

## EISENENTSALZUNG MIT KOMPRESSENSYSTEMEN

### UNTERSUCHUNG ZUR ANWENDUNG

### AN ARCHÄOLOGISCHEN EISEN-ORGANIK-KOMPOSITEN

Im Bereich der archäologischen Kompositobjekte stellen besonders Kombinationen aus Eisen und organischem Material (im Folgenden auch kurz als »Organik« bezeichnet) für die Konservierung und Restaurierung eine Herausforderung dar. Vor allem, wenn eine Entsalzung der Objekte nötig wird.

Die bisher angewandten effektiven Methoden zur Eisenentsalzung sind Waschverfahren, die im stark alkalischen pH-Bereich (pH 13-15) liegen. Organische Materialien tierischen Ursprungs, wie Knochen, Leder, Haare und Horn, werden unter diesen Bedingungen stark abgebaut. Für diese kommt eine herkömmliche Behandlung im Bad nicht infrage. Die Entsalzung erfolgt bei solchen Objekten entweder gar nicht, oder es werden Schutzkappen bzw. Schutzüberzüge verwendet, um die Bereiche vor einem Kontakt mit der alkalischen Lösung zu schützen. Problematisch ist dabei jedoch die Beständigkeit der angewandten Materialien und deren Unterwanderung durch die Entsalzungslösung während der langen Behandlungszeit im Bad von durchschnittlich 15 Wochen<sup>1</sup>.

In der Masterarbeit<sup>2</sup>, die diesem Artikel zugrunde liegt, wurde ein anderer Ansatz erforscht: die partielle Eisenentsalzung von Kompositobjekten. Dabei sollen nur die Eisenbereiche gezielt entsalzt werden, sodass die Organik nicht mit der Entsalzungslösung in Kontakt kommt und somit nicht gefährdet wird.

#### Forschungsstand Eisenkorrosion und Entsalzung

Allgemein werden die Korrosionsprozesse während der Bodenlagerung und die Nachkorrosion nach

der Fundbergung unterschieden. Während im Boden elektrochemische Prozesse mit begrenzter Sauerstoffbeteiligung langsam ablaufen, findet nach der Fundbergung eine starke Beschleunigung der Korrosionsprozesse durch das Austrocknen und den damit einhergehenden, ungehinderten Zutritt von Sauerstoff statt. In der ersten Phase werden Salze im Objekt eingelagert und reagieren in der zweiten Phase mit dem Sauerstoff. Dadurch kann bereits bei einem Luftfeuchtegehalt von unter 20 %<sup>3</sup> ein Korrosionskreislauf in Gang gesetzt werden, der in letzter Konsequenz die vollständige Zerstörung des Objektes zur Folge hat. Die Chloridionen und chloridhaltige Eisenhydroxyverbindungen sind dabei nach heutigem Forschungsstand die treibenden Kräfte<sup>4</sup>. Die Chloridionen reichern sich im Boden am Metallkern an, um den hier entstehenden positiven Ladungsüberschuss der Eisen(II)-Ionen auszugleichen<sup>5</sup>.

Das Korrosionsprodukt Akaganéit (Eisenoxyhydroxid  $\beta$ -FeOOH, mit in der Struktur eingeschlossenen Chloridionen) ist ein Marker für hohe Chloridkonzentrationen in den Objekten. Es bildet sich bei einem hohen Sauerstoffangebot sehr schnell, d. h. vor allem nach der Fundbergung, und bindet Chloride in seiner Struktur ein. Das eigentliche Problem sind jedoch die auf der großen Oberfläche des Akaganéits angelagerten Chloride, da diese im Gegensatz zu den strukturell eingebundenen frei beweglich sind und in Lösung gehen können<sup>6</sup>.

Um den zerstörerischen Kreislauf zu stoppen oder zumindest zu verlangsamen, gibt es schon seit der frühen Restaurierungsgeschichte Methoden, die Salze aus den Objekten zu lösen. Bäder mit wässrigen Natriumhydroxydlösungen haben sich weitestgehend in der Praxis durchgesetzt. Da eine vollstän-

dige Entsalzung bislang nicht angenommen werden kann, sollten die Chloride zumindest auf ein unschädliches Niveau reduziert werden. Die Entsalzung erfolgt durch die Diffusion der Chloridionen über Poren und Risse aus dem Objekt und direkt von der Objektoberfläche in die Lösung<sup>7</sup>. Damit ist das Maß der Entsalzung abhängig von der Dicke, der Porosität, dem spezifischen Bereich der Poren und Risse sowie deren Verbindung untereinander<sup>8</sup>. Die als unschädlich ermittelten Restchloridgehalte von unter 200ppm<sup>9</sup> bzw. 170ppm<sup>10</sup> gelten für eine gleichmäßige Verteilung der Chloride im Objekt. Wie B. Schmutzler herausstellt, können trotz dieser Werte lokale Korrosionsausblühungen an Stellen mit höherer Chloridkonzentration entstehen<sup>11</sup>. Der Grund dafür liegt in der inhomogenen Chloridverteilung archäologischer Funde, während die Grenzwerte anhand mariner Eisenfunde und Eisenplättchen ermittelt wurden, deren Chloridverteilung homogen ist. Die Nachkorrosion bei den genannten Werten ist jedoch stark vermindert. Daher ist bei der Entsalzung immer ein möglichst niedriger Restchloridgehalt anzustreben.

### Kompressensysteme zur Entsalzung

Bei Kompositen steht der Restaurator vor dem Problem, dass die Badlösungen stark alkalisch sind und somit die Organik schwer schädigen. Eine dichte Abdeckung der organischen Objektbereiche ist nicht leicht zu bewerkstelligen. Vor allem, da das Objekt zur Entsalzung Monate in den Badlösungen verweilen muss. Erstrebenswert wäre es daher, die Entsalzung lokal begrenzt auf die Eisenteile anwenden zu können. In vielen Gebieten der Restaurierung werden Kompressensysteme eingesetzt, »(u)m die Wirkung von Lösemitteln oder auch Feuchtigkeit lokal begrenzt zu intensivieren und damit [...] Materialien und Substanzen zu quellen, zu lösen und gegebenenfalls auch zu absorbieren«<sup>12</sup>. Nach den Materialien, die dafür genutzt werden, um das Lösemittel auf die Oberfläche aufzubringen (= Trägermaterial/Substrat), werden Kompressen, Pasten und

Gele unterschieden. In der Diplomarbeit von U. Haller<sup>13</sup> wird die Bezeichnung »Kompressensysteme« als Oberbegriff verwendet.

Das Wirkungsprinzip von Kompressensystemen beruht grundlegend auf zwei Arten des Stofftransports: Diffusion und Advektion. Bei der Diffusion bewegt sich der Stoff selbst, aufgrund eines Konzentrationsunterschiedes, durch ein Medium. Die Advektion beschreibt den Transport eines Stoffes durch ein fließendes bzw. sich bewegendes Medium. Beide Kräfte werden jedoch meist gekoppelt angewendet, d. h., die Kompressensysteme werden durch eine Abdeckung erst einige Zeit feucht gehalten, damit die Flüssigkeit in das Objekt eindringen kann. Danach wird die Abdeckung abgenommen und dadurch die Trocknung auf dem Objekt ermöglicht. Der erste Stofftransport kann durch Diffusion stattfinden, während bei der späteren Trocknung die Flüssigkeit mit gelösten Salzen durch die Kapillarwirkung in das Kompressenmaterial gezogen wird.

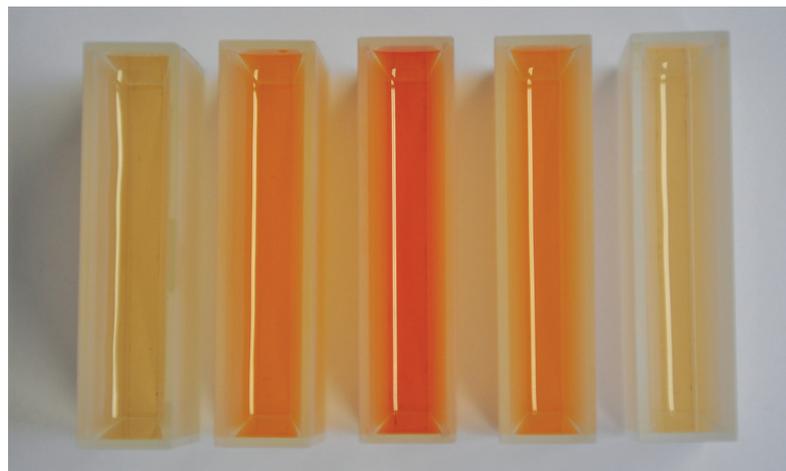
Kompressen und Pasten werden vermehrt für Entsalzungen von Stein und Putzschichten verwendet, da ihre Wirkungsreichweite größer ist als die von Gelen und sie in tiefer liegende Schichten vordringen. Die Gele spielen dagegen bei der Oberflächenreinigung eine wichtige Rolle, ihre Absorptionswirkung ist dabei enorm. Die Haftung bei Kompressen auf dem Objekt ist im Vergleich zu den anderen Systemen schlecht, da die verwendeten Materialien aus großen Partikeln bestehen und die Adhäsion damit geringer ist. Pasten besitzen viele kleine Kapillaren, die bei der Trocknung eine große Kapillarwirkung entwickeln. Durch ihre kleine Teilchengröße haften Pasten auch sehr gut an der Objektoberfläche.

Archäologische Eisenobjekte stellen je nach speziellem Aufbau der Korrosionsschichten ein mehr oder weniger poröses Material dar. Vor allem nach dem Zutritt von größeren Mengen an Sauerstoff und der Austrocknung bilden sich viele Risse und Hohlräume. Damit wird nicht nur ein Stofftransport durch Diffusion, sondern auch durch Kapillarwirkung möglich. So kann das Gel bei reduzierten Korrosionsschichten unter Umständen allein durch die hohe Advektion bei der Trocknung viele Chloride aus dem Objekt entfernen.

Im Vergleich zu einer Badentsalzung ist zu erwarten, dass die Behandlung mit Kompressensystemen einen noch längeren Zeitraum einnimmt, da das Kompressenmaterial die Diffusionsprozesse verlangsamt. Dieser Verlangsamung könnte durch eine geeignete Vorbereitung der Objekte und Änderungen weiterer, für die Entsalzungsgeschwindigkeit wichtiger Parameter entgegengewirkt werden. Dass die Chloridextraktion u. a. von der Beschaffenheit des Objektes abhängt, erklären N. A. North und C. Pearson schon in ihrer ersten Veröffentlichung zur Natriumsulfitentsalzung: »For a given wash solution the rate and extent of chloride release will be controlled by the nature of the solid, in particular by the amount of corrosion product, the initial concentration of chloride in the solid, the porosity and the shape of the corrosion layers«<sup>14</sup>. Demnach sollte durch eine Reduktion der Korrosionsschichten bis auf die dichten Korrosionsprodukte (DPL)<sup>15</sup> vor der Entsalzung eine bessere Erreichbarkeit der vermehrt an der Grenzschicht zwischen Metallkern und DPL vorliegenden Chloride gewährleistet sein. Durch eine Erhöhung der Laugenkomponente in der Lösung kann B. Schmutzler eine nachweislich höhere Entsalzungseffizienz dokumentieren<sup>16</sup>. Eventuell könnte damit die verminderte Geschwindigkeit der Kompressensysteme ausgeglichen werden. Eine weitere Möglichkeit, die Entsalzung zu beschleunigen, besteht in der zusätzlichen Nutzung der Advektion. Um das Konzentrationsgefälle zwischen Objekt und Kompressensystem immer möglichst groß zu halten, wird wie bei der Badentsalzung das Entsalzungsmedium in regelmäßigen Abständen erneuert.

### Chloridbestimmung

Für die Überwachung des Entsalzungsprozesses in den Bädern und Kompressenmaterialien sowie um das Ende der Behandlung zu bestimmen, werden Methoden benötigt, den Chloridgehalt quantitativ zu messen. Die von D. Wunderlich<sup>17</sup> verwendete fotometrische Methode ist sehr empfindlich und



**Abb. 1** Messlösung in Küvetten bereit zur Messung. – (Foto Ch. Leßmann).

wird auch bei der Bestimmung von Leitungswasser mit sehr engen Grenzwerten eingesetzt<sup>18</sup>. Sie umfasst laut T. M. Florence und Y. J. Farrar einen Messbereich von 0,015 bis 2 ppm<sup>19</sup>. Dieser Messbereich deckt sich mit den zu erwartenden Messwerten der kleinen Probenmengen und stark verdünnten Lösungen, die im Versuchsaufbau zum Einsatz kommen. Auch in anderen Forschungsarbeiten zum Thema Eisenentsalzung, wie bei D. Wunderlich<sup>20</sup> und B. Schmutzler<sup>21</sup>, wurde die fotometrische Methode erfolgreich für die Bestimmung von Chloriden in Badlösungen eingesetzt, weshalb diese hier ebenfalls Anwendung fand. Die fotometrische Bestimmung von Chloriden beruht auf vergleichenden Messungen von Lösungen, deren Analyten durch die im Folgenden beschriebene Farb-reaktion sichtbar gemacht werden.

Zur Anfärbung wird dabei die Quecksilber(II)thiocyanat-Methode angewandt. Der Probelösung werden zu gleichen Teilen zwei Reagenzien zugesetzt, Eisen(III)nitrat in Salpetersäure und eine gesättigte Quecksilber(II)thiocyanat-Lösung in Ethanol. Es bildet sich bei Anwesenheit von Chloriden ein Chloromercurat-Komplex unter Freiwerdung von Thiocyanat-Ionen. Diese reagieren mit den Eisen(III)-Ionen zu einem roten Farbkomplex. Je höher die Chloridkonzentration in einer Lösung ist, umso mehr Thiocyanat-Ionen werden frei und umso intensiver wird der rote Farbton (**Abb. 1**).

Produkt	Material	Alkalien- beständig- keit	Appli- kation	Ab- nahme	Chlorid- gehalt (µg/g)	Absetzung in Lösungen
Arbocel® BC 200	kurzfaserige Cellulose	+	++	+	48	++
Attapulgit	Schichtsilikat (Magnesium-Aluminium-Hydrosilikat)	++	++	++	97	–
Bentonit	Schichtsilikat (Hauptbestandteil Montmorillonit)	++	++	++	195	–
Cristobalitmehl 0,01-0,1 mm	Siliziumdioxid	++	+	+	22	++
Tixogel®	Silikat (chemisch veränderter Bentonit)	+	+	–	●	●
Laponite® RD	synthetisches Schichtsilikat	+	++	++	11	+
Gelatine	tierisches Protein	–	●	●	●	●
Agar-Agar	pflanzliches Polysaccharid	–	●	●	●	●
Klucel® HF	Hydroxypropylcellulose	+	+	–	●	●
Methocel® A4M	Methylcellulose	+	++	+	58	+

**Tab. 1** Auswahl der Materialien für die Kompressensysteme. – Legende: ++ sehr gut; + gut; – schlecht; ● nicht getestet, da vorher schon negative Eigenschaft; grau markiert sind die für die Probereihe verwendeten Produkte.

## Entsalzungsmaterialien

Als Entsalzungslösung wurde nach den neuesten Forschungen und wegen der leichten Handhabung Natriumhydroxid als wässrige Lauge verwendet. Die Konzentration von 0,5 mol/l wurde aus der Literatur<sup>22</sup> als Standardkonzentration übernommen.

Die Materialien, die bei der Herstellung von Kompressensystemen Anwendung finden, sind vielfältig. Das für die Eisenentsalzung verwendete Lösemittel Natriumhydroxid setzt mit seiner hohen Alkalität jedoch schon ein Auswahlkriterium. Es sind noch weitere Faktoren zu beachten, sodass sich folgende Anforderungen an Materialien zur Entsalzung von Eisen ergeben:

- Alkalibeständigkeit (bis pH 14);
- geringer Chloridgehalt (für ein möglichst hohes Konzentrationsgefälle zwischen Objekt und Kompressenmaterial und keinen zusätzlichen Eintrag von Chloriden);
- gute Applikations- und Abnahmeeigenschaften;
- schnelle und möglichst vollständige Absetzung in Lösungen (für eine genaue fotometrische Chloridbestimmung).

Im Vorfeld wurden zehn häufig für Kompressensysteme genutzte Materialien ausgewählt und auf

ihre Alkalienbeständigkeit geprüft (s. **Tab. 1**). Die Ergebnisse grenzen die möglichen Materialien bzw. Materialgruppen auf vier ein: Cellulosefasern, Steinmehle, Methylcellulose und das künstliche Schichtsilikat Laponite® RD. Davon kamen die drei folgenden Produkte für die Probereihe zur Anwendung.

Als Kompressenmaterial wurde Arbocel als Cellulosefaserstoff gewählt. Das Produkt Arbocel® BC 200 besteht zu 99,5 % aus naturbelassenen und wasserunlöslichen Cellulosefasern. Durch die kurzen Fasern lässt es sich mit Flüssigkeiten sehr gut unebenen Oberflächen anpassen.

Cristobalit ist eine Hochtemperaturmodifikation des Siliciumdioxids (SiO<sub>2</sub>), die sowohl natürlich vorkommt, als auch künstlich bei hohen Temperaturen aus Quarzsand hergestellt wird. Als Mehl bildet es mit Flüssigkeiten eine weiße, pastöse Masse. In verdünnten Lösungen setzt es sich schnell als weißer Bodensatz ab.

Laponite® RD ist ein synthetisch hergestelltes Schichtsilikat (Na<sup>+0.7</sup>[(Si<sub>8</sub>Mg<sub>5.5</sub>LiO<sub>3</sub>)O<sub>20</sub>(OH)<sub>4</sub>]<sup>-0.7</sup>). Mit wässrigen Lösungen bildet es ein klares, farbloses Gel aus. Es hat einen sehr geringen Chloridgehalt und zeichnet sich durch hervorragende Applikations- und Abnahmeeigenschaften aus.

## Probenmaterial

Als Versuchskörper dienten archäologische Objekte eines Fundortes und einer Objektart. Der Vorteil an archäologischen Funden gegenüber künstlich hergestellten Versuchskörpern ist die langsam gewachsene Korrosionsschicht mit einer vielfältigen Zusammensetzung an verschiedenen Korrosionsprodukten. Damit ist es möglich, eine realistische Einschätzung über den Erfolg der Entsalzungsmethode zu erlangen. Die Nutzung von archäologischen Funden ist jedoch aus demselben Grund auch problematisch. Durch den unterschiedlichen Aufbau kann jedes Objekt eine unterschiedliche Chloridbelastung aufweisen.

Die aus Mecklenburg-Vorpommern stammenden Beschläge, die zur Herstellung der Probekörper dienen, sind stark durch eine Nachkorrosion geschädigt. Die äußere Korrosionsschicht löst sich in Schichten von einer dunklen kompakteren, kraterreichen Korrosionsschicht mit orange bis gelben Akaganéit-Kristallen.

Aus drei ca. 8mm starken Beschlägen mit mehrfachen Lochungen wurden kleine Proben von ca. 2 cm x 2,5 cm Kantenlänge hergestellt (Abb. 2-3). Eine einheitliche Zerteilung war durch die unterschiedliche Form der Objekte nicht möglich. Die Kompensierung dieser Fehlerquelle erfolgt durch den Bezug des Entsalzungserfolgs auf das Gewicht des jeweiligen Probekörpers.

## Durchführung der Versuchsreihen

Durch die drei zu erprobenden Kompressensysteme und die Badlösung zum Vergleich ergeben sich vier Versuchsreihen. Für diese vier Versuchsanordnungen wurden jeweils sechs Proben verwendet. Je zwei stammen von demselben Objekt. Die Versuche wurden bei Raumtemperatur über einen Zeitraum von 63 Tagen mit anschließender Spülung von 14 Tagen durchgeführt. Dabei erfolgte wöchentlich ein Wechsel der Bäder und Kompressensysteme.



**Abb. 2** Exemplarischer Probekörper in Aufsicht. – (Foto Ch. Leßmann).



**Abb. 3** Exemplarischer Probekörper im Schnitt. – (Foto Ch. Leßmann).

Für jedes Kompressensystem wurde eine ideale Mischung von Feststoff und 0,5 molarer Natriumhydroxidlösung erstellt. Diese wurde mit einer Schichtdicke von ca. 0,5 cm auf die sechs Seiten der Proben aufgetragen. Verpackt in PE-Folie und zusätzlich in einer luftdicht schließenden PE-Box<sup>23</sup>, wurden die Proben über sechs Tage gelagert. Am sechsten Tag wurden die Proben aus der Box entnommen und die Folie zur Abtrocknung entfernt. Die trockenen Kompressensysteme wurden abgenommen. Direkt im Anschluss erfolgte der neue Auftrag. Zum Vergleich wurde eine Versuchsreihe mit einem Natriumhydroxidbad durchgeführt. Dazu wurden



**Abb. 4** Lösungen zur Bestimmung des Restchloridgehaltes. Von links: gefilterte Säurelösung, reduzierte Lösung, Maßlösung mit Reagenzien und Blindprobe. – (Foto Ch. Leßmann).

100 ml einer 0,5 molaren Natriumhydroxidlösung in 125 ml fassende PE-Schraubdeckelflaschen<sup>24</sup> gegeben, sodass die Probekörper vollständig bedeckt waren und sich nur wenig Sauerstoff im System befand.

Nach der Entsalzung schloss sich bei allen Versuchsanordnungen eine Spülung mit vollentsalztem Wasser an. Dazu wurde die Natriumhydroxidlösung in allen Versuchsreihen durch Wasser ersetzt, der restliche Versuchsaufbau beibehalten. Bei Raumtemperatur wurden die Proben über zwei Wochen gespült. Dabei wurde wieder ein wöchentlicher Wechsel der Kompressen und Bäder durchgeführt. Mit einem pH-Wert der Spülssysteme von 5,6 wurde ein neutraler Endpunkt erreicht. Die anschließende Trocknung erfolgte bei Raumtemperatur über einen Tag im Digestorium.

## Messung des Entsalzungsverlaufs

Um den Verlauf der Entsalzung festzuhalten, wurden die Chloridgehalte der Kompressensysteme und Bäder wöchentlich gemessen. Für die Messung wurden diese in eine Lösung überführt. Dazu wurde das getrocknete Kompressenmaterial einer Probe mit vollentsalztem Wasser auf ein Volumen von 100 ml gebracht. Die Lösung wurde nach 100× Schütteln für drei Tage zur Absetzung der Feststoffe stehen gelassen. Anschließend erfolgte die Chloridanalyse fotometrisch nach der Thiocyanatmethode.

Die Spüllösungen waren bei allen Systemen durch die Oxidation des Eisenkerns mit Wasser und Sauerstoff orange-gelblich verfärbt (Eisen[III]-Ionen). Im Falle der Bäder, Kompressen und Pasten stellte das kein Problem dar, da sich diese Partikel absetzten und eine klare Lösung für die Messung zur Verfügung stand. In den abgesetzten Partikeln könnten noch Chloride gebunden sein, wovon in der Masterarbeit jedoch nicht ausgegangen wurde. Daher wurde dieser Punkt auch nicht in den Messungen berücksichtigt. Bei der Messung der Spüllösungen der Gele entstand jedoch ein unvorhergesehenes Problem. Die Farbigkeit der Lösung änderte sich über eine Woche nicht, d.h., die in der Lösung befindlichen Korrosionsprodukte setzten sich nicht ab. Alle Versuche, die Lösung zu klären, durch Filtration, Absetzung oder Fällung der Eisen(III)-Ionen, schlugen fehl. Das Problem der farbigen Spüllösungen konnte nicht gelöst und die Chloridgehaltmessungen an diesen Lösungen nicht durchgeführt werden.

Um den Restchloridgehalt der Proben nach der Entsalzung bestimmen zu können (**Abb. 4**), mussten die Chloride in Lösung gebracht werden. Dazu war eine Zerstörung der Proben notwendig. In vorangegangenen Forschungsarbeiten wurde gezeigt, dass ein Auflösen der Proben in 20 %iger Schwefelsäure in abgedeckten Behältern ohne einen nennenswerten Chloridverlust<sup>25</sup> funktioniert. Da das vorgesehene Probenmaterial einen sehr starken Eisenkern aufwies, war eine vollständige Auflösung schlecht zu bewerkstelligen. Die Proben wurden daher in Schwefelsäure gelegt, bis die Korrosionsschichten

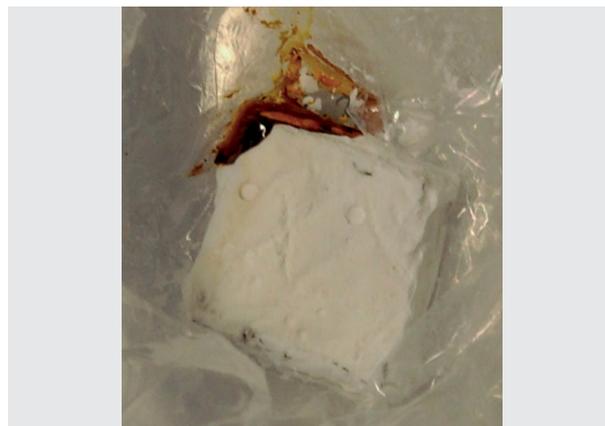
gelöst und nur noch der blanke Eisenkern ohne sichtbare Risse übrig war. Es wird davon ausgegangen, dass sich durch diese Vorgehensweise keine relevanten Chloridmengen der Analyse entziehen.

## Auswertung

Bei allen Versuchsanordnungen, außer den Bädern, kam es in der ersten Woche bei einigen Proben zu neuen Korrosionserscheinungen in Form von orange-braunen Verfärbungen im Kompressenmaterial oder Korrosionstränen (**Abb. 5**). In der weiteren Behandlungszeit waren keine mehr vorhanden. Das Ganze kann durch Chloridnester erklärt werden, die im Kontakt mit der wässrigen Lösung reagierten. Infolge der fortschreitenden Passivierung des Eisenkerns durch die Hydroxidionen blieben im weiteren Verlauf weitere Korrosionserscheinungen aus.

Bei den Spüldurchgängen nach der Entsalzung kam es nur an den Schnittkanten der Proben, d.h. am blanken Metallkern, zu erneuten Korrosionserscheinungen. Es ist von einer einfachen Oxidation auszugehen.

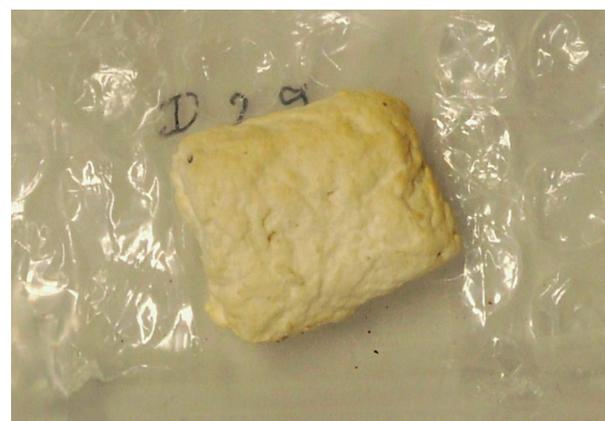
Bewertet man die Praktikabilität der Systeme bei Auftrag und Abnahme, geht das Laponite-Gel (**Abb. 6**) klar als Sieger hervor. Es lässt sich sehr präzise und sicher applizieren. Getrocknet liegt es in Schollen lose auf der Oberfläche auf und kann einfach abgenommen werden. Die Cellulosefasern (**Abb. 7**) lassen sich ebenfalls gut aufbringen, sind in der Anpassung auf den Anwendungsbereich jedoch unpräziser. Getrocknet bilden sie eine geschlossene und feste Schicht, die leicht und so gut wie rückstandsfrei im Ganzen abgehoben werden kann. Einzelne zurückbleibende Fasern sind mit Druckluft leicht entfernbar. Die Paste aus Cristobalit (**Abb. 5**) lässt sich zwar anfangs präzise applizieren, läuft jedoch durch die Absetzung des Cristobalitmehls nach einiger Zeit leicht in die Breite. Nachteilig ist auch, dass bei der Trocknung eine sehr feste Kruste entsteht, die sehr schlecht abgenommen und nur mit dem Skalpell aufgebrochen oder abgekratzt werden kann. Durch die Feinheit des Materials (0,01-



**Abb. 5** Probekörper mit getrockneter Paste. – (Foto Ch. Leßmann).

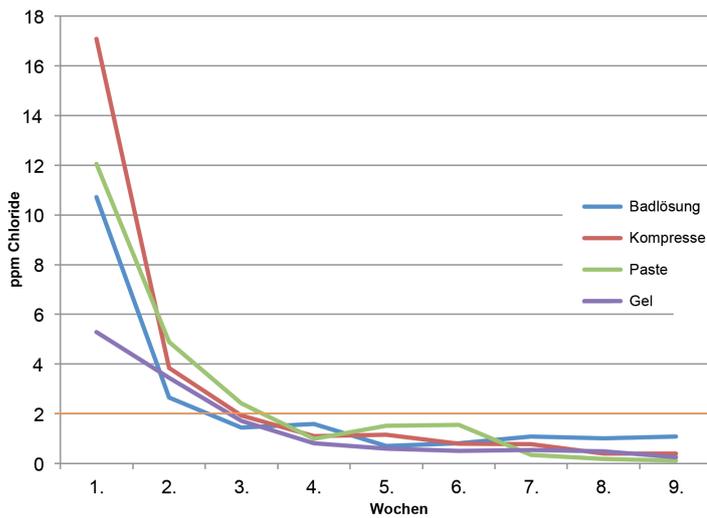


**Abb. 6** Probekörper mit frisch aufgetragenem Gel. – (Foto Ch. Leßmann).



**Abb. 7** Probekörper mit getrockneter Kompress. – (Foto Ch. Leßmann).

0,1 mm) bleibt auch nach der Entfernung von Resten mit Pinsel oder Druckluft ein weißer Schleier auf der Oberfläche zurück.



**Diagramm 1** Durchschnittlicher Entsalzungsverlauf der Systeme. – (Graphik Ch. Leßmann).

Für die Beurteilung der Wirksamkeit einer Entsalzung werden die Entsalzungseffizienz (EE) und der Restchloridgehalt (RCG) als Kriterium herangezogen<sup>26</sup>. Die Entsalzungseffizienz ist die Angabe des ausgewaschenen Anteils an Chloriden, bezogen auf den Gesamtchloridgehalt (GCG) der Probe in Prozent, und wird schon von N. A. North und C. Pearson<sup>27</sup> verwendet. Der Restchloridgehalt wird durch das Auflösen der Proben nach der Behandlung bestimmt. Er gibt die noch im Objekt verbliebene Menge an Chloriden an. Dieser Wert sagt nichts über die Verteilung der Chloride im Objekt aus, die bei archäologischem Eisen nachweislich sehr inhomogen sein kann<sup>28</sup>. Beide Werte sind von der Erreichbarkeit der Chloride in den Korrosionsschichten abhängig. So können trotz einer als beendet betrachteten Entsalzung durch in den Korrosionsschichten vorhandene Diffusionsbarrieren immer noch auswaschbare Chloride im Objekt enthalten sein. Das schlägt sich in dem Wert des Restchloridgehalts nieder, was wiederum auch die Entsalzungseffizienz beeinflusst. Diese Tatsache sollte bei der Auswertung von Versuchsanordnungen an archäologischem Probenmaterial immer berücksichtigt werden.

Bei der Auswertung der Messungen wird am Verlauf der Behandlung (**Diagramm 1**) deutlich, dass die Menge an gelösten Chloriden bei der Kompressse

ähnlich schnell abfällt wie bei der Badbehandlung. Bei dem Gel verläuft der Abfall sehr viel konstanter und die gelösten Chloridmengen sind im Vergleich sehr viel geringer. Die Paste liegt in ihrem Verlauf zwischen diesen Extremen. Der starke Kurvenabfall am Anfang der Behandlung hat mit der großen Menge gut zugänglicher Chloridionen in den oberen Korrosionsschichten zu tun, die anfänglich sofort ausgespült werden. In den nachfolgenden Durchgängen werden langsam die tiefer sitzenden Chloride erreicht und längere Wege sind zurückzulegen und das Konzentrationsgefälle wird geringer, sodass die Diffusion langsamer wird und geringere Chloridmengen aus dem Objekt gezogen werden.

Die Spülungen scheinen keinen Einfluss auf die Entsalzung der Kompressensysteme zu haben. Bei der Badentsalzung wurden jedoch in den Spüllösungen sehr viele Chloride gemessen. Diese erhöhen die Entsalzungseffizienz um durchschnittlich 5%. Dieses Phänomen ist wahrscheinlich damit zu erklären, dass bei der Trocknung die gelösten Chloride der Badlösung auf der Oberfläche verblieben, während sie bei den Kompressen und Pasten in das Kompressenmaterial gezogen wurden. Für die nicht messbaren Spüllösungen der Gelproben sind nach dieser Theorie ähnlich wenig gelöste Chloride anzunehmen.

Nach dem von B. Schmutzler durch die Messgenauigkeit der fotometrischen Methode festgelegten Endpunkt einer Entsalzung bei 2 ppm Chloriden in der Lösung hätten die Behandlungen der Proben bei allen vier Systemen schon nach der dritten bzw. vierten Woche beendet werden müssen. Zieht man nur aus diesen Werten eine Entsalzungseffizienz, ergeben sich geringere Werte. Konkret mindert sich die Entsalzungseffizienz der Kompressensysteme um 6% und die des Bades um 10%. Die gemessenen Lösungen der Kompressensysteme sind aber verdünnt, da der Chloridgehalt der Kompressenmaterialien nicht direkt gemessen werden kann, sondern diese nach ihrer Abnahme vom Objekt erst in Lösung gebracht werden müssen. Daher müsste ein anderer Wert für den Endpunkt der Entsalzung angesetzt werden, da sonst mehr lösliche Chloride im Objekt zurückbleiben als nötig.

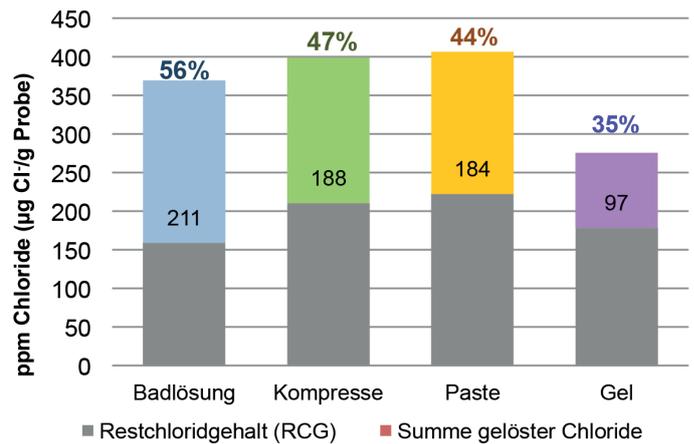
## Effektivität der Chloridextraktion

Die Komresse (Arbocel® BC 200) hat mit 47 % Entsalzungseffizienz von den erprobten Systemen am besten abgeschnitten (**Diagramm 2**; vgl. **Tab. 2**). Hier sind auch die Restchloridgehalte der Proben mehrheitlich unter den für eine Nachkorrosion als unkritisch betrachteten 170 ppm Chloride pro Gramm Objektgewicht (**Diagramm 4**). Die Paste (Cristobalite) erreicht eine Entsalzungseffizienz von 44 %, demnach liegt sie nur knapp hinter der Komresse. Die Restchloridgehalte sind dabei jedoch vermehrt über dem Grenzwert 170 ppm (**Diagramm 5**). Das Gel (Laponite® RD) hat mit einer Entsalzungseffizienz von 35 % den schlechtesten Wert (**Diagramm 6**).

Bei der Komresse kann die Entsalzungslösung durch die lose Bindung an das Material tief in die Objektoberfläche eindringen. Der Stofftransport kann hier wie bei der Badentsalzung sehr gut über Diffusion stattfinden. Der zusätzliche erhoffte Stofftransport durch Advektion bei der Trocknung der Komresse war minimiert, da die Poren des Kompressenmaterials wahrscheinlich größer sind, als die der Korrosionsschichten. Aus diesem Grund wurde nur die oberflächlich aufliegende Lösung bei der Trocknung in die Komresse gezogen und die tiefer liegende Lösung nicht.

Bei der Paste wurde die Lösung ebenfalls recht gut in die Objektoberfläche abgegeben, und die Chloride durch Diffusion herausgelöst. Die Advektion müsste theoretisch durch die Feinheit des Cristobalitmehls gegeben sein, da die Porengröße wohl kleiner ist als die der Kompressen. In den Entsalzungseffizienzen spiegelt sich das jedoch nicht wider. Dies kann aber auch an anderen, noch unbekanntenen Faktoren liegen.

Die im Vergleich schlechte Wirksamkeit des Gels war zu erwarten, da die Lösung sehr fest in die Struktur des Gels eingebunden ist und daher nur an der oberen Grenzfläche des Objektes arbeitet. Es wurden dennoch unerwartet viele Chloride gelöst, da die Effizienz theoretisch noch geringer hätte ausfallen können. Andererseits sind durch die kleinen Poren des Gels und die sehr gute Haftung auf der Objekt-



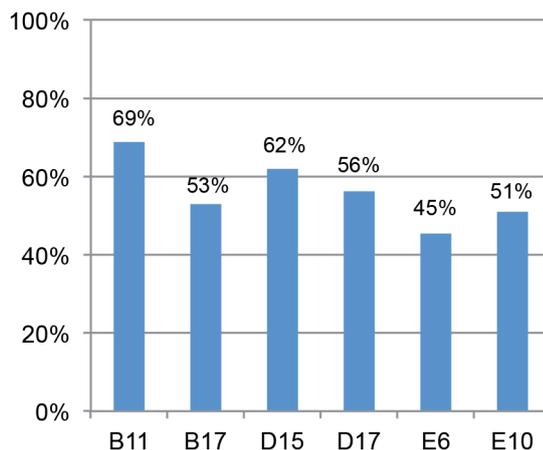
**Diagramm 2** Effektivität der Chloridextraktion der verschiedenen Systeme, abgetragen sind die Gesamtchloridgehalte, davon grau hinterlegt der Restchloridgehalt, die Entsalzungseffizienz über den Säulen in Prozent angegeben. – (Graphik Ch. Leßmann).

Rang	System	Ø RCG (µg/g)	Ø Standardabweichung (µg/g)	Ø EE (%)
1	Badlösung	179	± 10	56
2	Komresse	159	± 13	47
3	Paste	211	± 8	44
4	Gel	222	± 8	35

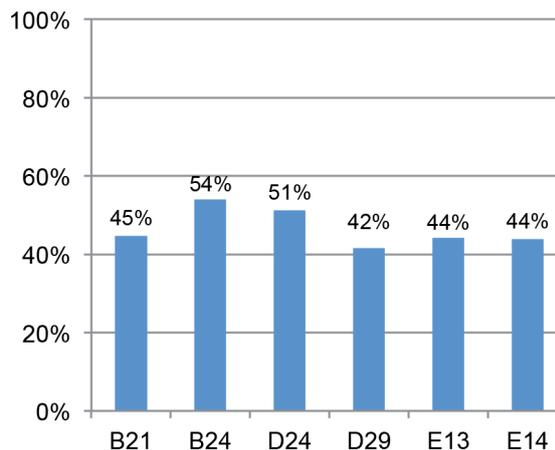
**Tab. 2** Rangfolge der Entsalzungssysteme nach Entsalzungseffizienz (EE; RCG = Restchloridgehalt).

oberfläche die Voraussetzungen für ein Herauslösen der Chloride mittels Advektion gegeben. Zudem zeigt die Höhe der Entsalzungseffizienz, dass durch die abgespaltenen Korrosionsschichten sehr viele Chloride an der Oberfläche vorliegen und daher auch durch das Gel mobilisiert werden können.

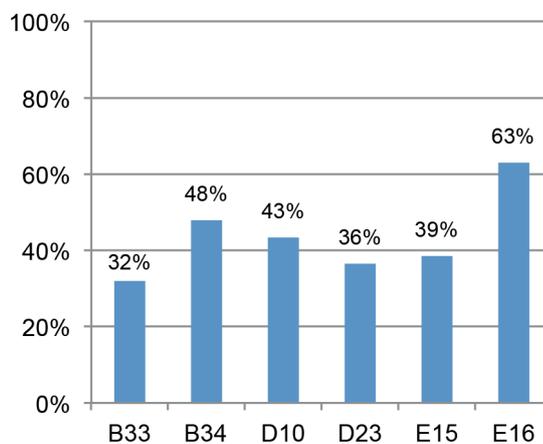
Die Entsalzungseffizienz des Bades (**Diagramm 3**) liegt mit 56 % hinter den für die Entsalzung in nicht entlüfteten Natriumhydroxidlösungen erreichten Werten in anderen Forschungsarbeiten. B. Schmutzler<sup>29</sup> konnte bei der Auswertung von 578 Nägeln eine durchschnittliche Entsalzungseffizienz von 80 % bei einem Restchloridgehalt von 122 mg/kg erreichen. D. Watkinson<sup>30</sup> ermittelte bei einer Entsalzung von 16 Objekten eine durchschnittliche Entsalzungseffizienz von 64 %. Die Entsalzungsversuche bei B. Schmutzler fanden im Unterschied zu denen von D. Watkinson im geschlossenen System statt und damit quasi unter Luftausschluss, wodurch



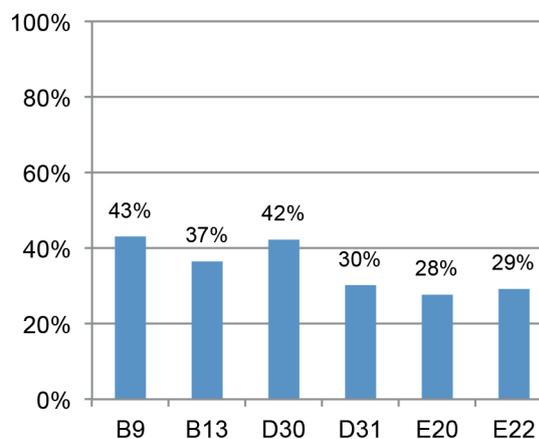
**Diagramm 3** Entsalzungseffizienzen der einzelnen Proben der Badlösung in Prozent. – (Graphik Ch. Leßmann).



**Diagramm 4** Entsalzungseffizienzen der einzelnen Proben der Komprese in Prozent. – (Graphik Ch. Leßmann).



**Diagramm 5** Entsalzungseffizienzen der einzelnen Proben der Paste in Prozent. – (Graphik Ch. Leßmann).



**Diagramm 6** Entsalzungseffizienzen der einzelnen Proben des Gels in Prozent. – (Graphik Ch. Leßmann).

eine bessere Entsalzungseffizienz erreicht wurde. Eine mögliche Erklärung für die geringere Entsalzungseffizienz der Badlösung mit 56 % im vorliegenden Versuch könnte die unterschiedliche Zusammensetzung der chloridhaltigen Korrosionsprodukte sein. Während bei B. Schmutzler die Funde zwischen Bergung und Bearbeitung tiefgekühlt gelagert wurden, waren die hier verwendeten Beschläge zehn Jahre lang bei Raumtemperatur offen, ohne Fundtüte o.Ä., aufbewahrt worden. Die Bildung von Akaganéit wird bei -20°C zwar nicht verhindert, aber stark verlangsamt. Bei lange an der Luft gelagerten Funden werden weniger Chloride gelöst, da sich viel Akaganéit bilden konnte<sup>31</sup>. Der hohe Restchloridgehalt der hier vorliegenden Proben ist

wahrscheinlich größtenteils damit zu erklären. Die Untersuchungen von S. Réguer u.a. 2009 wurden an synthetischem Akaganéit durchgeführt. Es ist daher möglich, dass bei archäologischen Objekten keine vollständige Entfernung der oberflächlich gebundenen Chloride erreicht bzw. durch verschiedene Faktoren (Schichtdicke, andere Verbindungen etc.) erschwert werden kann.

Schwierig wird die Festsetzung des Endpunktes der Behandlung für die Kompressensysteme in der Praxis. Nach dem Kriterium von B. Schmutzler ist ein Chloridgehalt der Entsalzungslösung unter 2ppm wegen der Messgenauigkeit zur Beendigung eines Bades anzusehen, wäre die Behandlung bei dem Großteil der Proben schon nach drei Wochen be-

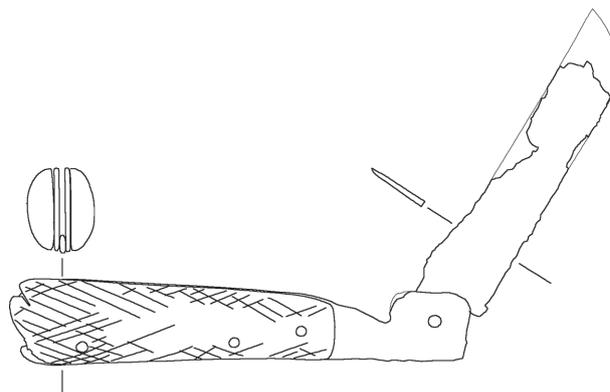
endet gewesen. Wie dem Entsalzungsverlauf zu entnehmen ist (**Diagramm 1**), wird bereits in der ersten Behandlungswoche (Bad, Komresse, Paste, nur das Gel hat einen anderen Verlauf) ca. die Hälfte bis über die Hälfte der insgesamt gelösten Chloride entfernt. Die weiteren Werte sind aufgrund der Messgenauigkeit eher kritisch zu betrachten. Mit herkömmlichen und im Restaurierungsalltag praktikablen Messmethoden, wie Teststreifen, sind Werte unter 2 ppm kaum zu bestimmen. Demnach wird das Ende der Entsalzung durch die Messbarkeit von Chloriden festgelegt. Ändert sich der Wert nicht mehr zum vorherigen Bad bzw. Entsalzungssystem, wird die Behandlung als beendet betrachtet. Bei dieser Versuchsreihe wäre das schon nach der fünften Woche der Fall gewesen (2 × keine nachweisbaren Chloride mit herkömmlichen Mitteln), was die Effizienz deutlich senken würde.

### Anwendung der Methode am Objekt

Ausgangspunkt für die Forschung war ein Klappmesser mit Knochengriffschalen (**Abb. 8**), das bearbeitet werden sollte. Das Augenmerk lag dabei auf dem Erhalt im Ganzen. Der Erhaltungszustand der Eisenbestandteile des Messers ließ auf eine starke Chloridbelastung schließen, weshalb eine Entsalzung angebracht schien, jedoch ohne dabei die Knochengriffschalen zu schädigen.

### Objektbeschreibung

Das Klappmesser wurde auf einer Grabung 2003 aus dem Bereich des Burggrabens der Jaromasburg auf Rügen, Kap Arkona, entdeckt und im Bergungszustand im Depot des Landesamtes für Kultur und Denkmalpflege Mecklenburg-Vorpommern eingelagert. Das Messer besteht aus einer eisernen Klinge und Griffschalen aus Knochen. Nach zehn Jahren der Lagerung in einem Snapbeutel ist der Erhaltungszustand von chloridhaltigen Korrosionsprodukten geprägt: Die äußere Korrosionsschicht



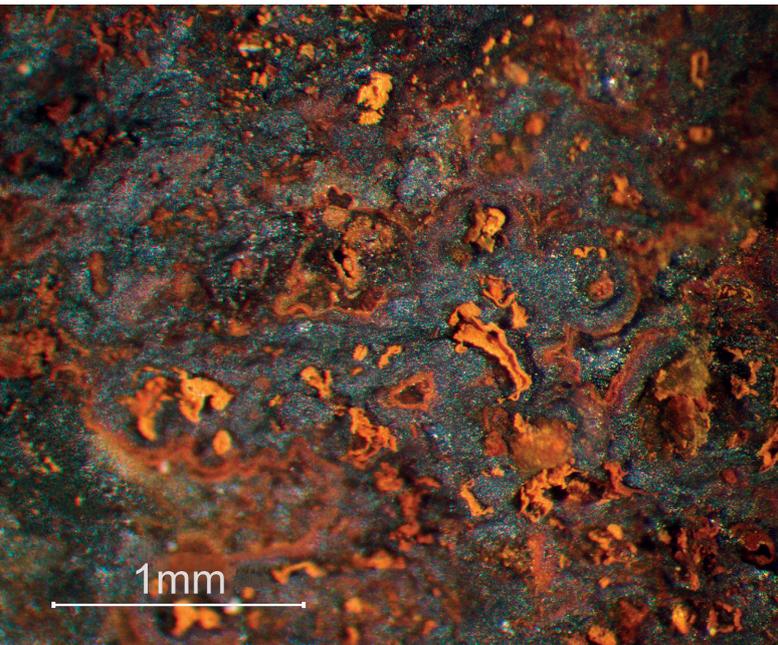
**Abb. 8** Ein Klappmesser mit rekonstruierter Klinge (im Bild in grau gezeichnet) aus der Jaromasburg auf Rügen. – (Zeichnung Ch. Leßmann).

war abgesprengt und auf der verbleibenden Oberfläche kraterartige Vertiefungen mit orangenen Ausblühungen zu finden. Dabei handelt es sich um Akaganéit-Kristalle, die sich bei Anwesenheit von Chloriden und durch den vermehrten Sauerstoffzutritt nach der Fundbergung unter Volumenvergrößerung bilden und damit die äußeren Schichten absprengen (**Abb. 9**). Die Hüllen ausgetrockneter Korrosionstropfen (**Abb. 10**) sind ebenso ein Indiz für chloridhaltige Korrosionsprodukte.

Da das Messer eine Rückenfeder besitzt, ist es in die Zeit um 1650 und später einzuordnen<sup>32</sup>. Die Fundumstände, nach denen es in einer Schicht nach dem 12. Jahrhundert lagerte, können diese Datierung bestätigen.

### Die Entsalzung des Klappmessers

Nach Abschluss der Versuchsreihen wurde das Klappmesser nach der effektivsten Methode, mit der kurzfasrigen Cellulose Arbocel® BC 200, entsalzt (**Abb. 11**). Zuvor erfolgten eine mechanische Reinigung, um das anhaftende Sediment zu entfernen, und eine Freilegung der Oberfläche mit einem Feinstrahlgerät. Vor der Entsalzung wurde die Organik zur Sicherheit mit einer Kappe aus Silikon<sup>33</sup> versehen, um diese Bereiche vor der Entsalzungslösung zu schützen.



**Abb. 9** Aus der Klingensoberfläche des Klappmessers wachsende Akaganéit-Kristalle. – (Foto Ch. Leßmann).



**Abb. 10** Hüllen von ausgetrockneten Korrosionstränen an der Messerklinge. – (Foto Ch. Leßmann).

Die Entsalzung folgte demselben Ablauf wie bei den Versuchsreihen. Für einen guten Kontakt der Kompressen mit der Objektoberfläche musste das Material möglichst stark angedrückt werden. Ein beidseitiger Auftrag erwies sich durch die geringe Adhäsion bei



**Abb. 11** Das Klappmesser mit Entsalzungskompressen. – (Foto Ch. Leßmann).

den benötigten Schichtdicken der Kompressen als sehr umständlich. Die Abnahme des getrockneten Kompressenmaterials war problemlos möglich. Während der Behandlung waren einige wenige Korrosionstränen zu beobachten, die aber nach einem Kompressenwechsel wieder zurückgingen. Nach sechs Wochen Entsalzung und zwei Spülungen mit destilliertem Wasser wurde die Behandlung als beendet betrachtet. Die Eisenoberflächen wurden mittels Feinstrahlen abschließend freigelegt. Die Schutzkappen ließen sich leicht von den unversehrten knöchernen Griffschalen abnehmen.

## Resümee

Durch diese erste Versuchsanordnung konnte gezeigt werden, dass Kompressensysteme sich auch für eine Eisenentsalzung erfolgreich einsetzen lassen. Der Erfolg dieser Methode ist wie immer bei einer Entsalzung stark abhängig vom Objekt: von der Beschaffenheit der Korrosionsschicht, also der Menge des bereits gebildeten Akaganéits, d. h. von der Länge der Zeit zwischen Bergung und Fundbehandlung und Rissstruktur, der Dicke der Korrosionsschicht und der Erreichbarkeit der Eisenbestandteile des Objektes.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung bilden jedoch nur den Startpunkt für die Erforschung der Entsalzung von Eisen an Kompositobjekten mit Kom-

pressensystemen. Die hier ermittelten Werte liefern somit einen ersten Eindruck vom Entsalzungsverhalten. Es sind Replikationsstudien mit größeren Probenmengen und vor allem grabungsfrischen Funden unterschiedlicher Fundorte nötig, um genaue Aus-

sagen treffen zu können und die Wirkung der Systeme zu verallgemeinern. Auch eine Mischung der Systeme, z. B. Pasten- und Kompressenmaterial, sowie die Variation der Schichtdicke könnten den Inhalt weiterer Forschungen bilden.

## Anmerkungen

- 1) Kaufhold 2010, 39.
- 2) Leßmann 2014.
- 3) Turgoose 1982, 97.
- 4) Neff u. a. 2005. – Réguer/Dillmann/Mirambet 2007.
- 5) Réguer/Dillmann/Mirambet 2007, 2740.
- 6) Stähl u. a. 2003, 2574.
- 7) Réguer/Dillmann/Mirambet 2007, 2742.
- 8) Ebenda.
- 9) North/Pearson 1978, 78/23/3/7.
- 10) Rinuy/Schweizer 1982, 166.
- 11) Schmutzler 2012, 89.
- 12) Haller 1995, 6.
- 13) Ebenda 7.
- 14) North/Pearson 1975, 75/13/3-2.
- 15) Nach Neff u. a. 2004, 743 als DPL = »dense product layer« bezeichnet.
- 16) Schmutzler 2012, 65.
- 17) Wunderlich 2000, 311.
- 18) Florence/Farrar 1971, 373.
- 19) Ebenda.
- 20) Wunderlich 2000.
- 21) Schmutzler 2012.
- 22) Schmutzler 2012. – Wang u. a. 2008. – Greiff/Bach 2000.
- 23) EMSA Clip&Close.
- 24) Rotilabo®-Weithalsflaschen aus HDPE.
- 25) Schmutzler 2012, 42-43.
- 26) Watkinson/Al-Zahrani 2008. – Rimmer/Watkinson/Wang 2012. – Schmutzler 2012.
- 27) North/Pearson 1975, 6.
- 28) Neff u. a. 2005.
- 29) Schmutzler 2012, 65.
- 30) Watkinson 2010, 405. – Watkinson/Al-Zahrani 2008, 82 Abb. 4.
- 31) Vgl. Rémazeilles/Refait 2007.
- 32) Vgl. Brunner 1994.
- 33) Durch eine kleine Versuchsreihe wurde ein Dental-Silikon (Panasil® contact plus) ausgewählt und auf den Knochen aufgetragen. Als Zwischenschicht und zur Konservierung des Knochens fungierte eine dünne Wachsschicht.

## Abgekürzt zitierte Literatur

- Brunner 1994: H. A. Brunner, Klappmesser aus zwei Jahrtausenden [Ausstellungskat.] (Arenenberg 1994).
- Florence/Farrar 1971: T. M. Florence / Y. J. Farrar, Spectrophotometric determination of chloride at the parts-per-billion level by the mercury(II)thiocyanate method. *Analytica Chimica Acta* 54, 1971, 373-377.
- Greiff/Bach 2000: S. Greiff / D. Bach, Eisenkorrosion und Natriumsulfitentzahnung: Theorie und Praxis. *Arbeitsblätter für Restauratoren Gruppe 1 Heft 2*, 2000, 319-339.
- Haller 1995: U. Haller, Studien zur Herstellung und Anwendung von Lösungsmittel-Gelen, -Pasten und -Kompressen in der Restaurierung. *Institut für Museumskunde an der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart 11* (Stuttgart 1995).
- Kaufhold 2010: S. Kaufhold, Entzahnung von Metallkombinationen aus Eisen- und Nichteisenmetallen mittels der alkalischen Sulfidreduktion [unpubl. Diplomarbeit HTW Berlin 2010].
- Leßmann 2014: Ch. Leßmann, Entzahnung mit Kompressensystemen an Kompositobjekten – Möglichkeiten und Grenzen [unpubl. Masterarbeit HTW Berlin 2014].
- Neff u. a. 2004: D. Neff / S. Reguer / L. Bellot-Gurlet / P. Dillmann / R. Bertholon, Structural characterization of corrosion products on archaeological iron. An integrated analytical approach to establish corrosion forms. *Journal of Raman Spectroscopy* 35, 2004, 739-745.
- Neff u. a. 2005: D. Neff / Ph. Dillmann / L. Bellot-Gurlet / G. Beranger, Corrosion of iron archaeological artefacts in soil: Characterisation of the corrosion system. *Corrosion Science* 47, 2005, 515-535.

- North/Pearson 1975: N. A. North / C. Pearson, Alkalie sulphite reduction treatment of marine iron. In: ICOM Committee for Conservation (Hrsg.), Preprints of the 4<sup>th</sup> Triennial Meeting of the ICOM Committee for Conservation; Venice, 13-18 October, 1975 (Paris 1975) 75/13/3-1-14.
- 1978: N. A. North / C. Pearson, Recent advances in the stabilisation of marine iron. In: R. M. Organ / E. M. Nosek / J. Lehmann (Hrsg.), Conservation of iron objects found in a salty environments (Warsaw 1978) 26-38.
- Réguer/Dillmann/Mirambet 2007: S. Réguer / Ph. Dillmann / F. Mirambet, Buried iron archaeological artefacts: Corrosion mechanisms related to the presence of Cl-containing phases. Corrosion Science 49, 2007, 2726-2744.
- Rémazeilles/Refait 2007: C. Rémazeilles / Ph. Refait, On the formation of  $\beta$ -FeOOH (akaganéite) in chloride-containing environments. Corrosion Science 49, 2007, 844-857.
- Rinuy/Schweizer 1982: A. Rinuy / F. Schweizer, Entsalzung von Eisenfunden mit alkalischer Sulfitlösung. Arbeitsblätter für Restauratoren 1, 1982, 160-174.
- Rimmer/Watkinson/Wang 2012: M. Rimmer / D. Watkinson / Q. Wang, The efficiency of chloride extraction from archaeological iron objects using deoxygenated alkaline solutions. Studies in Conservation 57, 2012, 29-41.
- Schmutzler 2012: B. Schmutzler, Rettung vor dem Rost. Die Weiterentwicklung der Eisenentsalzung nach der Alkali-Sulfit-Methode zur Erhaltung großer Fundmengen. Internationale Archäologie – Naturwissenschaft und Technologie 7 (Rahden/Westf. 2012).
- Stähl u. a. 2003: K. Stähl / K. Nielsen / J. Jiang / B. Lebeck / J. C. Hanson / P. Norby / J. van Lanschot, On the akaganéite crystal structure, phase transformations and possible role in post-excavational corrosion of iron artifacts. Corrosion Science 45, 2003, 2563-2575.
- Turgoose 1982: S. Turgoose, Post-excavation changes in iron antiquities. Studies in Conservation 27, 1982, 97-101.
- Wang u. a. 2008: Q. Wang / S. Dove / F. Shearman / M. Smirniou, Evaluation of methods of chloride ion concentration determination and effectiveness of desalination treatments using sodium hydroxide and alkaline sulphite solutions. The Conservator 31, 2008, 67-74.
- Watkinson 2010: D. Watkinson, Measuring effectiveness of washing methods for corrosion control of archaeological iron. Problems and challenges. Corrosion Engineering, Science and Technology 45, 2010, 400-406.
- Watkinson/Al-Zahrani 2008: D. Watkinson / A. Al-Zahrani, Towards quantified assessment of aqueous chloride extraction methods for archaeological iron. De-oxygenated treatment environments. The Conservator 31, 2008, 75-86.
- Wunderlich 2000: Ch. H. Wunderlich, »Archäosideroprophylakt« – Entsalzung von Eisenfunden mit Hydroxylamin. Jahresschrift für Mitteldeutsche Vorgeschichte 83, 2000, 305-316.

## Zusammenfassung / Summary

### Eisenentsalzung mit Kompressensystemen. Untersuchung zur Anwendung an archäologischen Eisen-Organik-Kompositen

Es werden die Ergebnisse einer Versuchsreihe zur Eisenentsalzung mit Natriumhydroxidlösung in Kompressensystemen vorgestellt, die im Rahmen einer Masterarbeit an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin durchgeführt wurde. Auf der Suche nach einer Entsalzungsbehandlung für ein Klappmesser mit Knochengriffschalen wurden Kompressensysteme als eine Möglichkeit gesehen und auf ihre Tauglichkeit an Eisen untersucht. Anhand von archäologischen Probekörpern wurde der Entsalzungserfolg einer Kompresse, einer Paste und eines Gels mit dem einer Badentsalzung verglichen. Die Messung der gelösten und verbleibenden Chloride wurde fotometrisch bestimmt. Die Kompresse aus Arbocel® BC 200 schnitt am besten ab. Diese wurde bei der Konservierung des Klappmessers angewendet und bewertet.

## Schlagworte

Natriumhydroxidentsalzung / Kompressensysteme /  
Kompositobjekte / Klappmesser / Versuchsreihen

### Desalination of Composite Iron Objects with Poultices – Options and Limits

The results of a series of tests on the alkaline desalination treatment for archaeological objects are presented, which was part of a master's thesis at the Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin. The goal was to find a functional desalination-treatment for a folding knife with bone handles. On archaeological samples the success of desalination using a poultice, a paste and a gel were compared with a bath solution. The content of the extracted and residual chlorides was measured by photometric method. The compress from Arbocel® BC 200 delivered the best results and was used and assessed for the preservation of the folding knife.