatverbindungen in überwiegender Weise die Versalzung des Mauerwerks durch Kaliumnitrat (Nitrokalit) gegeben ist. Die Salzmenen sind mit bis zu 4 M.-% im Sandstein und über 8 M.-% im Mörtel außerordentlich hoch. (Bereits bei einem Salzgehalt von 1,0 M.-% spricht man von einer hohen Salzbelastung).

Eine wesentliche Ursache für die starke Versalzung ist in der langjährigen Nutzung des Gebäudes als Stall zu suchen. Die Ausscheidung der Tiere in Verbindung mit Wassereintrag durch Reinigung des Stalls etc. haben zuerst zur starken Versalzung des Mauerwerks im Sockelbereich geführt. Weitere Feuchte und Salznachschub ließen die Schadstoffe in immer höhere Bereiche des Mauerwerks aufsteigen. Die Hygroskopizität von Nitrokalit verursachte eine Durchfeuchtung in Mauerwerkshöhen, die durch aufsteigende Feuchte nicht mehr erreicht werden (ca. 6 m über GOK), (siehe Abb. 1).

*Abb. 1:* Östliche Ansicht der Vorderburg des Schlosses Frankenberg. Erkennbar sind die durch Salze hervorgerufenen Feuchtflecken sowie die Musterflächen links vom Turm.

Die starke Versalzung hat insbesondere im Sockelbereich durch stets wiederkehrende Lösungs- und Kristallisationsvorgänge zur Gefügebelastung und damit zum Absanden der Werksteine geführt. Die stärkere Verwitterung an den Grenzen zum Mörtel und die daraus resultierende Abrundung der Werksteine ist durch die schnellere Wasseraufnahme und Abgabe des Fugenmörtels begründet, die an diesen Stellen lokale, längerfristig schädliche Feuchteanreicherungen bewirkt (2).

### **3 Applikation und Probenahmen am Schloss Frankenberg**

Die Ostfassade der so genannten Vorderburg des Schlosses Frankenberg stellt für die genannte Aufgabenstellung ein günstiges Experimentierfeld dar. Einerseits existiert eine deutliche Versalzung des Sandsteins bis zu 4 M.-%, andererseits handelt es sich in erster Linie um leicht lösliche Nitratverbindungen. Zugleich kann damit ein Gestein hinsichtlich einer Kompressenanwendung untersucht werden, dessen  $w$ -Werte zwischen 1 und 3  $\text{kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$  liegen, das also als relativ schwach saugender Baustoff einzuordnen ist.

Der erste Kompressenauftrag in Frankenberg wurde im Mai 2000 im Anschluss an eine Vornässung der Probenfläche durchgeführt. Im Bereich der vermutlich stärkeren Versalzung, kenntlich an Salzausblühungen und „feuchtem Aussehen“ (Abb. 1) wurden drei Musterflächen, jede ca. 1  $\text{m}^2$  groß, in 2 bis 2,5 m Höhe angebracht und beprobt. Hierzu wurde jeweils ein Mauerstein ausgewählt, der groß genug war, um mehrere Bohrkerne (nach den einzelnen Kompressendurchgängen) für die Untersuchungen zu liefern. Das Kompressenmaterial wurde mit einer kleinen Putzförderpumpe aufgebracht. Die Kompressendicke schwankt zwischen 2 und 5 cm, je nach Untergrund. Für die Untersuchung wurden Bohrkerne mit 20 bis 25 cm Länge entnommen. Als Kompressenproben sind Quadrate mit 10 cm Seitenlänge herausgeschnitten worden, um die Salzgehalte bestimmen zu können. Nach Auftrag der Kompressen wurden die Musterflächen mit einer diffusionsoffenen Folie ( $s_d$ -Wert ca. 2 cm) abgedeckt. Sie verhindert den direkten Einfluss von Niederschlag etc., lässt aber durch ihren niedrigen  $s_d$ -Wert das Verdunsten der Feuchtigkeit in der Komresse – als „Motor“ für den Salztransport erforderlich – in ausreichender Weise zu. Parallel zu den Entsalzungsversuchen wurden die wesentlichen Wetterdaten in Frankenberg an der Versuchswand mit Hilfe einer Computerwetterstation registriert und in das Computerprogramm zur Berechnung von Wärme- und Feuchtetransportvorgängen WUFI (3) übernommen, so dass mit realen Daten die verschiedenen Simulationen zum Feuchte- bzw. Salztransport durchgespielt werden können.

Da die zwei auf Bentonit aufgebauten Kompressen ein sehr ähnliches Verhalten aufweisen, werden im Folgenden nur die Ergebnisse einer Bentonit-Komresse (Komresse 1; Bentonit-Zellulose-Poraver-Sand) mit denen des Kalkputzes (Komresse 3) verglichen.

### **4 Salzgehalt des Gesteins und des Fugemörtels (Ausgangszustand)**

Um den Ausgangswert der Versalzung (Nullwert) zu bestimmen, wurden Proben in stark und schwach versalzten Bereichen des Mauerwerks entnommen. Die Salzgehalte liegen im schwach versalzten Bereich bei 0,3 M.-% in der oberflächennahen Zone und nehmen in der Tiefe (90–100 mm) auf 0,06 M.-% ab. Im stark versalzten Abschnitt (im Bereich der später angelegten Musterflächen) beträgt der Salzgehalt in 0–10 mm Tiefe 6,5 M.-% (!) und geht in 80–90 mm Tiefe auf 2,0 M.-% zurück. Das wesentliche Salz ist Kaliumnitrat ( $\text{KNO}_3$ ); untergeordnet treten vor allem in Bereichen hoher Salzgehalte Sulfat- und Chloridverbindungen hinzu. Der Salzgehalt des Mörtels liegt zwischen 5,0 und 5,8 M.-% und enthält im Wesentlichen – entsprechend den Ergebnissen beim Sandstein – Nitratverbindungen. Zusätzlich treten deutliche Mengen an Chlorid- und Sulfatanteilen hinzu.

## 5 Rechnerische Untersuchungen

Mit Hilfe eines Computerprogramms zur Berechnung von Wärme- und Feuchtetransportvorgängen (3) – für die Berechnung von Salztransportvorgängen existieren noch keine Berechnungsprogramme – sollte im Vorfeld einer Entsalzungsmaßnahme durch Kompressen eine vergleichende Abschätzung der Salzverminderung erfolgen. Die Entsalzungswirkung einer Komresse beruht darauf, dass aus dem Mauerwerk in die Komresse mit dem Wasser das Salz kapillar transportiert wird („Huckepacktransport“ (4)). Die für die Berechnungen erforderlichen feuchtetechnischen Materialkennwerte wurden für das Kompressenmaterial und den Sandstein bestimmt. Abb. 2 zeigt im Vergleich die Feuchtespeicherfunktion der Komresse 1 und Komresse 3 (Kalkputz). Diese Feuchtespeicherfunktion setzt sich aus der Sorptionsisotherme für den hygroskopischen Feuchtbereich und den Ergebnissen der Saugspannungsmessung für den Kapillarwasserbereich zusammen (7). Der Feuchtetransport zwischen in Kontakt miteinander stehenden kapillaraktiven Materialien (hier Sandstein und Komresse) kann nur bei Kenntnis dieser Feuchtespeicherfunktion korrekt berechnet werden (7). In Tabelle 1 sind die wesentlichen Kennwerte aufgelistet. Komresse 1 und Komresse 3 unterscheiden sich vor allem in der freien Wassersättigung.

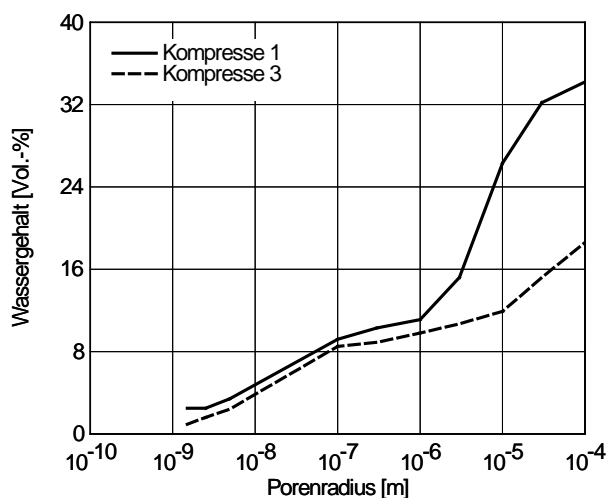


Abb. 2: Feuchtespeicherfunktion der Komresse 1 verglichen mit Komresse 3

Tabelle 1: Zusammenstellung der feuchtetechnischen Materialkennwerte

Materialkennwert		Komresse 1	Komresse 3	Sandstein
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	1000	1600	2000
Porosität	[Vol.-%]	35	32	20
freie Sättigung	[Vol.-%]	34	18,6	17,2
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl		12	12	40

( $\mu$ -Wert)	[-]			
Wasseraufnahmekoeffizient				2,75 <sup>1)</sup>
(w-Wert)	[kg/m <sup>2</sup> √h]	19,5	19	1,2 <sup>2)</sup>
				0,1 <sup>3)</sup>

- 1) Originalsandstein
- 2) Widerstandsschicht zwischen Kompresse 1 und Sandstein
- 3) Widerstandsschicht zwischen Kompresse 3 und Sandstein

Frühere Untersuchungen (5) haben gezeigt, dass bei gewissen Kombinationen zwischen Putz und Untergrundmaterial der Kapillartransport beim Übergang zwischen den beiden Medien erheblich behindert wird. Inwieweit dies hierbei auch der Fall ist, kann durch einen einfachen Laborversuch geklärt werden. Hierzu wird mit einer Probe aus dem Sandstein und dem jeweiligen Kompressenmaterial ein Saugversuch durchgeführt. Bei der Modellierung dieses Laborversuchs wird bei der Berechnung zwischen Kompresse und Sandstein von einer 1 mm dicken "Widerstandsschicht" – mit den gleichen Materialeigenschaften wie das Untergrundmaterial – ausgegangen. Die Kapillartransportkoeffizienten dieser "Widerstandsschicht" werden nun soweit reduziert, bis der berechnete Verlauf der Wasseraufnahme den Messungen entspricht (siehe Abb. 3). Während der Sandstein einen Wasseraufnahmekoeffizienten von 2,75 kg/m<sup>2</sup>√h besitzt, reduziert sich dieser in der "Widerstandsschicht" von Kompresse 1 auf etwa 1,2 kg/m<sup>2</sup>√h (Tabelle 1). Bei dem Kalkputz (Kompresse 3) ergibt sich dagegen ein wesentlich kleinerer Wert von 0,1 kg/m<sup>2</sup>√h.

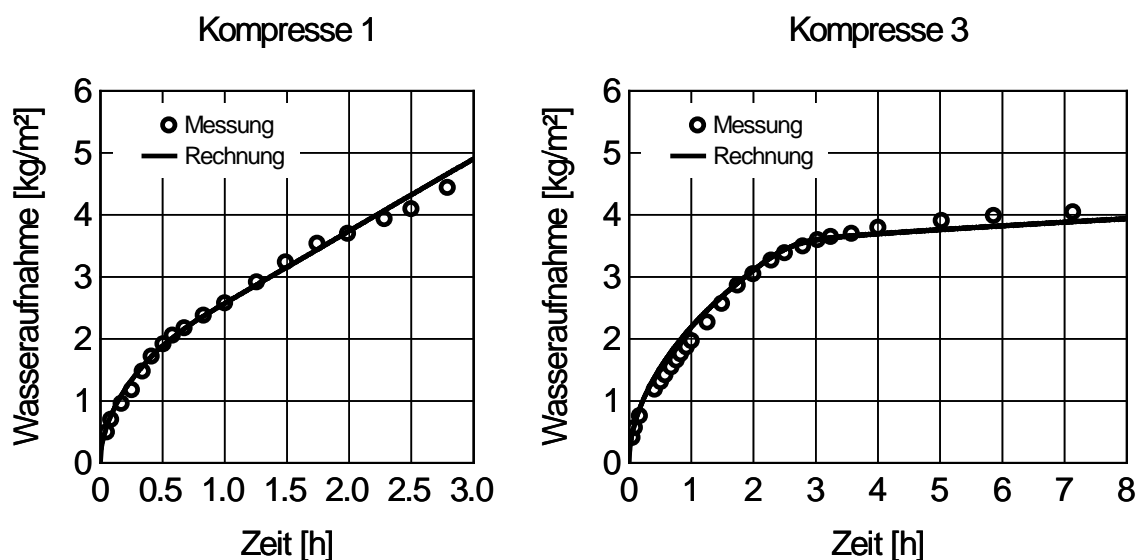


Abb. 3: Wasseraufnahme von Proben, bestehend aus Sandstein mit Kompresse 1 (links) bzw. Kompresse 3 (rechts)

Für die Abschätzung des Salztransports wird für beide Kompressenmaterialien der kapillare Feuchtetransport über die jeweilige "Widerstandsschicht" berechnet. Dabei spielt natürlich auch die erhebliche Vornässung der Wand vor Aufbringen des Kompressenmaterials eine Rolle, da dadurch mehr Wasser über die Schichtgrenze gehen kann als insgesamt anfänglich in der Komresse enthalten war. Wie in Abb. 4 oben am Beispiel der Komresse 1 zu erkennen ist, findet zuerst ein Feuchtetransport von der gesättigten Komresse in das Gestein statt. Nach etwa fünf Tagen kehrt sich die Transportrichtung um. Geht man davon aus, dass sich das Salz relativ schnell im Wasser löst (hier handelt es sich hauptsächlich um leicht lösliche Nitrate), wird ab diesem Zeitpunkt über die Widerstandsschicht Salz in das Kompressenmaterial eingebracht. Innerhalb von etwa 60 Tagen werden somit etwa  $15,6 \text{ kg/m}^2$  Wasser kapillar in die Komresse transportiert. Beim Kalkputz wird dagegen, wie aufgrund der extremen "Widerstandsschicht" zu erwarten, eine deutlich geringere Menge Wasser in die Gesteinsschicht transportiert. Wie aus Abb. 4 ersichtlich, werden lediglich  $7,1 \text{ kg/m}^2$  Wasser in den Kalkputz befördert.

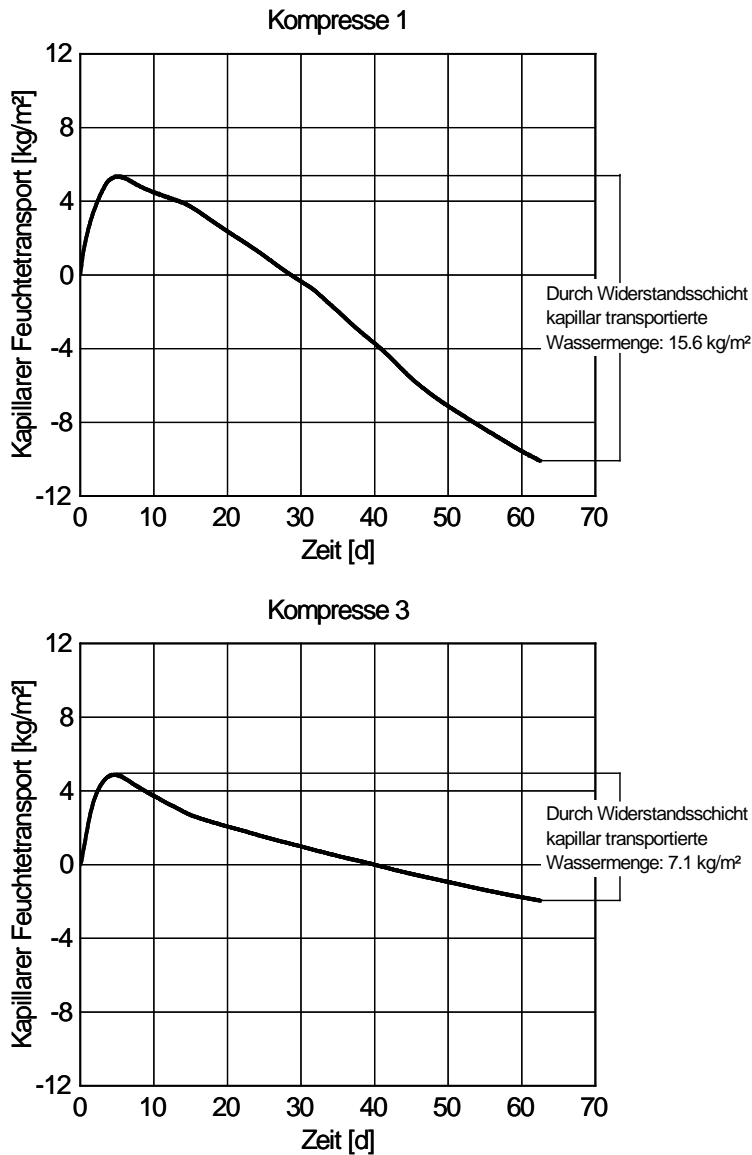


Abb. 4: Berechneter kapillarer Feuchtetransport über die Widerstandsschicht zwischen Sandstein und Kompressen  
 oben: Für Kompressen 1 (Bentonit-Kompressen)  
 unten: Für Kompressen 3 (Kalkputz)

## 6 Ergebnisse an den Musterflächen

### 6.1 Salzverteilung im Sandstein nach der Entsalzung

Der Salzgehalt des Sandstein an der Musterfläche 1 ist durch die Kompressenbehandlung im untersuchten Tiefenbereich (0–200 mm) zum Teil deutlich reduziert worden (Abb. 5). Der ursprüngliche Salzgehalt von 3,2 M.-% im Bereich 0–25 mm geht nach dem ersten Entsalzungsdurchgang auf 2,1 M.-% zurück. In den nachfolgend tieferen Bereichen schwankt der Salzgehalt zwischen 1,5 und 1,2 M.-%. Der zweite Entsalzungsdurchgang hat überraschenderweise

kaum eine Wirkung auf den Salzgehalt des Gesteins, nur bis in eine Tiefe von ca. 80 mm fällt der Salzgehalt etwas ab, während er in größeren Tiefen gleichbleibt oder sogar etwas ansteigt. Erst die Anwendung eines dritten Durchgangs bewirkt nochmals eine deutliche Reduzierung des Salzgehalts über den gesamten beprobten Tiefenbereich auf durchschnittliche 1,2 M.-%.

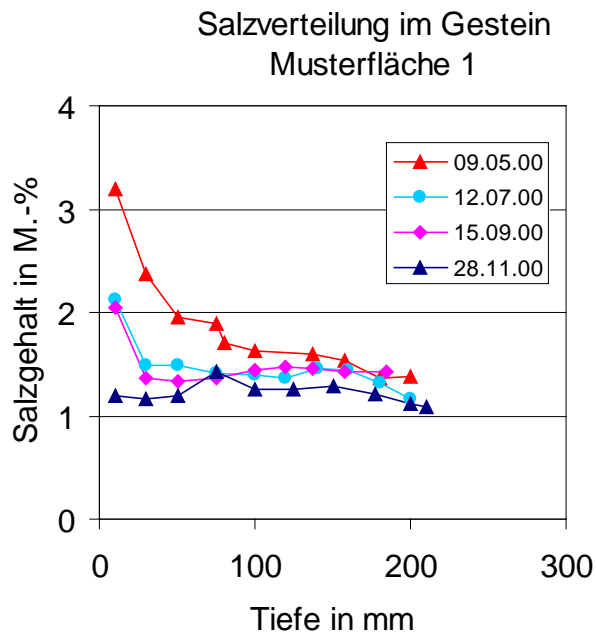


Abb. 5: Salzverteilung an der Musterfläche 1 zu den verschiedenen Probenahme-Terminen (Nullmessung am 09. 05. 00)

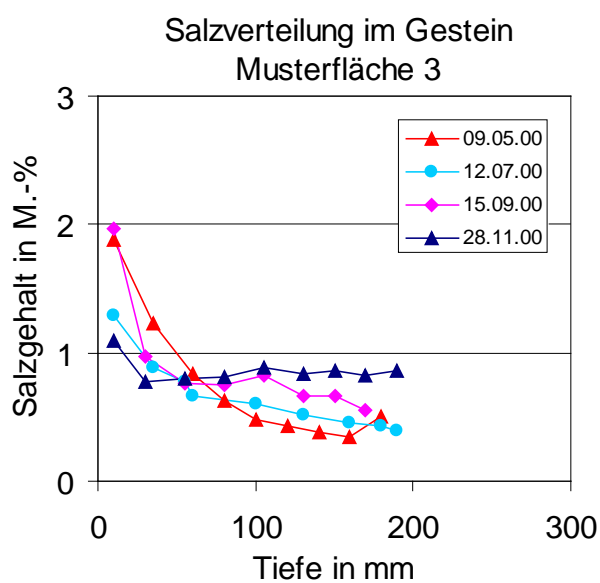


Abb. 6: Salzverteilung an der Musterfläche 3 zu den verschiedenen Probenahme-Terminen  
(Nullmessung am 09. 05. 00)

Die Ergebnisse der 3. Musterfläche unterscheiden sich grundsätzlich von denen der Musterflächen 1 (Abb. 6). Der als Kompressen verwendete Kalkputz erniedrigt zwar die Salzgehalte des Sandsteins von ursprünglich 1,9 M.-% in der Oberflächennzone auf 1,1 M.-% und auch im weiteren Tiefenverlauf bis ca. 50 mm wird der Salzgehalt auf ca. 0,8 M.-% reduziert, aber in tieferen Lagen steigt der Salzgehalt deutlich über die Werte vor der Kompressenbehandlung an.

Aufgrund der relativ geringen Salzanteile in den Kalkputzkompressen während des gesamten Versuchszeitraums (siehe Kapitel 6.2) ist davon auszugehen, dass ein Teil der Salze nicht „herausgezogen“, sondern im Gegenteil tiefer in den Stein transportiert worden ist.

## 6.2 Salzgehalte in den Kompressen

Die Salzgehalte der Kompressen spiegeln den vorgefundenen Sachverhalt bei den Gesteinen wider. Nach den drei Durchgängen wurde durch die Bentonit-Kompressen (Musterfläche 1) ein Gesamtsalzgehalt von ca. 1.800 g/m<sup>2</sup> extrahiert, das wesentliche Salz ist Nitrokalit (Abb. 7). Der Wirkungsgrad der Kalkputzkompressen (Musterfläche 3) bleibt mit insgesamt ca. 700 g/m<sup>2</sup> entfernter Salze dagegen vergleichsweise gering (Abb. 8).

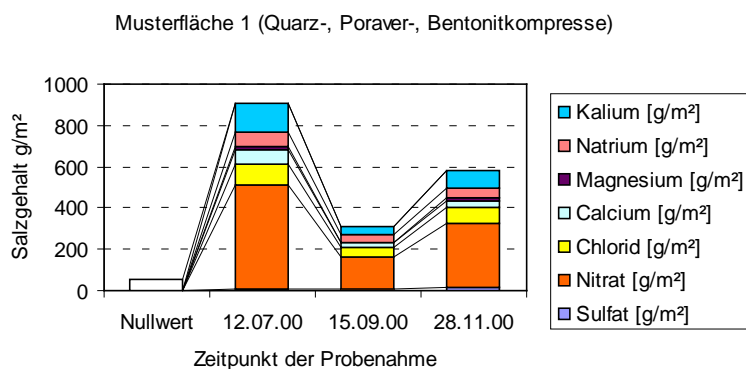


Abb. 7: Mit Bentonit-Kompressen (Musterfläche 1) konnten nach drei Durchgängen insgesamt ca. 1.800 g/m<sup>2</sup> Salz entzogen werden



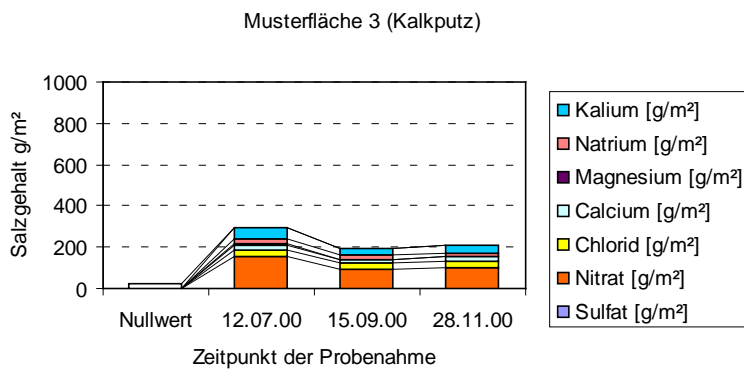


Abb. 8: Die Kalkputz-Kompressen (Musterfläche 3) konnten aus dem Sandstein nach drei Durchgängen insgesamt lediglich 700 g/m<sup>2</sup> Salz ziehen

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die beiden bentonithaltigen Kompressen eine deutliche Salzreduzierung bewirkt haben, während der Kalkputz als Komresse nur etwa ein Drittel der Salzmenge entziehen konnte. Außerdem wurde beim Kalkputz zum Teil auch eine Umverteilung des löslichen Salzgehalts in größere Tiefen bewirkt. Diese Ergebnisse werden mit der Ionenbilanz zwischen Sandsteinmauerwerk und Kompressen bestätigt.

Die begleitenden rechnerischen Untersuchungen, zeigen, dass trotz Verwendung stark vereinfachter Ansätze für den Salztransport mit den Messungen gut übereinstimmende Ergebnisse zu erhalten sind. Voraussetzung für derartige Berechnung ist ein Mindestsatz an Materialkennwerten. Dazu gehören die Dampfdiffusionswiderstandszahl, die freie Wassersättigung und der Wasseraufnahmekoeffizient des Mauerwerks und der Kompressenmaterialien. Für die Bestimmung der notwendigen Feuchtespeicherfunktionen kann anstatt der aufwendigen Saugspannungsmesstechnik auch ein Approximationsverfahren (6) verwendet werden, das lediglich die Sorptionswassergehalte bei 80 und 95% relativer Feuchte erfordert. Für jede Kombination Komresse/Mauerstein muss außerdem mit Hilfe des beschriebenen einfachen Laborversuchs die Ausbildung der kapillaren Widerstandsschicht ermittelt werden. Mit derartigen Berechnungen hat man die Möglichkeit, vorab vergleichende Untersuchungen zur Auswahl und Wirksamkeit des Kompressenmaterials durchzuführen und ist nicht allein auf langfristige Vor-Ort-Untersuchungen angewiesen. Außerdem lassen diese Berechnungen Hinweise auf optimale Anwendungszeiten für die einzelnen Entsalzungsdurchgänge zu.

### Zusammenfassung

Neben Entsalzungsversuchen mit Bentonit- und Kalkputz-Kompressen wurden begleitend rechnerische Untersuchungen durchgeführt, um erstmals zu versuchen, vorab die Wirksamkeit unterschiedlicher Kompressenmaterialien abzuschätzen. Die Berechnungen sowie die Messungen zeigen, dass mit allen Kompressen Salze aus dem Sandsteinmauerwerk entfernt werden können. Die Wirksamkeit des Kalkputzes ist allerdings weitaus geringer als die der Bentonit-Kompressen, mit

denen bis zu  $1,8 \text{ kg/m}^2$  Salz aus dem Mauerwerk gezogen werden können. Der Grund hierfür liegt, wie die Berechnungen zeigen, im Wesentlichen am kapillaren Übergangswiderstand Kalkputz-Sandstein, der deutlich höher ist als bei den Bentonit-Kompressen.

Die Ergebnisse belegen, dass auch bei schlecht saugendem Sandstein eine wirksame Salzreduzierung durchgeführt werden kann. Voraussetzung dafür sind aber relativ leicht lösliche Salze, die oberflächlich angereichert sind.

Derartige Maßnahmen können jedoch nie mit sinnvollem Aufwand zu einer vollständigen Entsalzung des gesamten Mauerwerks führen, sondern lediglich den Salzgehalt in den oberflächennahen Zonen deutlich reduzieren. Diese Reduzierung bildet die Grundlage für erfolgreiche Konservierungsmaßnahmen wie zum Beispiel Steinfestigung und Hydrophobierung. Beim Aufbringen eines Putzes wird damit die zu erwartende Standzeit wesentlich erhöht.

## **7 Literatur**

- (1) Ettl, H.; Schuh, H.: Feuchte- und Salzbelastung an der Vorderburg des Schlosses Frankenberg, unv. Gutachten vom 29.5.1998.
- (2) Künzel, H. M.; Kießl, K.; Krus, M.: Feuchtemigration und langfristige Feuchteverteilung in exponierten Natursteinmauern. In: Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinerfall – Steinkonservierung, Bd. 6, 1994–1996 (1998), S. 149–156.
- (3) Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994.
- (4) Krus, M.; Holm, A.; Wardzikowski, P.: Bestimmung der Wasser- und Salzgehaltsverteilungen durch Kombination von NMR- und  $\gamma$ -Durchstrahlungsmessungen. 9. Feuchtetag 1997, Weimar, Proceedings, 17.–18. Sept. 1997, S. 203–217.
- (5) Holm, A.; Krus, M.; Künzel, H.M.: Feuchtetransport über Materialgrenzen im Mauerwerk. In: Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 2, H. 5, 1996, S. 375–396.
- (6) Holm, A.: Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzepts. Dissertation, Universität Stuttgart, 2001.
- (7) Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoefizienten Poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Dissertation, Universität Stuttgart, 1995.