

Roland Lenz

## Systemoptimierte Salzminderungskompressen (Material – Wirkung)

### Einleitung

Die Reduzierung von löslichen Salzen aus porösen Gefügen stellt eine der wichtigsten konservatorischen Maßnahmen bei der Behandlung von Wandmalereien und Architektur-oberflächen dar. Durch Lösungsprozesse und anschließende Auskristallisierung von Salzen und Salzgemischen entstehen Gefügeschäden oder Ausblühungen. Zudem werden durch Porenfüllungen mit Salzen und Salzlösungen wichtige konservatorische Maßnahmen erschwert oder unmöglich gemacht. Die Anwendung von Salzminderungskompressen ist derzeit – neben präventiven Maßnahmen zur Klimakontrolle<sup>1</sup>, um Aus- und Umkristallisationen zu verhindern, oder der Umwandlung in schwer lösliche Salze – eine der gängigen Methoden zur Salzreduktion.

Die Forschungen der letzten Jahrzehnte befassten sich intensiv mit Salzen<sup>2</sup>, Salzgemischen<sup>3</sup> sowie der Konservierung von Objekten, die durch Salze hervorgerufene Schäden aufweisen. Die Extraktion von Schadsalzen aus baugebundenen Objekten, stellt Restauratoren und Naturwissenschaftler nach wie vor bei jedem Projekt vor neue Herausforderungen. Die Forschungen der letzten Jahre zeigen hierbei „neue“ Wege auf, um zielgerichteter entsprechende Problemstellungen zu bewältigen. Insbesondere ist in diesem Zusammenhang das EU-Projekt DESALINATION<sup>4</sup> zu nennen.

Die publizierte Umfrage unter Restauratoren zur derzeitigen Verwendung von Kompressen<sup>5</sup> zeigt, dass unterschiedlichste Herangehensweisen bei Reduzierungsmaßnahmen von Salzen (Auswahlkriterien, Kompressenmaterialien, Anzahl der Anwendungszyklen, Häufigkeit von Salzanalysen etc.) vorhanden sind.

Bereits die Benennung der Maßnahme hat sich im Laufe der letzten Jahre verändert. War früher der Begriff „Entsalzung“ gebräuchlich, so hat sich in den letzten Jahren „Salzminderung“ (bzw. „Salzreduzierung“) durchgesetzt. Weitere Entwicklungen sind auch in den kommenden Jahren zu erwarten, insbesondere in der Abstimmung der Kompressen auf die jeweilige konservatorische Situation.

Dieser Artikel gibt einen Überblick zur Anwendung von Salzminderungskompressen aus restauratorischer Sicht und geht auf eine einfache Methode zur Überprüfung der Wirkungsweise von Kompressen in Abhängigkeit zum Substrat ein.

### Anforderungsprofil von Kompressen

Die Erwartungen an Salzminderungskompressen sind je nach Anwendung hoch und nicht immer zu erfüllen. Die maßgeblichsten Anforderungen sind:

- Befeuchtung des Substrats und Lösen der Salze, bei gleichzeitig gutem Wasserrückhaltevermögen, um die Umlagerung von Salzen in tiefere Schichten des Substrats zu verhindern
- Umlagerung der Salze aus dem Objekt in oder auf die Komresse und somit Salzminderung im Substrat (Mörtel, Stein, Wandmalerei, etc.)
- eventuell positive Ionenaustauschfähigkeit bzw. Adsorptionseigenschaften einzelner Kompressenbestandteile
- keine Rückwanderung der Salzionen in das Substrat während der Trocknung
- keine Kontamination mit löslichen Fremdionen
- möglichst neutraler pH-Wert
- guter Kontakt zur Oberfläche und geringe Schrumpfung
- Schutz der Oberfläche vor weiteren Salzs Schäden (z. B. bei Dauerfeuchte und nicht abreißendem Wassertransport)

Neben den gewünschten rein stofflichen Eigenschaften sind bei einer Konservierung auch Anforderungen an die Applikation, Wartung und Abnahme von Kompressen für eine Entscheidung relevant:

- gute Verarbeitbarkeit (händisch, sprühen, etc.)
- guter Kontakt zur Oberfläche des Substrats (ohne schädigende Wirkung)
- Möglichkeit der Rückformung von empfindlichen Oberflächen bei der Applikation
- Eignung für längere Standzeiten (z. B. Resistenz gegen mikrobiellen Abbau)
- Beobachtung von Salzen an der Kompressenoberfläche bei längeren Standzeiten
- Oberflächengestaltung bei Langzeitkompressen (entscheidend für Akzeptanz beim Auftraggeber)
- gute Reversibilität (rückstandslose Abnahme ohne Beschädigung des Objektes)
- „geringe“ Kosten in Korrelation zur Salzminderungseffizienz

1 LAUE/SCHAAB 2011.

2 Eine ausführliche Bibliographie zum Thema Salz in der Konservierung ist unter <http://193.175.110.91/salzwiki/index.php/Startseite> (Zugriff am 20.12.2016) aufgeführt.

3 STEIGER 2003.

4 HERITAGE/ HERITAGE/ZEZZA 2013a.

5 HERITAGE et al. 2013.

## Grundprinzipien des Wasser- und Salztransports in Kompressen

Ziel der Salzreduzierung ist die Lösung der Salze in Kationen und Anionen in Wasser im porösen Baustoff (Substrat) und deren Transport in die Komresse und deren Oberfläche. Die Mobilisierung und der Transport von Salzionen in wässriger Lösung werden hierbei maßgeblich von der Diffusion (Konzentrationsausgleich) und der Advektion (Kapillartransport) bestimmt. Bei der Diffusion wird das Konzentrationsgefälle von Ionen im mit Wasser gefüllten Porenraum ausgeglichen und es entsteht eine einheitliche Ionenkonzentration in der wässrigen Lösung. Die Advektion bewirkt hingegen den Transport des Wassers durch kapillare Kräfte in alle Richtungen. Ein Feuchtestrom entsteht, wenn die Kapillarität im Stoff zunimmt oder an der Oberfläche Wasser verdunstet und Platz für nachkommendes Wasser freigibt. Dieser Kapillarstrom bleibt solange bestehen, wie die „kapillaren Leitungen“ mit Wasser aus dem Untergrund gespeist werden. Der Kapillarstrom bricht ab, wenn nicht mehr genügend Wasser nachkommt oder die „kapillare Wirkung“ der Stoffe nicht mehr gegeben ist bzw. der Kapillarsog des angrenzenden Materials größer ist und dort das Wasser abtransportiert wird. Die weitere Trocknung des noch vorhandenen Feuchtefilms erfolgt über die Verdunstung in Form von Wasserdampf im nun luftzugänglichen Porenraum in Richtung Oberfläche. An diesem Punkt der Trocknung können Salze nicht mehr aus dem Gefüge an die Oberfläche transportiert werden und kristallisieren spätestens dann aus.

Weiter bewirkt Wasser bei einigen Baustoffen, und auch bei mehreren Kompressenmaterialien, eine Quellung, welche sich wiederum bei der Trocknung als Schwund bemerkbar macht. Dies ist einerseits auf die Entweichung des Porenwassers und andererseits auf die Abgabe von in quellfähigen Bestandteilen eingelagertem Wasser (wie z. B. bei Tonmineralen) zurückzuführen.

In den letzten Jahren hat sich in der Praxis die trocknende Komresse gegenüber der dauernassen Komresse durchgesetzt, da durch die Aufkonzentration von Salz eine höhere Extraktionsrate pro Kompressendurchgang realisiert und eine sehr lange Durchfeuchtung des Objektes minimiert werden kann. Bei trocknenden Salzreduzierungscompressen findet beim Aufbringen der nassen/feuchten Komresse zunächst eine Diffusion der Salze statt. Bei der anschließenden Abtrocknung der Komresse an der Oberfläche entscheidet sich dann, wie lange die Komresse gegenüber dem Substrat kapillar aktiv bleibt, um möglichst viel Wasser mit den darin gelösten Salzionen an die Oberfläche zu transportieren. Diese maßgeblichen Prozesse wurden zuletzt intensiv im EU-Projekt DESALINATION bearbeitet und 2013 abschließend publiziert.<sup>6</sup>

Die entscheidende Optimierung von Salzreduzierungscompressen war die Abstimmung der Porenradienverteilung der Komresse auf das zu behandelnde Substrat.<sup>7</sup> Der Kapillarsog der Salzreduzierungskomresse muss hierzu gleich groß oder größer sein als der Kapillarsog des Substrats, was durch kleinere Porendurchmesser in der Komresse realisierbar ist. Hierzu wurden insbesondere Quecksilberporositätsmessungen durchgeführt und die gängigen Kompressenmaterialien

hinsichtlich ihrer verschiedenen Porenradienverteilung charakterisiert. Aus diesen Erkenntnissen heraus entwickelte sich eine Art Kompressenbaukasten, um auf das Substrat abgestimmte, kapillarwirksame Kompressen mittels entsprechender Materialmischungen abzustimmen.<sup>8</sup>

Auch an salzkontaminierten Objekten können wichtige Aspekte für optimalen oder ungünstigen Salztransport und deren Ablagerung nachvollzogen werden.<sup>9</sup> Gerade die Aufkonzentration von Salzen an der Oberfläche von Objekten zeigt im Grunde die Anforderung an eine effektive Salzreduzierungskomresse. In Abbildung 1 ist ein Dünnschliff von einem aus Halbhydrat hergestellten Gipsrelief zu sehen, an dessen Oberfläche sich Magnesiumsulfat (im Bild braun) aufkonzentriert hat. In den tiefer gelegenen Bereichen sind fast keine Auskristallisationen zu erkennen. Eine für dieses Substrat effektive Salzreduzierungskomresse müsste somit in diesem Fall zumindest den gleichen kapillaren Wassertransport aufweisen wie das Substrat selbst, um in gleicher Weise die Salzlösung an die Oberfläche der Komresse zu leiten und dort die Auskristallisierung der Salze gewährleisten zu können. Der in Abbildung 1 rechts dargestellte Dünnschliff zeigt die auf das Gipsrelief aufgebrauchte mineralische Salzreduzierungskomresse, welche nach der Durchtrocknung eine fast gleichartige Konzentration von Salzen an der Oberfläche aufweist.

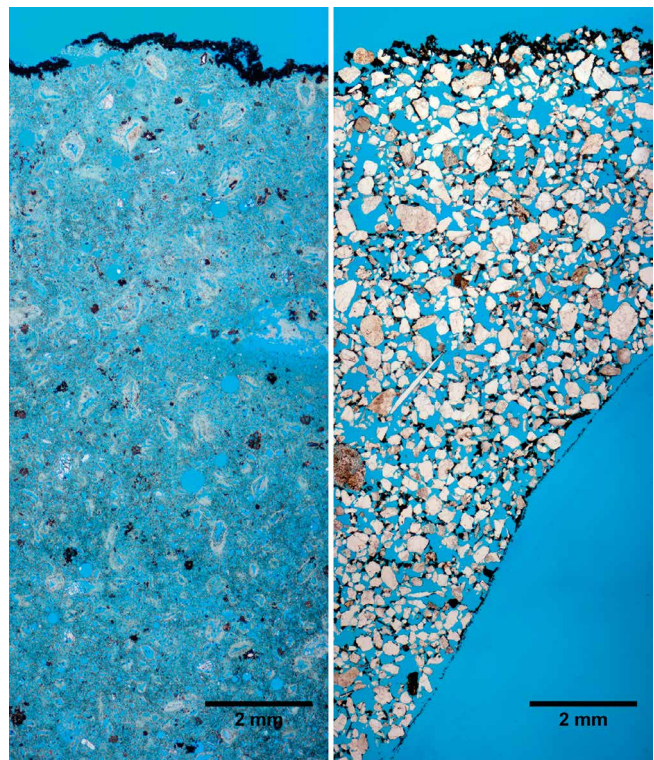


Abb. 1. links: Gipsmörtelgefüge im linear polarisierten Durchlicht, Oberseite mit Aufkonzentration von Magnesiumsulfat (dunkelbraun); rechts: mineralisches Kompressengefüge über Japanpapierschicht nach Abnahme auf dem Gipsmörtel links im linear polarisierten Durchlicht, Oberseite mit Aufkonzentration von Magnesiumsulfat, teilweise auch im Gefüge verteilt (Foto: ABK Stuttgart, Roland Lenz, 2015)

## Materialien zur Bereitung von Kompressen

Die Zusammensetzung von Kompressen kann je nach Anwendungszweck stark variieren. In der Regel bestehen sie aus einem oder mehreren Kompressenmaterialien, welche mit Wasser angemacht werden. Bei der Applikation können zum Schutz von empfindlichen Oberflächen – oder als generelle Interventionsschicht – Zwischenlagen aus Vliesen zwischen Objekt und Komresse aufgebracht werden.

**Wasser:** Wasser stellt das Lösungs- und Transportmittel der Salze im und aus dem Objekt dar. Je nach Substrat sollte man hierbei auf Anteile von im Wasser gelösten Ionen achten, welche einerseits unerwünschte Ionen mit einbringen und andererseits zu einer Verschiebung des pH-Wertes führen können. Die Bevorzugung von destilliertem oder demineralisiertem Wasser gegenüber Trinkwasser ist im Einzelfall in Hinsicht auf das zu behandelnde Substrat zu diskutieren. So kann z. B. demineralisiertes Wasser einen pH-Wert von unter 7 aufweisen und entsprechend kalkgebundene Substrate oder Oberflächen auslaugen und angreifen.<sup>10</sup> Die Messung der Leitfähigkeit oder die ionenchromatische Bestimmung der Ionen ist vor der Verwendung von Leitungswasser dringend anzuraten, da die Trinkwasserqualitäten je nach Fördergebiet stark schwanken können. Der jeweilige Härtegrad des Trinkwassers kann bei den zuständigen Wasserwerken auch online abgefragt werden.

**Zwischenlagen:** Zwischenlagen haben sich bei der Applikation von Kompressen auf empfindlichen Oberflächen dahingehend bewährt, dass die Abnahme der Kompressen rückstandsfreier erfolgen bzw. die Einwanderung von feineren Kompressenbestandteilen in poröse Oberflächen minimiert oder unterbunden werden kann. Eine doppelte Zwischenlage ermöglicht weiter eine kontrollierte schichtweise Abnahme der Kompressen, wobei die objektseitige Lage als Interventionsschicht zur anschließenden Festigung herangezogen werden kann, durch welche nach der Abnahme konservatorische Maßnahmen erfolgen können. Bei stark versalzten und deformierten Bereichen, wie z. B. an Putz- oder Gipsstuckoberflächen, ermöglicht die mit Wasser und Pinsel aufgebrachte Zwischenlage nach dem Lösen der Salze und dem Aufbringen der Komresse eine Rückformung des Gefüges in seine ursprüngliche Lage. Gleichfalls wird hierdurch ermöglicht, dass die kapillare Anbindung des geschädigten Bereichs (z. B. durch Schalenbildung bei Putzen oder bei teilweiser Auflösung des Gefüges) an den Untergrund erfolgt.

Die in der Regel aus Japanpapier bestehende Zwischenlage gibt es in verschiedenen Gewichten ( $\text{g/m}^3$ ). Es sollte darauf geachtet werden, dass es sich um wasserfeste Japanpapiere handelt, wie dies z. B. bei ebenfalls für Zwischenlagen verwendeten Teebeutelpapieren der Fall ist. Synthetische und aus Naturfasern bestehende Vliese (wie z. B. Windeleinlagen) stellen je nach Anwendungszweck z. T. Alternativen zu Japanpapier dar.<sup>11</sup>

**Kompressenmaterialien:** Die in der Praxis verwendeten Kompressenmaterialien lassen sich in drei wesentliche Gruppen einteilen:<sup>12</sup> quellfähige Stoffe organischen Ursprungs, mi-

neralische Komponenten mit Ionenaustausch- und Adsorptionseigenschaften<sup>13</sup> sowie inerte mineralische Füllstoffe. Eine Übersicht zu den gängigen Kompressenmaterialien findet sich in Tabelle 1.

**Quellfähige Stoffe organischen Ursprungs:** Dabei handelt es sich im Allgemeinen um Cellulosefasern unterschiedlicher Aufbereitung. In der Praxis sind hochreine Cellulosen (wie z. B. Arbocel®-Produkte) am weitesten verbreitet. Eine umfassende Betrachtung zur Verwendung der unterschiedlichen Arbocel-Produkte ist bei Vergès-Belmin<sup>14</sup> u. a. zu finden. Weiter werden Papierpulpe oder fertig konditionierte, bereits mit Wasser angemachte Faserbreie angewendet.

**Anorganische Stoffe und inerte mineralische Komponenten:** Diese Gruppe lässt sich weiter in Schichtsilikate und inerte mineralische Stoffe unterteilen.

Bei den Schichtsilikaten finden überwiegend Bentonite (Tonmineralgemisch mit überwiegendem Montmorillonitanteil/stark quellfähiges Dreischichtsilikat), Kaolin (gering quellfähiges Zweischichtsilikat), Sepiolith (hydratisiertes Magnesiumsilikat mit Bandstruktur) und Attapulgit (Kolloidales Magnesium-Aluminium-Hydrosilikat/Phylosilikat) Anwendung. Diese Stoffe weisen durch ihre feinen Korngrößen eine entsprechend hohe spezifische Oberfläche auf. Je nach ihrer Quellfähigkeit weisen sie Ionenaustausch- und Adsorptionseigenschaften auf (insbesondere Bentonite). Die Fähigkeit zum Ionenaustausch bedeutet hierbei aber auch, dass Ionen aus dem Kompressenmaterial an das Substrat abgegeben werden.

Inerte mineralische Komponenten können wohl natürliche und künstliche Granulate und Feinzuschläge sein. Weit verbreitet sind Quarz- und andere natürliche Sande unterschiedlichster Sieblinien, Gesteins- und Mineralmehle, Leichtzuschläge aus geblähten Gesteinen oder aus recyceltem Glas<sup>15</sup> sowie Verdickungsmittel aus amorphem Siliciumdioxid.

Wie oben dargestellt, sollte die Auswahl der Kompressenmaterialien entscheidend von der gewünschten Porengeometrie der Komresse in Bezug zum Substrat abhängen. Anhand der vorhandenen Messwerte lassen sich daher erste Einschätzungen für eine notwendige Kompressenzusammensetzung ableiten, welche aber im Speziellen für das jeweilig zu behandelnde Substrat durch Tests überprüft werden müssen. Für die Realisierung des kapillaren Transports in der Kom-

6 HERITAGE/HERITAGE/ZEZZA 2013a.

7 PEL/HERITAGE/VORONINA 2013; SAWDY et al. 2010.

8 LUBELLI/VAN HEES/HILBERT 2013; LUBELLI/VAN HEES 2013.

9 LAUE/BLAUER-BOEHM/JEANNETTE 1996.

10 Siehe dazu KOHN 1981, S. 57: „Bei der Anwendung von Wasser (bei Wandmalereien) ist Leitungswasser vorzuziehen, da es Calciumcarbonat weniger angreift als destilliertes Wasser. Das Kalklösungsvermögen von Wasser nimmt mit steigender Carbonathärte ab.“

11 Bei Japanpapieren konnte im Zuge von studentischen Arbeiten nachgewiesen werden, dass sie keine Auswirkungen auf den kapillaren Transport haben (siehe dazu Testreihe „Tintentest“). Zu anderen Vliesen liegen derzeit keine Tests vor.

12 WTA Merkblatt 2003.

13 Siehe dazu RICHARD 2002.

14 VERGÈS-BELMIN/HERITAGE/BOURGÈS 2013.

15 Siehe dazu LENZNER 2009; STEINHAUSER/WENDLER 2009.



presse können hierbei die Cellulosen und die Schichtsilikate genannt werden. Die inerten mineralischen Komponenten sind hingegen für die Realisierung von grobporigen Gefügen, die Minimierung des Schwunds, Standfähigkeit sowie die Einstellung der Verarbeitbarkeit heranzuziehen.

Ein Blick in die Produkt- und Sicherheitsblätter der jeweiligen Stoffe ergibt weitere Hinweise. So lässt sich über die Partikelgrößen bereits sehr gut abschätzen, ob sich eine rückstandslose Abnahme der Komresse von porösen Oberflächen realisieren lässt. So hat Kaolin eine durchschnittliche Partikelgröße von 2 µm und kann ohne weiteres durch eine Japanpapierzwischenlage hindurch in poröse Oberflächen einwandern.

Der bei den Produkten aufgeführte pH-Wert stellt in zweierlei Hinsicht eine wichtige Information dar. Ist der pH-Wert nicht 7 (neutral), so sind freie Ionen vorhanden, welche ins Objekt eingetragen werden können – insbesondere bei ionentauschfähigen Stoffen und herstellungsbedingten wasserlöslichen Natriumgehalten bei Glasgranulaten (pH-Wert 8–11, nach Herstellerangaben). Es ist davon auszugehen, dass bei gut kapillar saugenden Kompressen dies wieder durch einen Abtransport in die Komresse ausgeglichen werden kann, doch andererseits führt eine Verschiebung des pH-Wertes unter Umständen auch zur Lösung von organischen und an-

organischen Komponenten im Objekt oder zur Veränderung von alkaliempfindlichen Pigmenten. Eine pH-Messung sollte daher auch immer an den einzelnen und gemischten Kompressenmaterialien zusätzlich durchgeführt werden.

Ein weiterer Hinweis ist an diesem Punkt noch notwendig. Vor allem bei mineralischen Kompressen sollte bei der Verarbeitung die Entstehung von Stäuben unterbunden werden und für entsprechenden Atemschutz gesorgt werden. Dies gilt auch für die Abnahme – insbesondere wenn es eine Besiedelung mit Schimmelpilzen gegeben hat, wie es bei cellulosehaltigen Kompressen sehr schnell möglich ist.

### Tests zur Wirkungsweise von Kompressen

Die Überprüfung der Wirksamkeit von Salzminderungskompressen ist ein entscheidendes Moment für das Gelingen von notwendigen Kompressenanwendungen. Hierzu stehen aufwendige Messverfahren wie die Quecksilberporosimetrie-messungen zur Verfügung, um die Kompressenmaterialien zu charakterisieren. Auch wenn einzelne Parameter an Kompressen und Substraten gemessen werden können, bedarf es der Überprüfung des kapillaren Transports von Wasser und Salzionen vom Substrat in die Komresse in praxisnahen

| Produkt   | Beschreibung   | Bezugsquellen/Vertrieb                 |
|---|--|--|
| ARBOCEL® BWW 40   | reines Cellulosemehl, im Ø 200 µm Faserlänge und 20 µm Faserdicke  | J. RETTENMAIER & SÖHNE<br>www.jrs.de   |
| ARBOCEL® BC 200   | reines Cellulosemehl, im Ø 300 µm Faserlänge und 20 µm Faserdicke  | J. RETTENMAIER & SÖHNE<br>www.jrs.de   |
| ARBOCEL® BC 1000  | reines Cellulosemehl, im Ø 700 µm Faserlänge und 20 µm Faserdicke  | J. RETTENMAIER & SÖHNE<br>www.jrs.de   |
| poraver®  | Blähglas und Blähglasgranulat in verschiedenen Kugelgrößen   | Dennert Poraver GmbH<br>www.poraver.de |
| Bentonit  | sehr stark quellende Tone (wasserhaltige Aluminiumsilikate mit Hauptbestandteil Montmorillonit)  | KremerPigmente<br>Deffner & Johann     |
| Kaolin  | reines schlecht quellfähiges Zweischichtsilikat  | Kremer-Pigmente                        |
| Acematt® HK 125<br>(auch unter dem Namen Aerosil gehandelt) | Siliciumdioxid auf chemischem Weg gewonnen, amorphe, kugelförmige Teilchen von durchschnittlicher Teilchengröße von 10,5 µm            | Degussa<br>www.degussa-fp.com          |
| Sepiolith<br>(Meerschaumpulver)                             | hydratisiertes Magnesium-Silikat mit hoher Reinheit, Struktur: Bündel kapillarförmiger Röhrchen, keine innerkristalline Quellfähigkeit | Kremer-Pigmente                        |
| Attapulgit  | kolloidales Magnesium-Aluminium-Hydrosilikat/Phylosilikat  | Kremer-Pigmente                        |
| Sand (pH-neutral)   | feiner Quarzsand, pH-neutraler Spielsand (0–2 mm)  | Baustoffhandel                         |
| Sand  | Körnung 0–2 mm, gewaschen  | Baustoffhandel                         |

Tabelle 1. Übersicht der gängigen Kompressenmaterialien zur Konfektionierung von Salzminderungskompressen



Abb. 2. Historischer Gipsmörtel mit aufliegender abgetrockneter Komresse über Japanpapier von der Ober- und Unterseite. Kompressenzusammensetzung: links: Sepiolith, Poraver®, Sand (1 : 3 : 8 Raumteile); rechts: Sepiolith, Acematt® HK 125, Sand (1 : 3 : 8 Raumteile) (Foto: Roland Lenz, 2006)

Tests, bevor direkte Tests am Objekt durchgeführt werden sollten.

Die Fragestellung war deshalb, ob sich mit einfachen Methoden die Wirkungsweisen von Kompressen überprüfen lassen und ob über den Verlauf des Abtrocknungsverhaltens innerhalb der Komresse eine Aussage über den Verlauf des kapillaren Salztransports möglich ist. Ausgangspunkt ist ein vom Verfasser entwickelter einfacher Test zur Visualisierung des Wassertransports aus dem Substrat in die Komresse durch Sichtbarmachung mit Tinte („Tintentest“). Hierzu wurden zwei historische Gipsmörtelproben mit blauer Tinte eingefärbt und nach der Abtrocknung mit zwei zu testenden Kompressenmischungen belegt. Nach der Trocknung der Kompressen, konnte eine Aufkonzentration der aus dem Substrat in die Komresse umgelagerten Tinte an der Oberfläche beobachtet werden. Das Ergebnis wurde daraufhin so interpretiert, dass in der rechten Komresse ein besserer kapillarer Transport an die Oberfläche der Komresse stattgefunden hat als in der linken (Abb. 2). Folglich müsste auch ein wesentlich kontinuierlicherer Wassertransport stattgefunden haben, was bei einer Anwendung am Objekt entsprechend eine bessere Salzextraktion bedeuten sollte.

Um diesen Test weiter zu verifizieren wurde im Studiengang für Konservierung und Restaurierung von Wandmalerei, Architekturoberfläche und Steinpolychromie an der Staatlichen Akademie der bildenden Künste Stuttgart (ABK) eine Testreihe zur weiterführenden Überprüfung der Aussagekraft des Ergebnisses durchgeführt.<sup>16</sup> Dazu sollten neben der Visualisierung des Wassertransports mittels Tinte auch die Messung der Feuchtigkeitsverteilung in der Probe sowie eine Überprüfung der Salzwanderung in den jeweiligen Kompressen untersucht werden.

**Versuchsaufbau:** Als Substrat für den Versuchsaufbau wurden Gips-Wandbauplatten verwendet, welche einem aus Halhydrat hergestellten realen Gipsobjekt entsprechen und zum anderen eine hohe kapillare Saugwirkung aufweisen. Eine der beiden Gipsplatten wurde mit Natriumchlorid getränkt, die andere mit Methylenblau-Tinte<sup>17</sup> und anschließend getrock-

net. Auf die jeweiligen Platten wurden jeweils 7 Reihen mit den ausgewählten 5 Kompressen (siehe Tabelle 2) in Kunststoffrahmen aufgebracht, um eine seitliche Abtrocknung der Kompressenfelder zu unterbinden. Die Lagerung erfolgte bei Raumtemperatur. Die Beprobung und Messungen erfolgten an allen Kompressen über 7 Intervalle in 25 Tagen.

**Messungen:** Bei der mit Tinte getränkten Probeplatte wurde intervallweise eine Kompressenreihe mit und ohne Japanpapierzwischenlage abgenommen und begutachtet. Die wichtigsten Parameter stellen sich wie folgt dar:

- Messung der Feuchte mittels Protimetermessung<sup>18</sup> (Feuchtegehalt in % in Bezug auf das Holzfeuchte-Äquivalent) an der oberen, mittleren und unteren Schicht der Komresse (Kontaktfläche zum Substrat) und auf der Substratoberfläche.
- Verteilung der Tintenfärbung an der Komresse von allen Seiten
- Ausschwemmungen an den Rändern um die Komresse (Wasserrückhaltevermögen gegenüber dem Substrat)
- Rückstände auf der Probeplatte

An einer Kontrollplatte mit der Natriumchloridtränkung wurde jeweils die Komresse getrennt in Ober- und Unterseite entnommen und die Leitfähigkeit im Eluat gemessen, um einen Rückschluss auf die vorhandene Salzkonzentration zu ziehen.<sup>19</sup>

16 Die Testreihe erstellten Studierende im Rahmen zweier Projektarbeiten an der Staatlichen Akademie der bildenden Künste Stuttgart unter Betreuung von Prof. Dipl.-Rest. Roland Lenz und AM Dipl.-Rest. Janina Roth. Anja Mrosk, Evaluierung von Feuchtigkeitsbewegungen mittels Protimetermessung bei gleichzeitiger Visualisierung durch Tintenanfärbung an verschiedenen Kompressenmaterialien auf Gipsmörtelsubstrat, masch. Projektarbeit Sommersemester 2011. Caroline Pfeuffer, Messung der Salzwanderung mittels Leitfähigkeitsmessung an verschiedenen Kompressenmaterialien auf Gipsmörtelsubstrat, masch. Projektarbeit Sommersemester 2011.

17 Verwendet wurde Pelikan Königsblau 4001.

18 Feuchtemessgerät (für Holzfeuchte), Protimeter Surveymaster SM PO45360.

19 Leitfähigkeitsmessgerät SG7 der Firma Mettler Toledo, Leitfähigkeit in  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

| Kompresse Nr. | Zusammensetzung   | Kompresen- u. Wasseranteil                 | Auftragsstärke | Applikationsart |
|---------------|---|--|----------------|-----------------|
| Kompresse 1   | Arbocel®BC 200  | eingesumpft in Wasser                      | 15 mm          | Spatel          |
| Kompresse 2   | 3 RT Acematt® HK 125<br>1 RT Sepiolith<br>10 RT Sand (0–2 mm, pH-neutral) | 2 RT Komp. zu 5 RT demin. H <sub>2</sub> O | 15 mm          | Spatel          |
| Kompresse 3   | 1 RT Kaolin<br>5 RT Sand (02 mm, pH-neutral)                              | 3 RT Komp. zu 5 RT demin. H <sub>2</sub> O | 15 mm          | Spatel          |
| Kompresse 4   | 3 RT Poraver®(0,25)<br>1 RT Sepiolith<br>8 RT Sand (02 mm, pH-neutral)    | 4 RT Komp. zu 6 RT demin. H <sub>2</sub> O | 15 mm          | Spatel          |
| Kompresse 5   | 1 RT eingesumpftes Bentonit<br>5 RT Sand (02 mm, pH-neutral)              | 5 RT Komp. zu 4 RT demin. H <sub>2</sub> O | 15 mm          | Spatel          |

Tabelle 2. Verwendete Kompresenmischungen

**Ergebnisse:** In Abbildung 3 sind die entnommenen Kompresen von der Seite, der Oberfläche sowie die Oberfläche des Substrats nach Abnahme der Kompresse dargestellt. Die Ergebnisse der Feuchte- und Leitfähigkeitsmessungen der fünf Kompresenmischungen sind in der Abbildung 5 zusammengestellt. Es soll an dieser Stelle nochmals deutlich darauf

hingewiesen werden, dass die Ergebnisse dieser Testreihe nur in Bezug auf das verwendete Substrat (hier Gipsmörtel) zu werten sind.

Die Annahme, dass die Aufkonzentration der Tinte als Indiz zum Transport und der Ablagerung der Salze herangezogen werden kann, konnte bestätigt werden. Dies zeigt sich

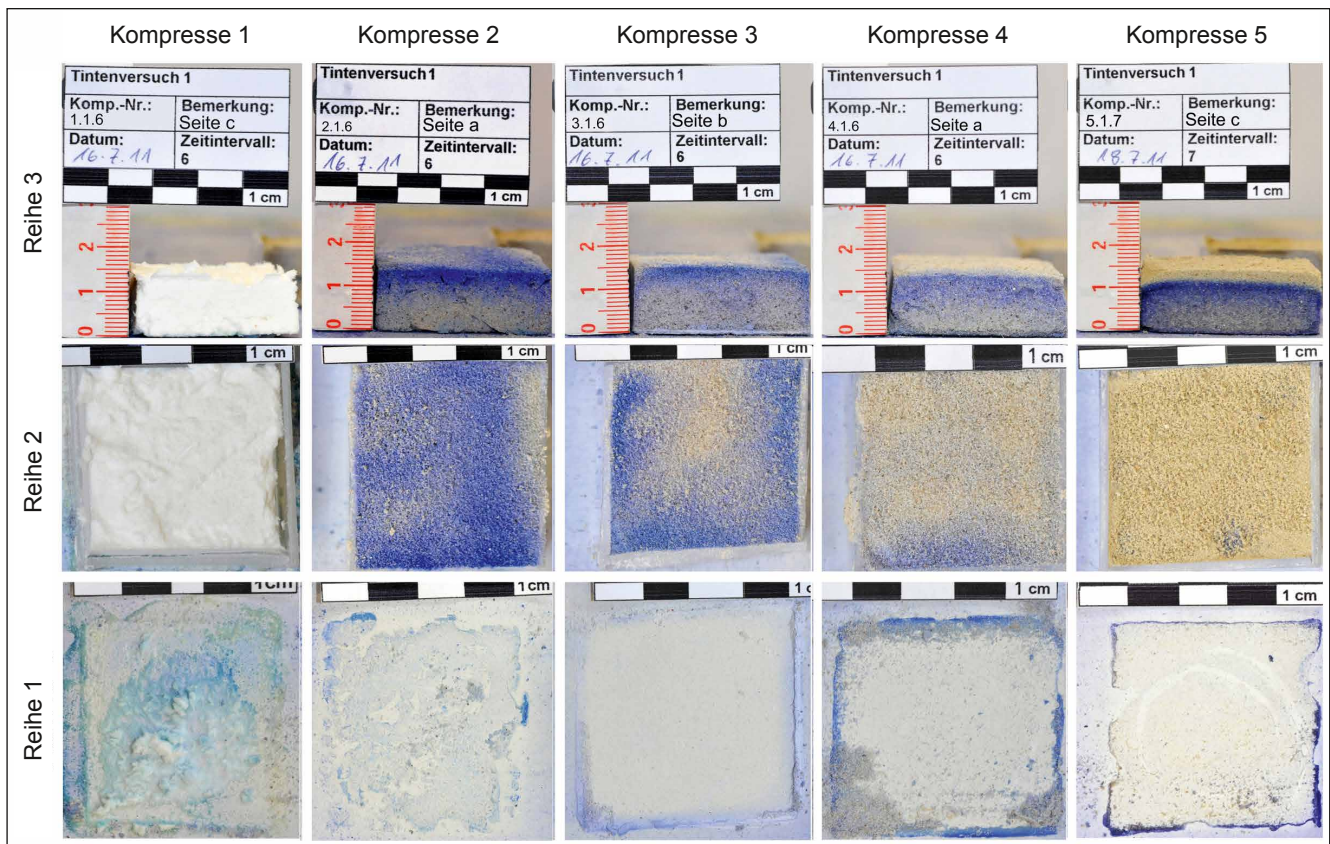


Abb. 3. Exemplarische Übersicht der Begutachtung der im „Tintentest“ abgenommenen Kompresen. Reihe 1: Kompresse von der Seite, Reihe 2: Kompresse von der Oberseite, Reihe 3: Oberfläche des Substrats nach Abnahme der Kompresse (Fotos: ABK Stuttgart, Anja Mrosk, 2011, Zusammenstellung Roland Lenz, 2015)



sehr deutlich an der Komresse 2 und an Komresse 5. Die Intensität der blauen Färbung korreliert mit der in und auf der Komresse abgelagerten Salzmenge der Kontrollplatte. Durch die parallel durchgeführte Feuchtigkeitsmessung konnten der Wassertransport und die Abtrocknung in den unterschiedlichen Ebenen der Komresse beobachtet werden. Die parallele Testreihe mit Japanpapierzwischenlage im Tintentestversuch zeigte keine signifikanten Unterschiede zu der Testreihe ohne sie. Die Abnahme der Kompressen mit Japanpapierzwischenlage war jedoch wesentlich besser durchführbar. Bemerkenswert war die Beobachtung, dass bei allen Kompressen beim siebten Intervall ein Anstieg der Feuchtigkeit bei gleichzeitiger Reduktion der Salzmenge gemessen werden konnte. In Korrelation mit dem gemessenen Raumklima konnte festgestellt werden, dass es eine signifikante Erhöhung der relativen Luftfeuchte von über 10 % gegeben hatte. Dieses Phänomen kann dahingehend interpretiert werden, dass durch die Erhöhung der relativen Feuchte eine Umkehrung des Salztransports zurück ins Substrat stattfand. Hierbei stellt sich die Frage nach dem besten Zeitpunkt für eine Abnahme der Komresse.

Neben diesen allgemeinen Ergebnissen konnten an den einzelnen Kompressen folgende weitere aufschlussreiche Erkenntnisse gewonnen werden:

**Komresse 1:** Die aus reinem Arbocel BS 200 bestehende Komresse schnitt in ihrer Wirkung am ungünstigsten ab. Beim Aufbringen der Komresse auf dem mit Tinte getränkten Substrat kam es zu einer Ausschwemmung der Tinte um das Kompressenfeld in das Substrat (siehe Abb. 4, Spalte 1 a und 1 b), was ein geringes Wasserrückhaltevermögen gegenüber dem Substrat darstellt. Weiter konnte bei der Trocknung ein signifikanter Schwund festgestellt werden, welcher mit einer teilweisen Ablösung vom Substrat einherging. Die Wanderung der Tinte in die Komresse zurück konnte aus diesen beiden Gründen nicht mehr stattfinden. Auf der versalzten Kontrollplatte war ein entsprechend geringer Salztransport in die Komresse zu messen. Ohne Japanpapierzwischenlage kam es mit Einsetzen der Trocknung des Substrats zu einer Anhaftung der Komresse an der Oberfläche.

**Komresse 2:** Die aus Sand, Sepiolith und Acematt HK 125 bestehende Komresse zeigte in der Zusammenschau aller Ergebnisse auf diesem Substrat eine sehr gute Wirkung. Sie wies ein gutes Wasserrückhaltevermögen und keine Schrumpfung auf. Sowohl die Tinte als auch die Salze wurden sehr gut an die Oberfläche der Komresse transportiert, was eine gute Saugspannung gegenüber dem Substrat bedeutet. Eine Aufkonzentration der Salze fand im Gegensatz zu den anderen

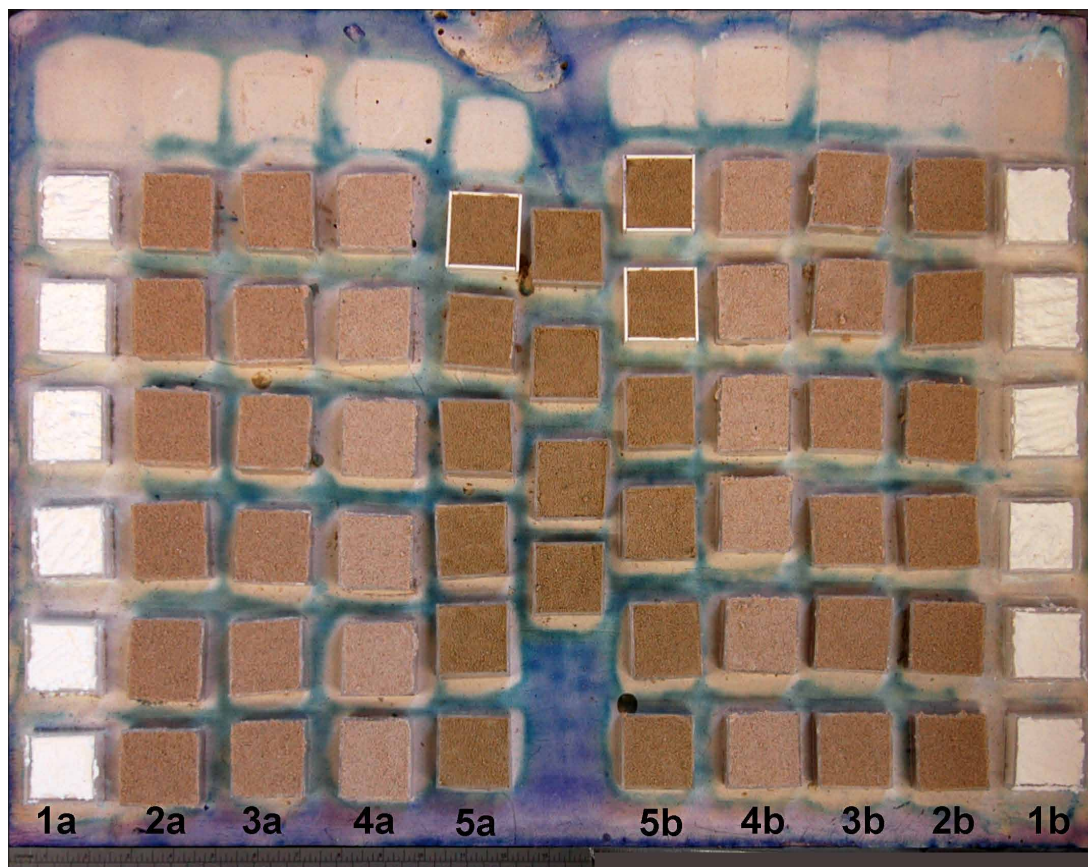


Abb. 4. Gips-Wandplatte, welche mit Tinte getränkt und mit den zu testenden Kompressenmaterialien und -mischungen belegt sind, nach der Abnahme der obersten Reihe der Kompressen nach dem ersten Intervall von 12 Stunden. Die mit der Endung a bezeichnete Seite ist ohne und die mit der Endung b bezeichnete Seite ist mit Japanpapierzwischenlage. Die Zusammensetzung der Kompressenmaterialien ist Tabelle 2 zu entnehmen (Foto: ABK Stuttgart, Anja Mrosk, 2011)

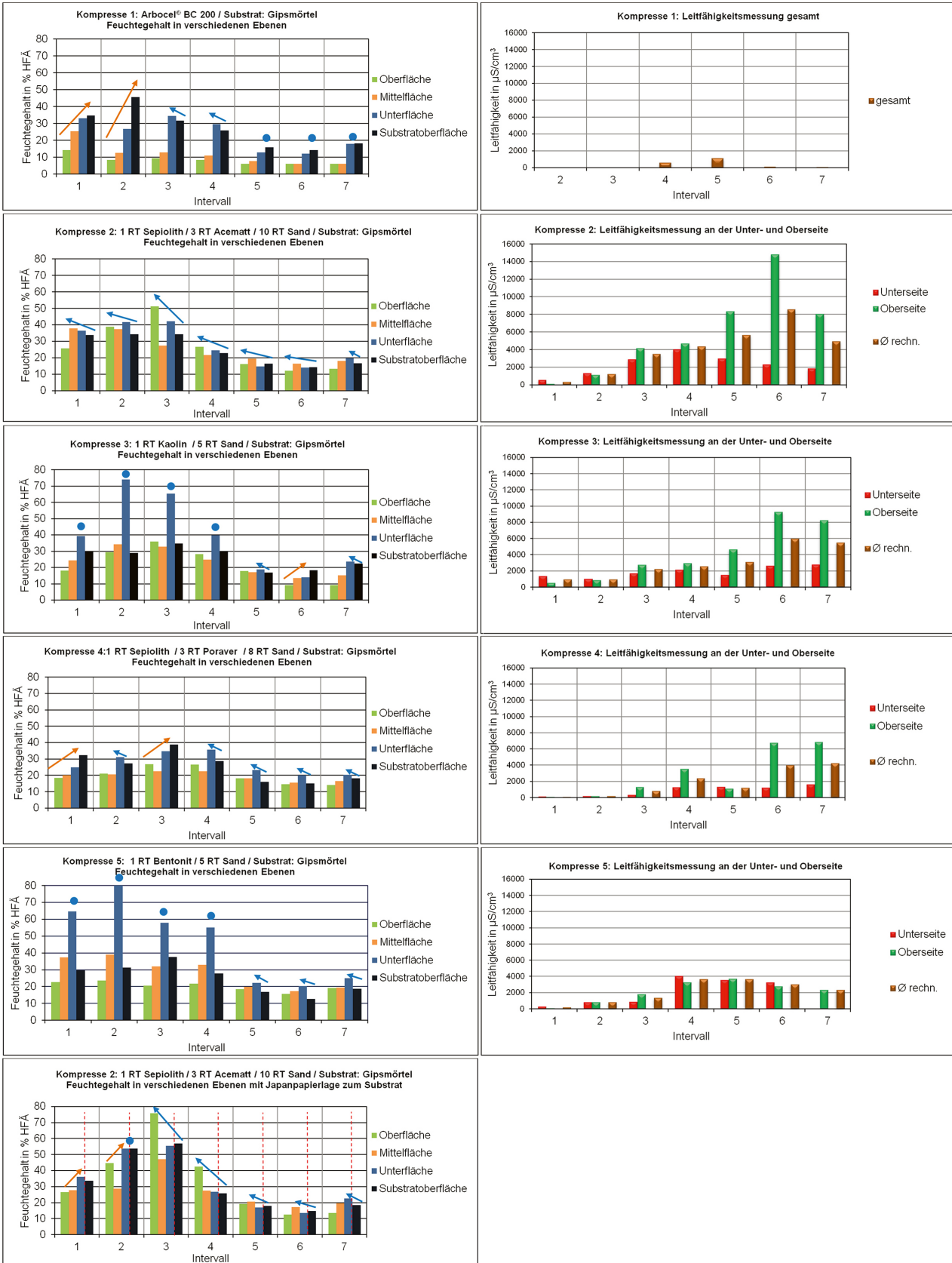


Abb. 5. Die an den Kompressen 1–5 (von oben nach unten) gemessenen Werte der Intervalle 1–7. Links die Feuchteverteilung der Proben in drei Ebenen (hier als Oberfläche, Mittelfläche und Unterfläche bezeichnet). Rechts die jeweils dazu gehörigen Messwerte der Leitfähigkeitsmessungen der Ober- und Unterseite sowie der rechnerische Durchschnitt der Leitfähigkeit über den ganzen Kompressenquerschnitt. In der linken Spalte der Feuchtemessungen ist mittels der eingefügten Pfeile die Tendenz des Wassertransports veranschaulicht (Länge und Steigung der Pfeile). An Stellen mit interpretierter Stagnation des Wassertransports wurde ein Punkt gesetzt. Das Diagramm unten links zeigt exemplarisch die Feuchteverteilung der Kompresse 2 mit Japanpapierzwischenlage zwischen Substrat und Kompressen (rot gestrichelt) (Messungen: Anja Mrosk und Carolin Pfeuffer, Zusammenstellung: Roland Lenz)



Kompressen etwas früher statt, was auf den guten Transport der Feuchtigkeit vom Substrat durch die Komresse hindurch an die Oberfläche hinweist.

**Komresse 3:** Die aus Sand und Kaolin bestehende Komresse zeigte ebenfalls einen guten Transport der Salze an die Kompressenoberfläche. Sie wies ein gutes Wasserrückhaltevermögen und keine Schrumpfung auf. Bemerkenswert bei dieser Komresse war, dass es über mehrere Intervalle hinweg eine Konzentration der Feuchte an der Kompressenunterseite zum Substrat hin gab.

**Komresse 4:** Die Effektivität der aus Sand, Sepiolith und Poraver bestehenden Komresse liegt, wie bei Komresse 3, an einem guten Transport der Salze an die Kompressenoberfläche. Sie zeigte ein etwas geringeres Wasserrückhaltevermögen als Komresse 2 und 3. Dies zeigt sich auch an einer größeren Ausschwemmung der Tinte um das Kompressenfeld (siehe Abb. 4).

**Komresse 5:** Die aus Sand und Bentonit bestehende Komresse zeigt sich in ihrer Effektivität hinter den Kompressen 2, 3 und 4. Das Wasserrückhaltevermögen gegenüber dem Substrat ist sehr gut und hält sehr lange an. Betrachtet man die Salzverteilung, ist im Wesentlichen von einer Diffusion der Salze auszugehen. Eine Aufkonzentration an der Oberfläche ist nicht nachzuweisen. Vielmehr zeigt die Verteilung der Tinte eine Aufkonzentration in der Mitte der Komresse, welche auch nach der einsetzenden Trocknung der Komresse nicht mehr umgelagert wurde.

Die Tests zeigen, dass durch Kompressen mit einem guten kapillaren Transport weg vom Substrat an die Verdunstungsfläche auch ein guter Salztransport ermöglicht wird. Ist das Wasserrückhaltevermögen gegenüber dem Substrat zu gering, wird das Wasser der Komresse in das Substrat kapillar transportiert und die Saugspannung dreht sich auch bei der Trocknung vom Substrat zur Komresse hin nicht mehr um. Dadurch ist eine Verteilung der zu extrahierenden Salze in das Substrat hinein – insbesondere an den Rändern der Komresse – zu erwarten. Ist das Wasserrückhaltevermögen jedoch zu hoch, kommt es zu keiner gleichmäßigen Abtrocknung der Komresse und einer Aufkonzentration der Salze innerhalb der Komresse. Ein konsequenter Transport weg vom Substrat an die Kompressenoberfläche ist dadurch nicht gewährleistet.

Vergleicht man die organischen und mineralischen Kompressen, wird deutlich, dass bei dem vorliegenden Substrat die mineralischen Kompressen wesentlich effektiver waren. Das Ziel, den Salztransport vom Substrat bis an die Oberfläche des Substrats zu realisieren, ist jedoch auch bei mineralischen Kompressen nicht immer gegeben, sodass die Gefahr besteht, dass Salze in der Nähe der Substratoberfläche auskristallisieren. Die rückstandslose Abnahme der Kompressen stellt sich insbesondere bei bentonit- und kaolinhaltigen Kompressen als problematisch dar. Zu der Testreihe kann weiter gesagt werden, dass es durch einfache Laborversuche<sup>20</sup> möglich ist, die Wirkungsweise von Kompressen in Bezug auf das zu behandelnde Substrat hin zu testen und daraus eine Prognose abzuleiten.

Die in der Testreihe durchgeführten Leitfähigkeitsmessungen und die Feuchtemessungen mit dem Protimeter stellen aber auch am Objekt eine entsprechend gute Kontrollmöglichkeit für die Überprüfung der Abtrocknung der Komresse und des Salztransports durch den Restaurator dar. Um aber eine umfängliche Beurteilung der Wirkungsweise am Objekt machen zu können, ist eine ionenchromatische Messung der Kat- und Anionenkonzentrationen am Objekt und in den Kompressen vor und nach der Anwendung von Salzminderungskompressen notwendig. Dies ist besonders in Bezug auf Salzgemische zu berücksichtigen, um eine eventuell selektive Extraktion von Ionen zu erkennen und zu minimieren.<sup>21</sup>

**Langzeitkompressen:** Die Forschung der letzten Jahre hat es nun möglich gemacht, an sensiblen Oberflächen Langzeitkompressen aufzubringen, welche mineralisch gebundene „Opfer- oder Kompressenputze“ teilweise ersetzen können. Kompressenputze verfolgen den gleichen Ansatz wie Salzminderungskompressen mit mineralischer Zusammensetzung – sprich die Verlagerung der Trocknungszone weg vom Substrat. Der Vorteil bei nicht gebundenen mineralischen Salzminderungskompressen liegt insbesondere darin, dass keine weiteren Bindemittel mit eingetragen werden und eine anschließende Abnahme wesentlich besser durchgeführt werden kann.

Bei welchen konservatorischen Situationen bieten sich somit mineralische Kompressen als Schutz- und Verschleißschicht an? Hier sind überwiegend Objekte mit nachkommender Feuchtigkeit und anhaltendem Salztransport zu nennen, bei denen zyklisch aufgebrauchte Kompressen nur zeitweise eine Schadensminimierung erzielen können. Beispielhaft seien hier die Stuckkapitelle in der Dreifaltigkeitskirche in Konstanz genannt, welche bereits über mehrere Jahre hinweg kontinuierlich mit mineralischen Salzminderungskompressen überzogen sind. Hierbei kommt der Akzeptanz der Maßnahme durch den Eigentümer zugute, dass der Restaurator das Relief der Kapitelle mit mineralischen Kompressen nachmodelliert und farblich an die Stuckfarbigkeit angepasst hat (Abb. 6).

Eine andere nicht zu unterschätzende Situation zeigt sich, wenn ein präventiver Schutz durch die Regulierung des Raumklimas nicht realisiert bzw. durch die bauliche Situation noch nicht umgesetzt werden konnte. Eine ähnliche kritische Situation besteht bei der Regulierung von aufsteigender Feuchte, welche eine kontinuierliche Trocknung des Objektes mit gleichzeitiger Salzkristallisation hervorruft. Als Beispiel sei hier das Gipsstuckrelief im Refektorium des Klosters Illenburg genannt, dessen Mauerwerk bis weit über die Wende hinaus wegen eines undichten Daches und aufsteigender Feuchtigkeit massiv durchfeuchtet war. Nach einer Behebung der Ursachen setzte eine langsame und stetige Trocknung des

20 Siehe auch hierzu den Test zur Saugspannungsprüfung in STEINHÄUSER/WENDLER 2009.

21 Durch eine selektive Ionenextraktion können sich neue Salzgemische mit veränderten Deliqueszenzfeuchten einstellen. Eine Möglichkeit dies zu kalkulieren ist die Auswertung mit dem Computerprogramm ECOS/RUNSALT.



Abb. 6. Konstanz, Dreifaltigkeitskirche, Kapitell im Kirchenschiff mit aufgebrachtener Langzeitkomresse. Kompressenzusammensetzung: 5 RT „Spielsand“, < 1 mm Ø, 1 RT Sepiolith, 3 RT Poraver® Glasgranulat 0,04–0,125 mm Ø, 2 RT Marmormehl feinst. Applikation durch Restaurator G. Dürr, Freiburg. Betreuung der Maßnahme: Dr. D. Jakobs, LAD BW/Dr. Grüner, MPA Stuttgart/Prof. R. Lenz, ABK Stuttgart (Foto: ABK Stuttgart, Roland Lenz, 2011)

Mauerwerks ein, welche mit den gewählten klimaregulierenden Maßnahmen im Innenraum nicht soweit reguliert werden konnte, dass eine präventive Sicherung möglich gewesen wäre. Durch mineralische Langzeitkompressen mit Standzeiten von über einem Jahr konnte die Schadensebene von der Oberfläche des Reliefs auf die Oberfläche der Komresse verlagert und ein weiterer Substanzverlust am Objekt aufgehalten werden (Abb. 7).

Neben dem oben genannten Anforderungsprofil an Salzminderungskompressen sind für Langzeitkompressen folgende Kriterien hervorzuheben:

- langfristig gute Haftung auf dem Substrat auch mit notwendiger Zwischenlage aus Japanpapier, damit einhergehend ein geringes Schrumpfungsverhalten
- guter bis sehr guter Kapillartransport von Wasser und Ionen an die Oberfläche der Komresse, um die Auskristallisation von Salzen im Übergang vom Substrat zur Komresse möglichst zu unterbinden
- Langzeitstabilität gegenüber der Verwertung von Mikroorganismen

Weiter ist ein kontinuierliches Monitoring der Oberfläche durchzuführen, um Auskristallisationen an dieser abnehmen zu können und eine Rückwanderung ins Gefüge der Komresse zu minimieren. Die homogene Oberfläche einer Komresse bietet weiter die Möglichkeit, Schädigungsprozesse besser beobachten zu können und entsprechend weitere Maßnahmen zu veranlassen.

Die Akzeptanz für Langzeitkompressen ist oft ein kritischer Moment bei denkmalpflegerischen Entscheidungen. Gerade aber die mineralischen Kompressen bieten eine gute Möglichkeit, diese entsprechend farblich und in ihrer Oberflächenausprägung an die Umgebung anzupassen, sodass

sie keine optische Beeinträchtigung verursachen. Es können entsprechend farbige Sande ausgewählt werden, um eine vorhandene Putzfarbigkeit nachzustellen. Weiter besteht die Möglichkeit, mineralische Kompressen nach anfänglicher Trocknung mit einer Tünche zu überziehen, welche freskalo an der Oberfläche einbindet. Dies führt einerseits zu einer Stabilisierung der Oberfläche und wirkt sich – nach ersten Tests zu urteilen – positiv auf den kapillaren Transport von Salzen an die Oberfläche der Komresse aus.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklungen der letzten Jahre sowie die dargestellten Tests zur Wirksamkeit von Kompressen zeigen, dass Salzminderungskompressen auf das jeweils zu behandelnde Substrat optimiert werden können. Hierzu sind entsprechende Tests unabdingbar, um sowohl im Labor als auch am Objekt die Effektivität der Salzminderungskompressen überprüfen zu können. Der hier hervorgehobene Aspekt des kontinuierlichen Salztransports vom Substrat an die Kompressenoberfläche ist entscheidend dafür, dass eine Aufkonzentration im Bereich zwischen Komresse und Substrat unterbunden



Abb. 7. Kloster Ilsenburg, Refektorium, Ostwand mit mittelalterlichem Gipsrelief aus Hochbrandgips. Teilweise aufgebrachtene Salzminderungskomresse über zweilagiger Japanpapierzwischenlage. Kompressenzusammensetzung: 8 RT Sand (12 mm) pH-neutral, 1 RT Sepiolith, 3 RT Acematt® HK 125; Salzreduktionseffizienz: 5 g/100 g Komresse. Messung: Dr. R. Sobott (Foto: Roland Lenz, 2006)

werden kann. Eine Verkrustung der Komresse mit Salzen auf der Substratoberfläche zu unterbinden, ist somit gezielt realisierbar. Dies schafft auch eine Grundvoraussetzung für mineralische Langzeitkompressen, welche für die dargestellten konservatorischen Situationen notwendig sind.

Die Erprobung von mineralischen Langzeitkompressen (ohne mineralische Bindung z. B. mit Kalk, wie bei Kompressenputzen) stellt derzeit ein noch nicht umfassend behandeltes Forschungsthema dar. Zusätzliche Tests sind notwendig, um diese weiter für denkmalpflegerische Problemstellungen gezielt zur Verfügung stellen zu können.

## Danksagung

Mein Dank gilt den ehemaligen Studierenden des Studiengangs Konservierung und Restaurierung von Wandmalerei, Architekturoberfläche und Steinpolychromie Frau Dipl.-Rest. Anja Mrosk und Frau Dipl.-Rest. Carolin Pfeuffer sowie Frau Dipl.-Rest. Janina Roth (akademische Mitarbeiterin an der ABK Stuttgart) für die Durchführung der Tests zum „Tintentest“ und der vergleichenden Messungen an versalzten Kontrollplatten. Frau Dr. Christine Bläuer und Herrn Dr. Arnulf Dähne danke ich für die Durchsicht des Manuskripts und Anregungen.

## Literatur

- HERITAGE et al. 2013 – HERITAGE, ADRIAN/HERITAGE, ALISON/FUNKE, FRIEDERIKE/VERGÈS-BELMIN, VÉRONIQUE/BOURGÈS, ANN: *Current use of poultices in the conservation of monuments*, in: HERITAGE/HERITAGE/ZEZZA, 2013, pp. 8–13
- HERITAGE/HERITAGE/ZEZZA 2013a – HERITAGE, ALISON/HERITAGE, ADRIAN/ZEZZA, FULVIO (HRSG.): *Desalination of Historic Buildings, Stone and Wall Painting*, First published 2013 by Archetype Publications Ltd, London 2013
- KÜHN 1981 – KÜHN, HERMANN: *Erhaltung und Pflege von Kunstwerken und Antiquitäten*, Bd. 2, München 1981
- LAUE/BLÄUER-BOEHM/JEANNETTE 1996 – LAUE, STEFFEN/BLÄUER-BOEHM, CHRISTINE/JEANNETTE, DANIEL: *Salt weathering and porosity: examples from the Crypt of St. Maria im Kapitol, Cologne*, in: 8<sup>th</sup> International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Berlin, 30. September bis 4. Oktober 1996, hrsg. von Josef Riederer, Berlin 1996, S. 513–522
- LAUE/SCHAAB 2011 – LAUE, STEFFEN/SCHAAB, CHRISTOPH: *Mitigation of salt damages by climate stabilization and salt extractions in the Crypt of St. Maria im Kapitol, Cologne*, in: Proceedings of the Conference Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures, edited by Ioannis Ionannou and Ioannis Magdalini, Limassol (Cyprus), 19.–22. Oct. 2011, pp. 129–136
- LENZNER 2009 – LENZNER, SYLVIA: *Gipssinterbehandlung an der Gewölbausmalung*, in: Staschull, Matthias/Rösch, Bernd (Hrsg.): *Die Restaurierung eines Meisterwerks. Das Tiepolo-Fresko im Treppenhaus der Würzburger Residenz*, München 2009, S. 109–118
- LUBELLI/VAN HEES 2013 – LUBELLI, BARBARA/VAN HEES, ROB P. J.: *Desalination of historical brick masonry: The case of the Waag building in Amsterdam*, in: *Desalination of Historic Buildings, Stone and Wall Painting*, edited by Heritage, Alison/Heritage, Adrian/Zezza, Fulvio, First published 2013 by Archetype Publications Ltd, London 2013, pp. 122–129

LUBELLI/VAN HEES/HILBERT 2013 – LUBELLI, BARBARA/VAN HEES, ROB P. J./HILBERT, GEORG: *Desalination of masonry structures, Research towards the development of a modular system of poultices*, in: HERITAGE/HERITAGE/ZEZZA 2013a, pp. 54–61

PEL/HERITAGE/VORONINA 2013 – PEL, LEO/HERITAGE, ALISON/VORONINA, VICTORIA: *Physical principles affecting the efficiency of salt extraction by poulticing*, in: HERITAGE/HERITAGE/ZEZZA 2013a, pp. 21–29

RICHARD 2002 – RICHARD, KATHARINA: *Kompressenentsalzung – Mechanismen der Salzbindung an mineralische Zusätze*, Diplomarbeit, Institut für Mineralogie, Universität Hannover 2002

SAWDY et al. 2013 – SAWDY, ALISON/LUBELLI, BARBARA/VORONINA, VICTORIA/PEL, LEO: *Optimizing the extraction of soluble salts from porous materials by poultices*, in: *Studies in Conservation* 55, 2010, No. 1, pp. 26–40

STEIGER 2003 – STEIGER, MICHAEL: *Thermodynamische Eigenschaften von Salzgemischen*, in: Leitner, Heinz/Laue, Steffen/Siedel, Heiner (Hrsg.): *Mauersalze und Architekturoberfläche*, Tagungsbeiträge, Hochschule der Bildenden Künste Dresden, 1. bis 3. Februar 2002, Leipzig 2003

STEINHÄUSER/WENDLER 2009 – STEINHÄUSER, UTE/WENDLER, EBERHARD: *Untersuchungen zur Mobilisierung von Gips*, in: Staschull, Matthias/Rösch, Bernd (Hrsg.): *Die Restaurierung eines Meisterwerks. Das Tiepolo-Fresko im Treppenhaus der Würzburger Residenz*, München 2009, S. 119–132

VERGÈS-BELMIN/HERITAGE/BOURGÈS 2013 – VERGÈS-BELMIN, VÉRONIQUE/HERITAGE, ALISON/BOURGÈS, ANN: *Powdered cellulose poultices in stone and wall painting conservation*, in: *Studies in conservation* 56, 2013, No. 4, pp. 281–297 (s. a.: HERITAGE/HERITAGE/ZEZZA, 2013, pp. 62–73)

WTA Merkblatt 2003 – *Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen*, WTA Merkblatt 3-13-01/D. WTA-Publications, München 2003