
Das KUR-Projekt: Massenfunde in archäologischen Sammlungen

Eine Kooperation der Archäologischen
Staatsammlung München und des
Römisch-Germanischen
seums Mainz

Projektleitung:
Prof. Dr. Rupert Gebhard & Prof. Dr. Markus Egg

Projektbearbeitung und Bericht durch:

Eisen: Cristina Mazzola & Peter Albert

Holz: Waldemar Muskalla & Markus Wittköpper

(mit Textbeiträgen von Stephan Brather, Stephan
Gebhardt & Katharina Schmidt-Ott)

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	1
1.1 Die Problemstellung	1
1.2 Die Projektteilnehmer	2
1.2.1 Die Archäologische Staatssammlung München (ASM)	2
1.2.2 Das Römisch-Germanische Zentralmuseum Mainz (RGZM)	2
1.3 Die Zielsetzung	3
2. DER PROJEKTAUFBAU	3
3. EISEN	4
3.1 Die Problematik	4
3.2 Konservierungsansätze	5
3.3 Die Projektarbeit	5
3.3.1 Die Probeobjekte	5
3.3.2 Dokumentation	6
3.3.3 Analysegeräte und -methoden	7
3.3.3.1 Non-invasives Sauerstoffmessgerät	7
3.3.3.2 Mößbauer-Spektroskopie und Röntgenbeugung (XRD)	7
3.3.3.3 Titriergerät	8
3.3.3.4 Feuchtkammertests	8
3.4 Lagerung	8
3.4.1 Die Vorgehensweise im Projekt und bei der Auswertung	8
3.4.2 (Offene) Lagerung bei unkontrolliertem Klima	11
3.4.3 Folien(-verpackungen)	12
3.4.3.1 Polyethylenfolie (PE-Folie)	13
3.4.3.2 Surlyn TM -Folie	14
3.4.3.3 Vakuumbbeutel	15
3.4.3.4 ESCAL TM -Folie	15
3.4.3.5 Aluverbundfolie	16
3.4.4 Sauerstofffreie Lagerung	19
3.4.4.1 Vakuum	19
3.4.4.2 Zusatz: Sauerstoffabsorber	21
3.4.4.3 Zusatz: Inertes Gas (Stickstoff / Argon)	23
3.4.4.4 Stickstoffvitriolen	26
3.4.5 Trockene Lagerung	27
3.4.5.1 Raumklimatisierung / Raumentfeuchter	28
3.4.5.2 Zusatz: Silicagel	29
3.4.6 Sonstige Lagermethoden	31
3.4.6.1 Zusatz: Erde(+ inertes Gas)	31
3.4.6.2 Skin-System	33

3.4.6.3	(Tief-)Gekühlte Lagerung	35
3.4.7	Zusammenfassung: Auswertung der Lagermethoden	38
3.4.7.1	Verpackungen und Folien	38
3.4.7.2	Zusätze	40
3.4.7.3	Großräumige Lösungen	41
3.4.8	Diskussion	44
3.4.9	Bezugsquellen für die genannten Materialien und Geräte	45
3.5	Entsalzung	47
3.5.1	Badentsalzung	48
3.5.1.1	Natriumsulfitentsalzung	48
3.5.1.2	Natronlauge	49
3.5.2	Subkritische Entsalzung	51
3.5.3	Hitzeverfahren	52
3.5.3.1	Ofenbehandlung	52
3.5.3.2	Gasreduktion	54
3.5.4	Zusammenfassung	56
3.5.5	Bezugsquellen für die genannten Materialien und Geräte	57
3.6	Allgemeine Zusammenfassung & Ausblick	58
3.7	Abbildungsnachweis Eisen	60
3.8	Literaturverzeichnis Eisen	60
4.	HOLZ	62
4.1	Die Problematik	62
4.2	Lagerung	63
4.3	Konservierung	63
4.3.1	Konservierung mit wasserlöslichen Festigungsmitteln	64
4.3.1.1	Konservierung mit PEG (Polyethylenglykol)	64
4.3.1.2	Konservierung mit Melaminharz (Kauramin-Methode)	64
4.3.1.3	Konservierung mit Zucker (Saccharose)	65
4.3.2	Konservierung mit wasserunlöslichen Festigungsmitteln	66
4.3.2.1	Konservierung mit der Alkohol-Ether-Harz Methode	66
4.3.2.2	Konservierung mit der Silikonöl-Methode	66
4.4	Projektvorgehensweise	67
4.4.1	Die Versuchshölzer - Probenzuschnitt	68
4.4.2	Untersuchung der Holzart	69
4.4.3	Untersuchung des Abbaugrades	69
4.4.4	Chemische Untersuchung der Restsubstanzen	71
4.4.5	Untersuchung der Formveränderung	73
4.4.5.1	Vermessung mit Messschieber	73
4.4.5.2	Vermessung durch 3D-Streifenlichtscan	74
4.4.6	Vergleich der Farbveränderung - Fotodokumentation	77
4.4.7	Untersuchung der Druck-/ Biegefestigkeit	78
4.4.8	Untersuchung der Gewichtsveränderung	78

4.4.9	Untersuchung von Ökonomie/Ökologie	79
4.5	Datenbank - Webseite/Auswertung	79
4.6	Literaturverzeichnis Holz	81
5.	PUBLIKATIONEN UND VERANSTALTUNGEN IM RAHMEN DES PROJEKTES	82
5.1	Schriftliche Publikationen auf Papier und im Netz	82
5.2	Veranstaltungen	82

Abschlussbericht des KUR-Projektes „Massenfunde in archäologischen Sammlungen“

1. Einleitung

1.1 Die Problemstellung

Viele Häuser in Deutschland, die eine archäologische „Archivfunktion“ innehaben, haben derzeit einen außergewöhnlichen Zuwachs an archäologischen Funden zu bewältigen. Dieser ergibt sich durch das Zusammentreffen mehrerer Faktoren:

- Eine Zunahme von Großgrabungen, verursacht durch die verstärkte Flächennutzung (Bauvorhaben im Bereich Gewerbe- und Wohnungsbau; Infrastrukturmaßnahmen: z.B. Straßen-, Bahnstrecken-, Pipelinebau)
- Auflösung von Zwischendepots der Außenstellen von Museen und Landesdenkmalämtern
- Abtretung von Fundlasten durch Kommunen, die die Versorgungskosten für ihr Eigentum nicht mehr tragen können

Sowohl die restauratorische also auch die archäologische Aufarbeitung eines großen Fundkomplexes sind arbeits- und zeitaufwändig und können oft nicht sofort in Angriff genommen werden. Daher muss versucht werden, den häufig sehr schnell fortschreitenden Zerfall der Objekte durch eine möglichst sachgerechte Fundversorgung und Lagerung zu minimieren.

Doch auch Funde, die einst grabungsfrisch in die Depots eingeliefert wurden, befinden sich in einem durch langjährige Lagerung teilweise stark veränderten Zustand. Auch hier ist zur Vermeidung von weiteren Schäden Handlungsbedarf gegeben.

Die Objekte unterteilen sich in drei Gruppen:

- konservatorisch im Allgemeinen unbedenkliche Materialien, wie Keramik oder Stein
- konservatorisch teilweise labile Materialien, wie z.B. Bronze
- konservatorisch stark labile Komplexe, wie Eisen oder Nassholz.

Da sämtliche Funde einen hohen Wert als „Urkunden aus der Frühzeit“ besitzen, ist es für ihre wissenschaftliche Erschließung unumgänglich, sie in ihrem derzeitigen Erscheinungsbild zu erfassen und durch konservatorische Maßnahmen eine weitere Bearbeitung auch in der Zukunft zu gewährleisten.

Das Projekt widmete sich der dritten Objekt- bzw. Materialgruppe – archäologisches Holz und Eisen -, da sie Restauratoren meist vor die größten Probleme stellt. Denn während solche Objekte im Boden mitunter Jahrtausende überdauern haben, beginnen sie häufig sofort nach der Bergung aus dem Boden zu zerfallen – manchmal sogar bis hin zum vollständigen Verlust. Insbesondere bei großen Fundmengen ist daher ein schnelles und effizientes Handeln von Nöten, um die Funde bis zu ihrer restauratorischen und wissenschaftlichen Bearbeitung zu stabilisieren.

Aufgrund der Dringlichkeit der Problematik wurden für beide Materialien über die Jahre hinweg viele verschiedene Lösungsansätze entwickelt. Ein wissenschaftlicher Vergleich fehlte jedoch bislang, vor allem in Hinsicht auf ihre Effektivität, aber auch Praktikabilität und (Nachfolge-)Kosten. Nur die Wahl geeigneter Konservierungsmaßnahmen erlaubt letztlich auch eine Verhinderung von zukünftigen Schadensbildern (Prävention), die später nur mit einem noch höheren Versorgungsaufwand behoben werden könnten. Die dabei auftretenden Probleme sind so komplex, dass sie nur durch eine Vernetzung lösbar erscheinen.

1.2 Die Projektteilnehmer

1.2.1 Die Archäologische Staatssammlung München (ASM)

Die Archäologische Staatssammlung (ASM) erfüllt in Bayern die Funktionen eines Archäologischen Landesmuseums, insbesondere durch die Übernahme von Ausgrabungsfunden mit staatlichen Eigentumsansprüchen, darunter auch Bundeseigentum in treuhänderischer Verwahrung. Sie gehört damit zu den oben beschriebenen Häusern mit Archivfunktion und sieht sich mit den genannten Problemen direkt konfrontiert.

Der aktuelle Fundzuwachs ist außergewöhnlich groß – so umfassen allein die Neuzugänge aus frühmittelalterlichen Gräbern (5. bis 7. Jahrhundert) mehr als 30000 Eisenobjekte. Obwohl die Sachkultur dieser Periode gut bekannt ist, verbergen sich darunter zahlreiche Objekte, die zu einer weiteren Erhellung der Stammesbildung der Baiuwaren wesentliche neue Aspekte beitragen können. Neben den frühmittelalterlichen Eisenfunden verwahrt die ASM Massenfunde aus römischer und keltischer Zeit. Zu den letztgenannten zählen die Objekte aus der Keltenstadt bei Manching. Diese größte und wichtigste Keltenstadt Europas wurde seit 1955 durch das Deutsche Archäologische Institut ausgegraben. Die Erhaltung der ca. 25.000 Eisenobjekte und die Betreuung der in den bevorstehenden Grabungen zur erwartenden Objekte, gehört zu den Kernaufgaben der Archäologischen Staatssammlung in München.

Im Augenblick werden die Funde in zwei Depots verwahrt, sofern sie nicht im Haupthaus in München oder den 11 angegliederten Zweigmuseen ausgestellt sind.

Mit der Errichtung des gemeinsam mit dem Bayerischen Nationalmuseum und der Technischen Universität genutzten „Werkstattengebäudes Oettingenstrasse“ konnten 1999 großzügige und moderne Räumlichkeiten für die Restaurierungsabteilung bezogen werden, in denen die gleichen Materialien wie im RGZM restauriert werden, zum Teil jedoch mit anderen Verfahren.

1.2.2 Das Römisch-Germanische Zentralmuseum Mainz (RGZM)

Das Römisch-Germanische Zentralmuseum (RGZM) gehört als ein überregional tätiges Forschungsinstitut für Vor- und Frühgeschichte der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz an. Dieses von Land Rheinland-Pfalz und der Stadt Mainz getragene Forschungsmuseum genießt in internationalen Fachkreisen höchste Anerkennung.

Für die wissenschaftliche Forschung sind Restaurierung und naturwissenschaftliche Untersuchungen wichtige Voraussetzung, denn erst dadurch wird ein archäologisches Objekt in vollem Umfang für die Forschung erschlossen. Deshalb sind die Restaurierungswerkstätten mit den zugehörigen Laborato-

rien am RGZM von zentraler Bedeutung und gehören zu den führenden Restaurierungswerkstätten in der Welt. Sie zeichnen sich durch eine hervorragende Infrastruktur und eine Vielzahl materialspezifischer Werkstätten und Laboratorien aus. Über 30 eng miteinander kooperierende Mitarbeiter/innen im Bereich Restaurierung, Konservierung / Dokumentation und naturwissenschaftlicher Untersuchung widmen sich aber nicht nur der Restaurierung und Untersuchung der archäologischen Objekte, sondern gewährleisten auch die notwendige Praxisorientierung in der Restauratorenausbildung und eine optimale Betreuung der 14 Auszubildenden.

Die Entdeckung der Mainzer Römerschiffe führte zur Bildung eines Forschungsschwerpunktes „Antike Schifffahrt“, dem in einem eigenen Museumsgebäude eine große Spezialwerkstätte für Holzrestaurierung zugeordnet ist. Daher ist das RGZM bei der Versorgung von Massenfunden vor allem im Gebiet von Nassholz betroffen. Hier kann allein ein Schiff oder z.B. die neu entdeckte Uferbefestigung des römischen Köln schlagartig den Fundzugang um mehrere tausend Objekte erhöhen.

Seit 2007 ist die enge Kooperation zwischen RGZM und Johannes-Gutenberg Universität durch den gemeinsam entwickelten dualen BA Studiengang „Archäologische Restaurierung“ auch auf das Gebiet der Restauratoren-Ausbildung erweitert worden. Dieser Studiengang löst die im Auftrag des Deutschen Museumsbundes entwickelte und seit 1963 durchgeführte dreijährige Fortbildung zum Restaurator im Fachbereich Altertumskunde ab

1.3 Die Zielsetzung

Das Projekt hatte sich zum Ziel gesetzt, einen Vergleich zwischen den bestehenden Abläufen und Verfahren zur Massenversorgung archäologischer Eisen- und Feuchtholzfunde zu erstellen und zu kommunizieren. Die Ergebnisse sollten in der Erstellung einer Handreichung münden, die in Zukunft von anderen Häusern benutzt und angewandt werden kann. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die Methoden auch in Hinblick auf den technischen Aufwand, Kosten, Umweltverträglichkeit und Arbeitssicherheit bewertet werden, da die apparative Ausstattung der archäologischen Restaurierungswerkstätten in Deutschland in sich sehr differiert.

Die Ergebnisse sollten mit verschiedenen Medien kommuniziert werden. So sind sie auf der projekteigenen Webseite (www.rgzm.de/kur) ausführlich und für Fachpublikum aufbereitet veröffentlicht, sowie in einer Studioausstellung dem breiten Laienpublikum zugänglich präsentiert worden. Außerdem gab es eine abschließende Fachtagung mit zusammenfassender Publikation.

2. Der Projektaufbau

Das Projekt wurde nach Materialgruppen aufgeteilt, welche getrennt voneinander bearbeitet wurden. Der Bereich „Nassholz“ sollte federführend am RGZM bearbeitet werden, der Sektor „Eisen“ an der ASM. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Konservierungsmethoden in beiden Bereichen musste jeweils eine eigene Vorgehensweise erstellt werden, welche im jeweiligen Abschnitt näher erläutert wird.

Beiden Bereichen gemein war aber, dass es nicht um gezielte museale Restaurierung gehen sollte, sondern um Mittel, die Objekte dauerhaft zu stabilisieren.

3. Eisen

3.1 Die Problematik

Eisen gehört zu den unedleren Metallen und reagiert daher chemisch sehr schnell mit Umweltfaktoren wie Luftfeuchte und -sauerstoff. Diesen Vorgang bezeichnet man als Korrosion. Er beginnt direkt nach Fertigstellung des Objektes und kann sich, wenn ungestört, solange fortsetzen bis kein metallisches Eisen mehr vorhanden ist.

Das Eisenobjekt verändert während der Korrosionprozesse Form und „Inhalt“: Sein Umfang dehnt sich aus, während der reine Metallkern sogar an Substanz verliert und nicht länger der ursprünglichen Gestalt entspricht.

Während der langen Zeit unter der Erde hat eine geringere Sauerstoffzufuhr die Korrosion verlangsamt. Durch die Bergung erfährt das Objekt jedoch einen dramatischen Klimawechsel, der den Zerfall beschleunigt.

Ein weiteres Problem bei der Bodenlagerung sind die Salze, die sich im Laufe der Zeit im Objekt angesammelt haben. Zu den problematischsten gehört hier das Chlorid, das zur Bildung des Eisenminerals Akaganeit im Innern des Objektes führen kann. Durch seine raumgreifende Struktur übt es beim Auskristallisieren in Zwischenräumen des Objektes Spannung auf das Objekt aus und kann zum Abplatzen von Objektteilen führen. An den Bruchstellen befindet sich dann charakteristischerweise ein kleiner Rasen aus den filigranen orangenen Akaganeit-Kristallen.

Da die Chlorid-Ionen zudem nicht langfristig gebunden sind, werden sie im Laufe der Zeit wieder abgesondert, bilden mit der Luftfeuchte Salzsäure und greifen das metallische Eisen an, ein Korrosionszyklus entsteht.

Das in der Akaganeit-Struktur eingelagerte Chlorid ist recht schwierig zu entfernen, da hierzu zunächst das Mineral selbst angegriffen werden muss. Würden also direkt nach der Bergung und bei der weiteren Lagerung im Depot Maßnahmen ergriffen, um eine Akaganeit-Bildung zu vermeiden, würde das auch die spätere Bearbeitung des Objektes erheblich erleichtern.

3.2 Konservierungsansätze

Ziel einer jeden konservatorischen Maßnahme ist es, die archäologischen Eisenobjekte möglichst dauerhaft vor Korrosionsschäden schützen. Dabei soll der wissenschaftliche Informations- sowie ästhetische Wert erhalten bleiben. Ob es sich um bis dato unrestaurierte oder bereits fertig behandelte Funde handelt, spielt keine Rolle. Die Gefahren sind für beide die gleichen.

Die meisten Methoden setzen dabei auf das Entfernen einer der „Korrosionspartner“, nämlich Feuchtigkeit, Sauerstoff oder Salze, um den Vorgang zu stoppen oder zumindest stark zu verlangsamen. Eine weitere praktizierte Methode ist das Kühlen von Objekten, da chemische Reaktionen wie eben Korrosion in einer kalten Umgebung langsamer verlaufen. Die Behandlungsarten sind dabei grob in zwei Kategorien aufteilbar: Die sogenannte Entsalzung, welche die (Chlorid-)Salze aktiv entfernt, und die Lagerung unter kalten, sauerstoff- oder feuchtigkeitsarmen Bedingungen. Diese wiederum kann man in die Erstversorgung auf der Ausgrabung und Methoden für die ‚Langzeitlagerung‘ im Depot unterteilen.

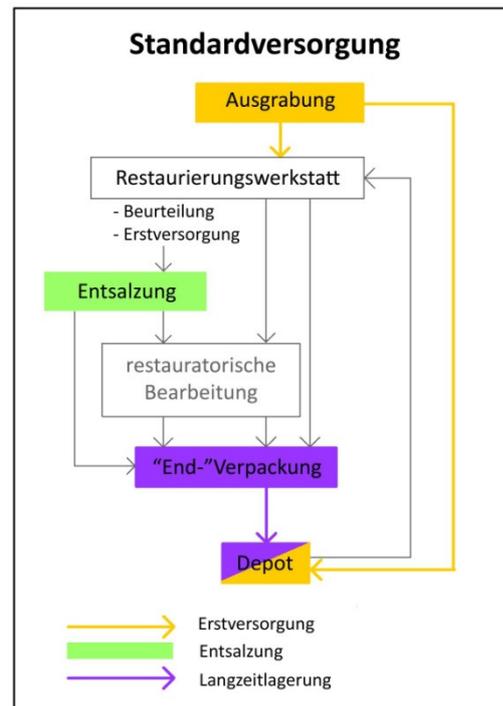


Abb. 1: Diagramm des Weges, den ein Fundes meist von der Ausgrabung bis ins Depot nimmt

3.3 Die Projektarbeit

3.3.1 Die Probeobjekte

Die ausgewählten Methoden sollten sowohl an Objekten als auch an Pulverindikatoren getestet werden.

Die Probeobjekte stammen zu einem Großteil von einer Grabung auf dem Leisenhartfeld in Manching bei Ingolstadt in Bayern, die von Januar bis April 2009 stattfand. Der Befund war dabei ein Siedlungsareal des dort befindlichen eisenzeitlichen Keltenoppidums.

Für die Entsalzung waren zusätzlich Funde aus dem Gräberfeld Steinheim bei Dillingen in Bayern, vorgesehen. Es handelt sich um Altfunde aus den 1980er Jahren, die schon seit Jahren im Depot der ASM aufbewahrt wurden.

Das Indikatorpulver für die Lagermethoden bestand zu gleichen Teilen aus Eisen- und Eisenchloridpulver (meist je 0,2 g), einer Mischung, die sich bei normalem Raumklima innerhalb weniger Tage in Akaganeit umwandelt.¹ Dabei verändern sich Farbe, Gewicht und Volumen, so dass eine Schnellaussage über die Effektivität einer Methode möglich war.

¹ z.B. Turgoose, 1982 oder Guggenheimer, 2006

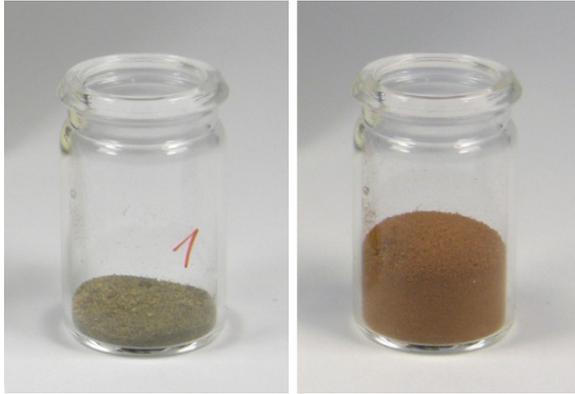


Abb. 2: Pulverindikator vor und nach der Korrosion – Farbumschlag und Volumenänderung sind gut zu sehen.

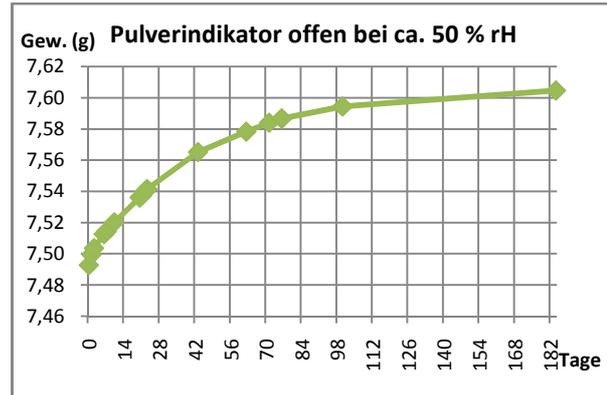


Abb. 3: Gewichtsentwicklung (g) einer offen gelagerten Pulverindikatorprobe (Fe-A-0577-1a) bei etwa 50 % rH.

Beim Betrachten der Ergebnisse darf nicht vernachlässigt werden, dass das Indikatorpulver in jeder Hinsicht schneller reagiert als ein Objekt. Besonders bei der Zeitdauer bis zum Entstehen der Schäden ist daher ein Bezug zu den Objektproben unzulässig. Nur ein Vergleich der Indikatorreaktionen auf die verschiedenen Methoden untereinander ist aussagekräftig.

Die Proben wurden in einer Datenbank aufgenommen und mit eigenen ID-Nummern versehen (z.B. Fe-A-0577-1a).

3.3.2 Dokumentation

Alle Testobjekte wurden immer wieder von mehreren Seiten unter gleichbleibenden Lichtbedingungen fotografiert, um optische Veränderungen festzuhalten. Diese wurden gleichzeitig zudem noch schriftlich dokumentiert. Außerdem wurden die Objekte regelmäßig gewogen, um eventuelle Zusammenhänge zwischen Veränderungen und der Gewichtsentwicklung festzustellen.

Objekte von der Grabung wurden bei Werkstatteingang geröntgt, um einen Hinweis auf Form und Erhaltungszustand zu bekommen.

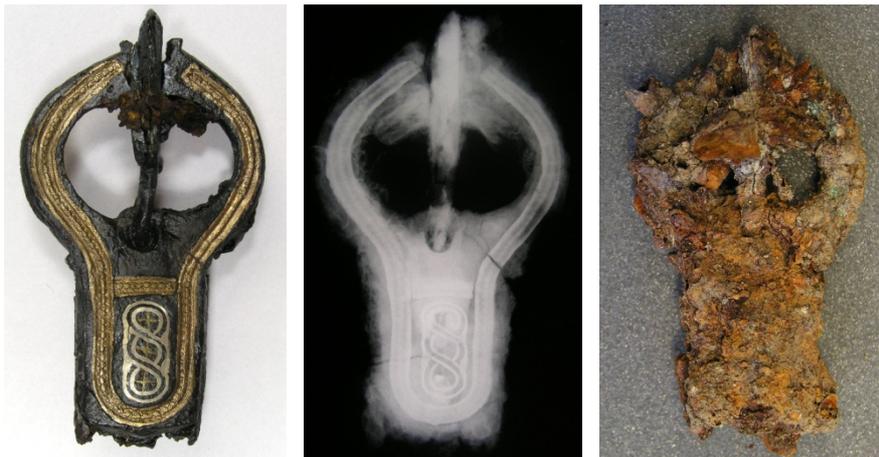


Abb. 4: Eine tauschierte Gürtelschnalle aus Erpfting – vor der Restaurierung, im Röntgenbild und fertig restauriert (v. li. n. re.). (Foto: Restaurierungswerkstätten, ASM)

Die für das Projekt verwendeten Objekte wurden in einer eigens erstellten Datenbank erfasst, deren Inhalte auf der Webseite zugänglich sind.

3.3.3 Analysegeräte und -methoden

3.3.3.1 Non-invasives Sauerstoffmessgerät

Um den Sauerstoffgehalt in geschlossenen Verpackungen zu messen, ohne sie zu öffnen oder beschädigen zu müssen, wurde das non-invasive Sauerstoffmessgerät Oxy-Sense 210T verwendet.

Dieses kann mittels eines optischen Verfahrens den Sauerstoffgehalt in den Verpackungen messen: Beim Messvorgang wird ein zu Anfang mitverpackter Sensor durch einen Lichtstrahl aktiviert. Dieser wird von dem Sensor reflektiert und von einem Detektor wieder aufgefangen, so dass anhand des Brechungsgrades der Sauerstoffgehalt errechnet werden kann.



Abb. 5: Das non-invasive Sauerstoffmessgerät.

3.3.3.2 Mößbauer-Spektroskopie und Röntgenbeugung (XRD)

Die einzelnen Korrosionsprodukte des Eisens, also auch das Akaganeit, sollten mit Hilfe der Mößbauer-Spektroskopie und der Röntgenbeugung identifiziert werden, um Aussagen über den Entsalzungs- oder Umwandlungsgrad zu erhalten. Leider handelt es sich bei beiden nicht um zerstörungsfreie Methoden.

Bei der Mößbauer-Spektroskopie werden pulverisierte Objektproben mit Gammastrahlung durchstrahlt. Das dabei erzeugte Diagramm setzt sich aus den charakteristischen Spektren der einzelnen Eisenverbindungen in der Probe zusammen. Aus dem Gesamtspektrum lassen sich dann die einzelnen Bestandteile der Probe ermitteln. Zusätzlich erhält man Aufschlüsse über den Magnetismus der Proben.

Bei der Röntgenbeugung (XRD) kommt Röntgenstrahlung zum Einsatz. Diese wird je nach Gitterstruktur der einzelnen Eisenverbindungen in der pulverisierten Probe unterschiedlich gebeugt. Daraus kann man dann bestimmen, welche Verbindungen in einer Probe vorliegen.

3.3.3.3 Titriergerät



Abb. 6: Das Titriergerät an der ASM.

Bisher gibt es keine zerstörungsfreie Möglichkeit festzustellen, wie viele Salze noch im Objekt vorhanden sind. Bei der Entsalzung behilft man sich damit, den steigenden Chloridgehalt des Bades zu messen, um den Fortschritt des Chloridaustausches in den Entsalzungsbädern zu kontrollieren. Im Projekt wurde hierzu das chemische Verfahren der Titration verwendet. Dabei lässt sich die Menge der Chlorionen über ihre Reaktion mit Silbernitrat errechnen, das in genau abgemessener Menge hinzugegeben wird.

3.3.3.4 Feuchtkammertests

Zum Überprüfen des Entsalzungserfolges wurden einige Objekte über längere Zeit in eine sog. Feuchtkammer mit einer Luftfeuchte von ca. 60 % rH gelegt. Waren noch Salze vorhanden, zeigten sich binnen kurzer Zeit Risse und Akaganeitenausblühungen.

3.4 Lagerung

Die Tests zu den Lagermethoden bildeten den Hauptteil der Projektarbeit, da sie den Gesichtspunkt der Massenanwendbarkeit besser erfüllen: Der direkte Arbeitsaufwand sowie die Bearbeitungszeit einer große Menge an Eisenfunden liegen bei allen getesteten Lösungen weit unter denen der gegenwärtig üblichen und effektiven Entsalzungsmethoden. Zudem müssen auch während und nach einer Entsalzung die Objekte lagertechnisch versorgt werden.

Alle Lagermethoden zielen darauf ab, Eisenkorrosion zu stoppen oder zu verlangsamen, ohne dabei das Objekt direkt restauratorisch zu behandeln. Dabei werden meist aus der Umgebung des Objektes Feuchtigkeit (Luftfeuchte) und/oder Sauerstoff entfernt oder es aber im Sinne der Temperaturabhängigkeit chemischer Reaktionen bei niedrigen Temperaturen gelagert.

Ins Projekt wurden zum einen Verpackungsmethoden einbezogen, wobei verschiedene Folientypen und Zusätze, die das Klima beeinflussen sollten, durch kombiniert wurden. Daneben wurden Lager-systeme wie das an der ASM bereits vorhandene Skin-System, ein Stickstoffvitrinen-System, Raum-entfeuchtung oder die Lagerung bei niedrigen Temperaturen zum Vergleich mit hinzugenommen. Als Referenzproben wurden einige Objekte und Pulverindikatoren an der offenen Luft ohne raumklimatisierende Maßnahmen aufbewahrt.

3.4.1 Die Vorgehensweise im Projekt und bei der Auswertung

Für die Tests wurden jeweils soweit möglich mindestens fünf Objekte und / oder drei Pulverindikatorproben unter den ausgewählten Bedingungen gelagert. Das Hauptaugenmerk lag allerdings auf den verschiedenen Verpackungen. Daher wurden einige Methoden nur an Objekten oder Pulverindikatoren ausprobiert.

In der Anfangsphase wurden außerdem einige Folien und das Vakuumeinschweißgerät auf die Grabung in Manching gegeben, um die Methoden vor Ort durchführen zu lassen.

	Polyethylen	Polyethylen	Surlyn™-Folie	Vakuumbbeutel	ESCAL™-Folie	Aluverbund
Materialien	Low-Density Polyethylen (LDPE)	Low-Density Polyethylen (LDPE)	Polyethylen	Polyethylen, Polyamid	Polypropylen / keramikbeschichtetes Polyvinylacetat / Polyethylen	Polyester, Aluminium, LDPE
Foliendicke (µm)	50	100	150	90	112	120
als Folienrolle / Schlauchfolie / Beutel erhältlich	j/j/j	j/j/j	j/n/n	n/j/j	j/j/n	Aluverbund-ESCAL™-Kombi: n/n/j
Farbe	transparent	transparent	transparent	transparent	transparent	metallen opak
Wasserdampfdurchlässigkeit	PE (200 µm): 0,4 g/m ² /Tag (20° C / 85% rF) ²	PE (200 µm): 0,4 g/m ² /Tag (20° C / 85% rF) ³	unbekannt	unbekannt	0,01 g/m ² /Tag (20 °C) ⁴	< 0,01 g/m ² /Tag (20°C); ⁵
Sauerstoffdurchlässigkeit	PE: sehr hoch ⁵	PE: sehr hoch ⁷	unbekannt	unbekannt	0,05 cm ³ /m ² /Tag/atm (20 °C) ⁸	< 0,01 cm ³ /m ² /Tag (20°C); ⁹
Barrierefolie	n	n	n	(j)	j	j

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Folien.

	Erde	Silicagel	Mitsubishi RP-A	inertes Gas	Vakuum
Anmerkungen	auf der Grabung willkürlich entnommen	Trockenmittel	Sauerstoffabsorber	Stickstoff & Argon	

Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Zusätze.

² Waller, Long Life for Art: Produkte > Sperrschichtfolien, 2012

³ Ebd.

⁴ Ebd.

⁵ Ebd.

⁶ Unter <http://132.180.184.15/wak/daten/vorlesungen/hab-Werkstoffkunde-folien.pdf> fand sich der numerische Wert von > 40 cm³/m²/Tag/atm (20 °C) (Winter 2012). Das Dokument ist jedoch leider nicht mehr online und daher nicht mehr nachvollziehbar.

⁷ Ebd.

⁸ Waller, Long Life for Art: Produkte > Sperrschichtfolien, 2012

⁹ Ebd.

Die Auswertung der Methoden erfolgte unter folgenden Gesichtspunkten:

Auswertungskriterien	Bewertungseinheit
Anzahl Proben (Pulverindikatoren / Objekte)	
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte)	Tage (bei verschiedenen Testdauern: der kürzeste und längste Wert in Klammern)
Stabilität der Probe / des Objektes	Note 1 – 6 (1 = unverändert / stabil bzw. keine Schäden, 6 = komplett umgewandelt / auseinander gefallen)
Anzahl der Proben mit (neuen) Schäden bzw. Veränderungen nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	
Grad der neuen Schäden / Veränderungen nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	Note 1 – 6 (1 = leicht, 6 = schwer)
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe	ja/nein
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Schäden / Veränderungen	Tage
Folienempfindlichkeit gegen Schäden	Note 1 – 6 (1 = wenig, 6 = sehr)
Sauerstoff- / Gasdichte	Note 1 – 6 (1 = kaum / kein Durchlass, 6 = sehr durchlässig)
Feuchtigkeit durchlässigkeit	Note 1 – 6 (1 = kaum / kein Durchlass, 6 = sehr durchlässig)
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld)	Note 1 – 6 (1 = sehr schnell, 6 = sehr zeitaufwändig)
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld)	€
erforderliches Gerät	
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.)	€
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	

Tabelle 3: Auswertungsschema der Lagermethoden

Pulverindikatoren und Probeobjekte wurden getrennt bewertet in die Tabelle aufgenommen, da sie sich z.B. in ihrer Reaktionszeit stark unterschieden und damit die Durchschnittswerte verfälschen würden.

Auch ist die z.T. sehr variierende Testdauer nicht außer Acht zu lassen, da sie mitunter Auswirkungen auf die Ergebnisse haben konnte.

Bei der Berechnung der Materialmengen und des Zeitaufwandes wurde ein fiktives Gräberfeld mit 250 Gräbern à zehn Objekten, fünf davon aus Eisen, zu Grunde gelegt. Zwei davon sollten in Beutel der Größe 20 x 30 cm passen, drei in 10 x 15 cm-Verpackungen. Für das Einzelobjekt wurde ein 20 x 30 cm-Beutel angesetzt.

Für die Materialberechnung wurde soweit möglich vorgearbeitetes Material herangezogen (also Beutel oder Schlauchfolien statt Folien), da sich dies trotz meist etwas teurerem Preis durch die eingesparte Arbeitszeit rechnet.

Aus dem gleichen Grund wurden bei der Einschätzung des Zeitaufwandes wurde immer die schnellstmögliche Variante gewählt. Beispiel: War ein Einschweißen, aber kein Vakuum erforderlich, wurde das (teurere) Zangenschweißgerät statt dem langsameren, aber günstigeren Vakuumschweißgerät in die Berechnung mit einbezogen – entsprechend sind die Angaben unter den Gerätekosten. Die angegebenen Material- und Gerätepreise können je nach Bestellmenge, Zeitpunkt und Bezugsquelle variieren und daher nur als Richt- und Vergleichswert dienen. Als Grundlage für die Preisbe-

stimmung dienen die an der ASM vorhandenen Geräte bzw. genutzten Materialien. Jegliche Preisangabe, soweit nicht anders angegeben, bezieht sich auf den Stand vom Frühjahr 2012. Die entsprechenden Bezugsquellen und genaue Produktbezeichnungen finden sich unter Punkt 3.4.9 Bezugsquellen für die genannten Materialien und Geräte.

Es soll ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass als Berechnungsgrundlage für Materialverbrauch, -preis und Arbeitszeit ein zu Berechnungszwecken vereinfachtes, fiktives Gräberfeld herangezogen wurde, welches so in der Realität vermutlich nie vorkommen wird. Zusätzlich sind Arbeitszeiten stark von den individuellen Gegebenheiten abhängig, wie z.B. Werkstattgröße (=> Verlängerung der Laufwege), Maschinenpark vor Ort, Anzahl des Bearbeitungspersonals, Routine desselben etc. Daher wurden sie über die Notengebung bewusst vage gehalten.

Die in den Tabellen angegebenen Werte sind als daher als reine Vergleichswerte zu verstehen.

3.4.2 (Offene) Lagerung bei unkontrolliertem Klima

Als Vergleichstest wurden einige Objekte und Pulverproben ohne schützende Maßnahmen gelagert, d.h. sie wurden in Pappschachteln oder Gläsern bei Raumklima aufbewahrt. Das Klima im Restaurierungslabor der ASM variiert stark zwischen Sommer (Luftfeuchte um die 50 % rH und Temperaturen bei ca. 20 – 24 °C) und Winter (Luftfeuchte um die 20 % rH und Temperaturen zwischen etwa 22 °C tagsüber und 18 °C nachts).

Wenig überraschend ist daher das Ergebnis dieser Versuche:

Auswertungskriterien	offen, keine Klimatisierung
Anzahl Proben (Pulverindikatoren / Objekte)	6 / 9
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte) (Tage)	86,68 (5-128) / 601,89 (351-637)
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	4,83 / 5,22
Anzahl der Proben mit (neuen) Schäden bzw. Veränderungen nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	5/--/3 / 3/6/9
Grad der neuen Schäden / Veränderungen nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	5,2/--/1 / 0,67/1,78/ 4,78
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	n/n/n / (n)/n/n
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Schäden / Veränderungen (Tage)	2,5 / 253,56(?)
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	n.n.
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	n.n.
Feuchtigkeit durchlässigkeit (Note 1 – 6)	n.n.
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	1/1/1
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	z.B. PE-Beutel (ab 0,04 / 0,11 / 27,50 €) oder Kartons
erforderliches Gerät	n.n.
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	n.n.
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	Aufwändigere restauratorische Bearbeitung

Tabelle 4: Auswertungstabelle zu den offen und unklimateiert gelagerten Proben.



Abb. 7: Ein Nagel aus Manching (Fe-C-0132-1a (5)) kurz nach Eingang in die Werkstatt (rot markiert) und nach 733 Tagen Lagerung bei unkontrolliertem Klima.

Die Proben haben sich schnell umgewandelt bzw. wiesen innerhalb weniger Monate Risse oder gar Abplatzungen auf. Die Methode ist zwar zunächst sehr einfach, bequem und günstig, nimmt aber bewusst Schäden an den Objekten in Kauf. Diese wiederum bedeuten einen Mehraufwand bei der restauratorischen Bearbeitung und können mit einem Verlust an Material und Informationswert einhergehen.

3.4.3 Folien(-verpackungen)

Neben der Möglichkeit, das komplette Raumklima zugunsten von metallenen Objekten zu verändern, kann man kleine Räume um einzelne Objekte schaffen. Dabei werden die Objekte verpackt und die Verpackung dann, wenn gewünscht, durch einen Zusatz klimatisiert.

Das Verpackungsmaterial sollte qualitativ auf das Klimatisierungsziel abgestimmt sein und entsprechende Sauerstoff- und Wasserdampfdurchlasswerte aufweisen. Hierfür bieten sich verschiedene Folientypen an. Für das Projekt wurden einige ausgewählt und in Kombination mit verschiedenen Klimatisierungszusätzen getestet (s. Tabelle 1, S. 9 und Tabelle 2, S. 9).

Um eine die maximale Dichtigkeit zu erzielen, müssen die Folien durch Verschweißen geschlossen werden. Dadurch wird eine spätere Entnahme erheblich erschwert und ist auch nur in Zusammenhang mit einer erheblichen Störung des erzeugten Klimas möglich. Um dies zu Vermeiden wurden hauptsächlich transparente Folienarten ausgewählt. Die einzige Ausnahme bildet die undurchsichtige Aluminiumverbundfolie, die aber aufgrund ihrer sehr guten Werte und der Tatsache, dass es Alu-ESCAL™-Kombinationsbeutel im Handel gibt, mit einbezogen wurde.

Selbst die dichtesten Folien werden durch Alterung nach einer Weile undicht, Herstellerangaben liefern hier einen Hinweis. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass günstige Lagerbedingungen wie moderates und gleichmäßiges Klima und wenig Lichteinfall die Lebenszeit verlängern werden. Die Hauptschwachstelle einer Verpackung liegt allerdings meist bei der Schweißnaht, durch die Gase und Wasserdampf eindringen oder entweichen können. Daher sollte bei der Auswahl des Schweißgerätes auf eine ausreichende Dicke der Schweißlippe (ab 5 mm, je dicker desto besser) geachtet werden. Mehrfache Schweißnähte hintereinander verbessern die Werte und verringern die Wahrscheinlichkeit von undichten Stellen durch Schweißfehler. Sie erhöhen jedoch den Zeitaufwand.

Im Folgenden sollen die getesteten Folien vorgestellt werden. Die Ergebnisse in Zusammenhang mit den Zusätzen finden sich unter deren jeweiligen Abschnitten, da so eine bessere Gegenüberstellung der Folienwirksamkeit möglich ist.

3.4.3.1 Polyethylenfolie (PE-Folie)

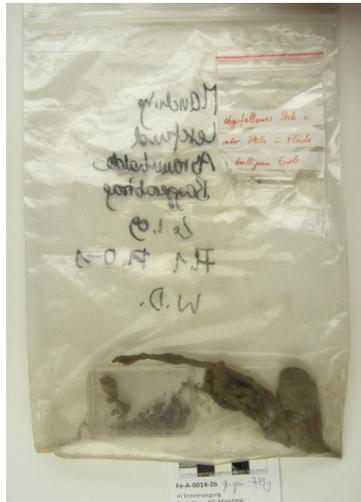


Abb. 8: Objekt in PE-Beutel (50 µ) ohne Zusätze am Ende der Testdauer (Fe-A-0014-2b).

Polyethylenfolie ist aufgrund ihres niedrigen Preises und der vielfältigen Anwendbarkeit sehr weit verbreitet. So findet man auf Grabungen und in Restaurierungslabors recht häufig Druckverschlussbeutel aus diesem Material.

Es wird zwischen Low-Density (LDPE) und High-Density Polyethylen (HDPE) unterschieden, wobei LDPE die wesentlich häufiger und damit auch im archäologischen Bereich zu findende Variante ist. Wie in Tabelle 1 (Seite 9) ersichtlich sind die Durchlasswerte sowohl für Sauerstoff als auch für Wasserdampf recht hoch, ihre Schutzzeigenschaft gegenüber schädlichen Klimatelementen daher recht niedrig. Aufgrund ihrer breiten Anwendung im archäologischen Bereich wurden sie dennoch in das Projekt mit einbezogen. Getestet wurden zwei Materialstärken – 50 und 100 µ -, wobei die dünnere die Standardfolienstärke für die oben erwähnten Beutel ist.

Auswertungskriterien – kein Zusatz	PE (50 µ)	PE (100 µ)
Anzahl Proben (Pulverindikatoren / Objekte)	2 / 5	3 / --
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte) (Tage)	185,5 (22-349) / 963,8 (890-983)	360,33 (52-785) / --
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	5 / 5	5 / --
Anzahl der Proben mit (neuen) Veränderungen bzw. Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	2/1/0 / 4/5/5	3/2/3 / --
Grad der neuen Veränderungen / Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	2,75/3/0 / 1,5/3,3/3,6	3,5/2/0,83 / --
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	n/n/n / n/n/n	n/n/n / --
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Veränderungen / Schäden (Tage)	2 / 59,6	1 / --
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	2	1
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	6	6
Feuchtigkeitsthroughlässigkeit (Note 1 – 6)	6	6
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	1/1/1	1/1/1
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	ab 0,04 / 0,11 / 27,50 €	0,06 / 0,22 / 45 €
erforderliches Gerät	n.n.	n.n.
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	n.n.	n.n.
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	Raumklimatisierung erforderlich (=> entspr. Stromkosten, Wartung, Kontrollen)	Raumklimatisierung erforderlich (=> entspr. Stromkosten, Wartung, Kontrollen)

Tabelle 5: Auswertungstabelle zu den PE-Folien ohne Zusatz.

Bei beiden Varianten war ein Schutz durch die Folie weder gegen Austrocknung noch gegen Korrosion gegeben, sowohl die Pulverindikatoren als auch die Probeobjekte zeigten nach kurzer Zeit Veränderungen. Sollen Funde in PE-Verpackungen gelagert werden, müssen zusätzlich weitere Schutzmaßnahmen wie z.B. ein trockenes Raumklima ergriffen werden.

3.4.3.2 Surlyn™-Folie

Bei der Surlyn™-Folie handelt sich um ein modifiziertes PE mit Iononmerbindung, wodurch sie bei 20 °C eine höhere Transparenz und Zähigkeit aufweist.¹⁰ Sie wird an der ASM in der Stärke von 150 µ in Verbindung mit der Skin-Verpackung eingesetzt (s. 3.4.6.2 Skin-System) und wurde auch als einzelnes Verpackungsmaterial getestet.



Abb. 9: Objekt in Surlyn™-Folie ohne Zusätze am Ende der Testdauer (Fe-A-0009-9b).

Auswertungskriterien – kein Zusatz	Surlyn™
Anzahl Proben (Pulverindikatoren / Objekte)	3 / 6
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte) (Tage)	540,67 (52-785) / 981 (940-991)
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	5,5 / 4
Anzahl der Proben mit (neuen) Veränderungen bzw. Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	3/2/3 / 0/4/5
Grad der neuen Veränderungen / Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	4,17/2,25/1,83 / 0/1,92/3
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	n/n/n / j/(n)/n
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Veränderungen / Schäden (Tage)	1 / 240,2
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	1
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	5 - 6 (?)
Feuchtigkeitsdurchlässigkeit (Note 1 – 6)	5 - 6 (?)
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	3/3/3
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	0,16 / 0,49 / 111,38
erforderliches Gerät	Einschweißgerät (z.B. Zange oder Standgerät), Schere, Stromquelle
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	Zangenschweißgerät: ab ca. 878 €
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	Raumklimatisierung erforderlich (=> entspr. Stromkosten, Wartungs- und Kontrollarbeiten)

Tabelle 6: Auswertungstabelle zur Surlyn™-Folie ohne Zusatz.

Da bei dieser Folie keine vorgefertigten Beutel im Handel sind, dauert der Verpackungsvorgang entsprechend länger und es ist ein Schweißgerät vonnöten.

¹⁰ Hanselmann (bei Römp Online), 2008 und Motzenbäcker, 2012

Doch der Aufwand lohnt nicht, da die Surlyn™-Folie nur eine marginal bessere Schutzwirkung als die ihr ‚verwandten‘ normalen PE-Folien aufweist. So wäre auch hier eine Raumklimatisierung nötig.

3.4.3.3 Vakuumbbeutel

Vakuumbbeutel aus dem Lebensmittelbereich werden zum Vakuumeinschweißen von Fleisch u.ä. verderblichen Produkten verwendet. Daher war von einer erhöhten Gasdichtigkeit im Vergleich zu den PE-Folien auszugehen, genaue Werte zur Sauerstoff- und Wasserdampfdurchlässigkeit waren jedoch nicht zu finden. Es gibt verschiedene Produktvarianten im Handel, die zumeist aus zwei bis vier Lagen Polyamid (PA) und PE bestehen. Die bei den Tests verwendete Variante hatte je eine Lage aus 20 µ PA und 70 µ PE.¹¹

Die Beutel sind auf einer Seite leicht geriffelt, um ein einwandfreies Vakuumziehen zu gewährleisten. Auf dieser Seite ist die Transparenz eingeschränkt.

Die Vakuumbbeutel wurden nicht ohne Zusätze getestet.

3.4.3.4 ESCAL™-Folie

Die ESCAL™-Folie ist mit einer hauchdünnen Keramikschicht versehen, so dass ihre Sauerstoff- und Wasserdampfdichtigkeit sehr hoch ist (s. Tabelle 1 – S. 9), aber dennoch ihre Transparenz nicht beeinträchtigt wird. Sie ist im Großen und Ganzen recht unempfindlich, sollte aber nicht geknickt werden, um (unsichtbare!) Schäden in der abdichtenden Keramikschicht zu vermeiden.

Schweißbar ist bei dieser Folie nur die PE-beschichtete Seite, die an ihrer größeren Griffigkeit erkennbar ist.

Über die Lebensdauer der ESCAL™-Folie gibt es unterschiedliche Angaben, vermutlich liegt etwa zwischen fünf¹²

und über zehn¹³ Jahren. Danach kann die Gasdichtigkeit als nicht mehr gewährleistet gelten und die Folie sollte ausgetauscht werden. Die Durchlässigkeit für Wasserdampf scheint sich bereits nach ca. 4 – 6 Jahren¹⁴ zu erhöhen. Eigene Erfahrungswerte konnten hierzu während des Projektes aufgrund der Dauer nicht gesammelt werden.



Abb. 10: Objekt in ESCAL™-Folie ohne Zusätze am Ende der Testdauer (Fe-A-0076-6b).

¹¹ Bezugsquelle: Probeset von www.vakuumtuete.de

¹² Selwyn, 2004

¹³ Schmidt-Ott, 2012– bei günstigen Lagerbedingungen, die die Folie nicht strapazieren (hier: wenig Licht, ca. 50 % rH, 20 – 22 °C)

¹⁴ Mathias et al., 2004

Auswertungskriterien – kein Zusatz	ESCAL™-Folie
Anzahl Proben (Pulverindikatoren / Objekte)	3 / 4
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte) (Tage)	573,33 (42-785) / 991,5 (991-992)
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	3,17 / 3,38
Anzahl der Proben mit (neuen) Veränderungen bzw. Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	3/1/2 / 0/3/1
Grad der neuen Veränderungen / Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	2,33/0,83/ 0,83 / 0/1,5/3,25
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	(j)/(j)/(j) / j/(j)/n
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Veränderungen / Schäden (Tage)	4,67 / 221
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	3,5
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	1
Feuchtigkeitsdurchlässigkeit (Note 1 – 6)	1
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	2/2/2
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	ab 1,80 / 8,11 / 2026,87
erforderliches Gerät	Einschweißgerät (z.B. Zange oder Standgerät), Schere, Stromquelle
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	Zangenschweißgerät: ab ca. 878 €
Bedenkenswertes Folgeaufwand	Stichprobenartige Kontrollen empfehlenswert; Lebenszeit der Beutel voraussichtlich ca. 5-10 Jahre => erneutes Verpacken nötig
Bemerkungen	<i>Die Probeobjekte wurden auf der Grabung eingeschweißt. Bei fast allen Beuteln waren jedoch Schweißnähte unvollständig oder die Folie beschädigt und die Verpackung daher undicht. Die Aussagekraft der Objektwerte ist daher sehr eingeschränkt!</i>

Tabelle 7: Auswertungstabelle zur ESCAL™-Folie ohne Zusatz.

Wie unter den Bemerkungen vermerkt sind die Objektproben leider wenig aussagekräftig – vom Wirkungsgrad der Folie sind aber die Probeobjekte der Alu-ESCAL-Verbindung durchaus vergleichbar. Da sich beide Probereihen sehr ähnlich verhalten haben, sind die Ergebnisse unter 3.4.3.5 Aluverbundfolie zusammen gefasst.

3.4.3.5 Aluverbundfolie



Abb. 10: Objekt in Alu-ESCALM-Beutel ohne Zusätze am Ende der Testdauer (Fe-C-0133-1f/a).

Die Aluverbundfolie besteht aus einem Verbund von einer Polyester-, Aluminium- und LDPE-Schicht. Sie weist mit Werten, die sogar noch unter denen der ESCAL™-Folie liegen, hervorragende Barriereeigenschaften auf und ist als Folie auch etwas günstiger als sie. Allerdings ist sie aufgrund der Aluminiumschicht nicht transparent und insgesamt recht empfindlich gegenüber Knicken und punktuellen Druckstellen. Die Schäden sind dabei oft mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen. Dadurch ist sie für Grabungen nur bedingt geeignet.

Bei den Tests im Projekt wurden Beutel verwendet, bei denen eine Seite aus der Aluverbund- und die andere aus der ESCAL™-Folie be-

steht. So wurde die Bedingung der Objektsichtbarkeit zumindest teilweise erfüllt. Solche Beutel sind vorgefertigt zu kaufen, dann allerdings aber etwas teurer als die ESCAL™-Schlauchfolie.

Auswertungskriterien – kein Zusatz	Aluverbund-ESCAL™-Kombination
Anzahl Proben (Pulverindikatoren / Objekte)	2 / 4
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte) (Tage)	119 / 967
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	3 / 1,5
Anzahl der Proben mit (neuen) Veränderungen bzw. Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	2/-/2 / 0/1/1
Grad der neuen Veränderungen / Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	2/--/3 / 0/0,25/0,5
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	(j)/-(j) / j/j/(j)
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Veränderungen / Schäden (Tage)	9 / 512
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	4,5
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	1
Feuchtigkeitsschleppigkeit (Note 1 – 6)	1
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	2/2/2
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	ab 2 / 10 / 2500
erforderliches Gerät	Einschweißgerät (z.B. Zange oder Standgerät), Schere, Stromquelle
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	Zangenschweißgerät: ab ca. 878 €
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	stichprobenartige Kontrollen empfehlenswert; Lebenszeit der Beutel voraussichtlich ca. 5-10 Jahre => erneutes Verpacken nötig

Tabelle 8: Auswertungstabelle zur Aluverbund-ESCAL™-Kombination ohne Zusatz.

Sowohl bei der ESCAL™- als auch bei der Alu-ESCAL™-Kombi waren mehrere Faktoren interessant: Bei zwei Objektverpackungen aus hochdichten Folien waren Sauerstoffsensoren mitverpackt. Es zeigte sich, dass der Sauerstoffgehalt innerhalb von einem bzw. 2,5 Monaten ohne äußere Einwirkungen auf etwa 0 % sank. Dies ist vermutlich damit zu erklären, dass die beginnende Korrosionsreaktion den Sauerstoff in der Verpackung verbraucht und von außen keiner nachkommen kann. Wie viel Zeit nötig ist, bis der Sauerstoffgehalt bei 0 % ist, und damit auch wie weit die Korrosion voranschreitet, bis sie durch Sauerstoffmangel stoppt, hängt vom Volumen der Verpackung ab. Möchte man sich dieses Prinzip zunutze machen, sollten also Folienverpackungen nur wenig größer als das Objekt sein.

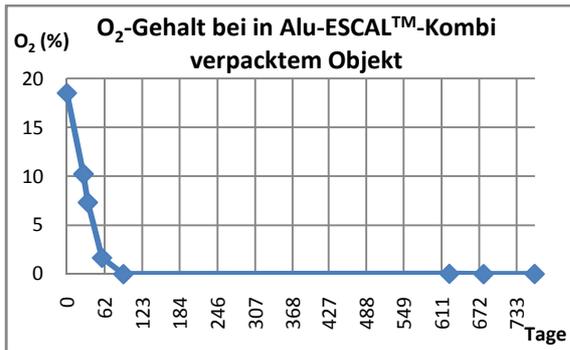


Abb. 11: Die Entwicklung des Sauerstoffgehaltes (%) bei einem in einem Aluverbund-ESCAL™-Beutel ohne weitere Zusätze verpackten Objekt (Fe-C-0134-1f/a).

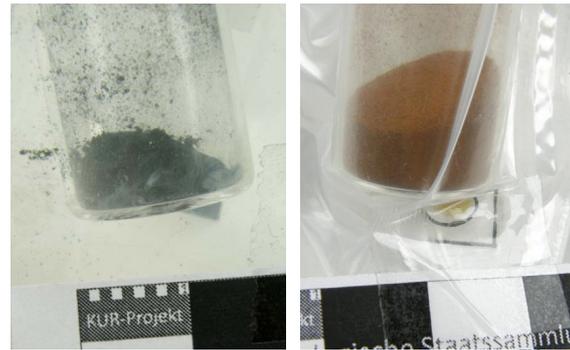


Abb. 12: Pulverindikator nach ca. 2 Jahren in ESCAL™-Folie (Fe-A-0159-6b, li.) und in Akaganait umgewandelte Probe in PE(100µ)-Folie (Fe-A-0163-4b, re.).

Neben der Sauerstoffabnahme fiel sowohl bei den Pulverindikatoren als auch bei den Objekten eine Gewichtsabnahme auf. Dieses Phänomen war bei keiner anderen Lagermethode zu beobachten. Seine Ursache wurde im Rahmen des Projektes nicht weiter verfolgt, erwähnt soll es hier aber dennoch sein.

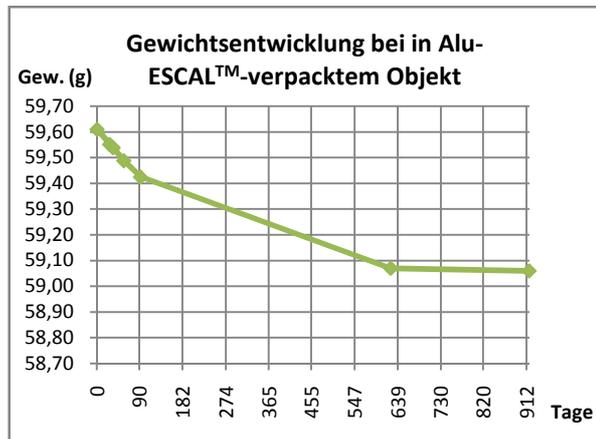
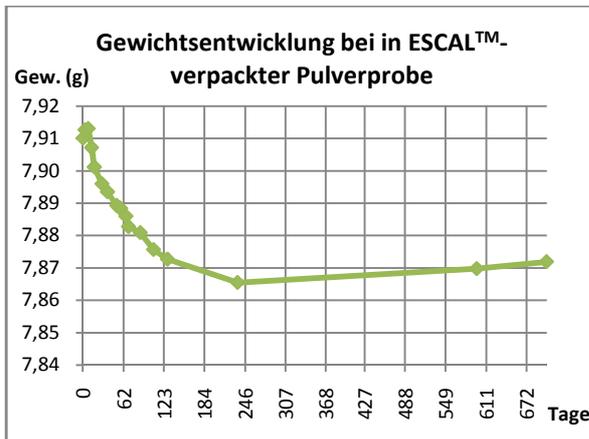


Abb. 13: Die Gewichtsentwicklung eines Pulverindikators in ESCAL™- und eines Objektes in Alu-ESCAL™-Folienverpackung ohne weitere Zusätze.

Ähnlich wie bei den Objekten fiel auch bei den Pulverproben auf, dass die Umwandlung zunächst normal begann, sich dann aber stoppte oder abwandelte (daher auch die vergleichsweise schlechte Note). Das Endprodukt hatte trotz des orangebraunen Zwischenstadiums eine Dunkelanthrazitfarbe und hatte sich auch im Volumen kaum verändert. Eine Mößbauer-Analyse steht hier noch aus.

3.4.4 Sauerstofffreie Lagerung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Sauerstoff aus der Umgebung des Objektes zu entfernen: So kann der Sauerstoff vom Objekt (s. bei 3.4.3.4 ESCAL™-Folie oder 3.4.3.5 Aluverbundfolie) oder durch Absorber verbraucht, durch ein anderes Gas verdrängt oder ein Vakuum erzeugt werden. Das Ziel ist aber immer, die Korrosionsreaktion durch Entfernen einer notwendigen Komponente zu unterbrechen und damit zu unterbinden. Voraussetzung hierfür ist aber, dass ein erneutes Zuströmen weiteren Sauerstoffes von außen verhindert wird, z.B. durch eine hochdichte Verpackung.

Generell war bei der sauerstofffrei gelagerten Pulverindikatoren zu beobachten, dass der Sauerstoffgehalt erst nach dem Gewicht anstieg. Daraus ließ sich schließen, dass zum einen ein recht geringer Sauerstoffgehalt von evt. sogar unter 1 % nötig ist, um eine Umwandlungsreaktion in Gang zu setzen. Zum anderen deutet dies darauf hin, dass der Sauerstoffgehalt kein zuverlässiger Indikator dafür, ob eine Verpackung noch dicht ist.

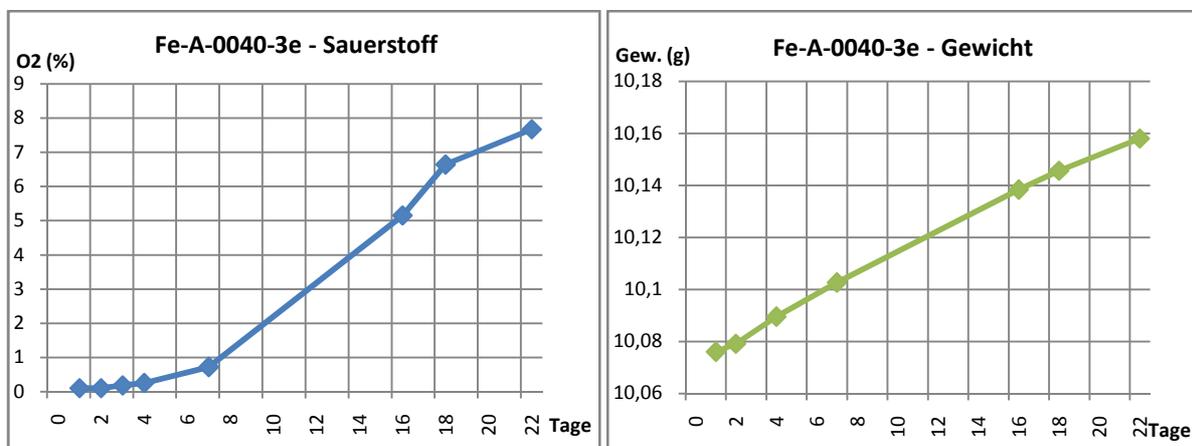


Abb. 14: Sauerstoff- und Gewichtsentwicklung einer Pulverprobe in PE(100µ)-Folie mit Sauerstoffabsorber - während das Gewicht (und die Farbe) sofort Veränderungen zeigten, stieg der Sauerstoffgehalt erst nach einigen Tagen an. eine Mößbaueranalyse zeigte, dass sich nach den 22 Tagen ca. 30 % Akaganait gebildet hatten.

3.4.4.1 Vakuum

Beim Vakuumieren wird zusammen mit der Luft zwangsläufig auch der Sauerstoff entzogen, zusätzlich wird das Objekt in der Verpackung fixiert.

Allerdings gibt es dabei auch einige Nachteile:

- Folie und Objekt sind einer je nach Unterdruck mehr oder weniger hohen Belastung ausgesetzt, die zu Schäden bei einem oder beiden führen kann. Schäden an der Folie bewirken eine Undichtigkeit derselben, so dass Luft wieder / schneller eindringen kann.
- Ein Schutz durch Plastazotelagen o.ä. beeinträchtigt die Sichtbarkeit der Objekte.
- Mit keinem der im Projekt verwendeten Vakuumiergeräte wurde der Sauerstoffgehalt auf 0 % gesenkt, er blieb meist im Bereich von ca. 3-4 %. Dies reicht nicht aus, um eine Korrosion zu verhindern. Es ist davon auszugehen, dass es mit den meisten handelsüblichen Geräten nicht anders sein wird.
- Vakuumieren ist bei glatten Beuteln oft schwierig und daher tendenziell zeitaufwändiger.

Auswertungskriterien - Vakuum	Surlyn™	Vakuumbbeutel	ESCAL™	Alu- ESCAL™
Anzahl Proben (Pulverindikatoren / Objekte)	-- / 5	3 / --	3 / 1	-- / 5
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte) (Tage)	-- / 989	540,67 (52-785) / --	537,33 (42-785) / 983	-- / 925
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	-- / 5,2	2,83 / --	2 / 1	-- / 1,1
Anzahl der Proben mit (neuen) Veränderungen bzw. Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	-- / 2/4/5	3/0/2 / --	3/0/1 / 0/0/0	-- / 0/0/(1)
Grad der neuen Veränderungen / Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	-- / 0,6/1,6/4,3	1/0/2 / --	1/0/0,33 / 0/0/0	-- / 0/0/0,2
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	-- / (j)/n/n	j/j/n / --	(j)/(j)/(j) / j/j/j	-- / j/j/(j)
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Veränderungen / Schäden (Tage)	-- / 101,2	20 / --	1 / -	-- / 925
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	1	1,5	3,5	4,5
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	5 – 6	4	1	1
Feuchtigkeitsthroughlässigkeit (Note 1 – 6)	5 - 6	3,5	1	1
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	4/5/4 ¹⁵	3/4/4	3/4/4	3/4/3
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	0,16 / 0,49 / 111,38	ab 0,08 / 0,33 / 82,50	ab 1,80 / 8,11 / 2026,87	ab 2 / 10 / 2500
erforderliches Gerät	Vakuumschweißgerät, Schere, Stromquelle			
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	Vakuumschweißgerät: ab ca. 260 €			
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	Raumklimatisierung erforderlich (=> entspr. Stromkosten, Wartungs- und Kontrollarbeiten)		stichprobenartige Kontrollen empfehlenswert; Lebenszeit der Beutel voraussichtlich ca. 5-10 Jahre => erneutes Verpacken nötig;	
Bemerkungen				
Zusammenfassung	zwecklose Kombination, da Folie den O ₂ -Gehalt bzw. das Vakuum nicht halten kann;	Folie kann den O ₂ -Gehalt nur ca. 1-2 Monate unten halten => max. temporäre Lösung.		

Tabelle 9: Auswertungstabelle zu verschiedenen vakuumgezogenen Folien.

Die Verpackung ist ausschlaggebend für die Lebensdauer und damit Wirksamkeit des Vakuums. Je dichter die Folie, desto besser war der Zustand der Proben. Undichte Verpackungen benötigen aufgrund ihrer Durchlässigkeit gegenüber Wasserdampf und Sauerstoff zum Schutz der Objekte weitere Schutzmaßnahmen wie z.B. ein trockenes Raumklima, das Vakuumieren ist daher in ihrem Fall überflüssig.

Generell ist aber aufgrund der o.g. Nachteile ein Vakuumieren von Objekten auch in dichten Verpackungen eher nicht zu empfehlen.

¹⁵ Der Zeitaufwand für das Verpacken im Vakuum hängt stark von der Leistungsfähigkeit der Maschine ab. Das hier verwendete Gerät (LaVa V.100) war recht langsam, es ginge vermutlich auch schneller.



Abb. 15: Vakuumierte Verpackungen: Pulverindikator im Vakuumbbeutel (Fe-A-0170-8b) und Objekte im Alu-ESCALTM-Beutel (Fe-C-0142-1f/a(v)) nach Ende der Testdauer.

3.4.4.2 Zusatz: Sauerstoffabsorber

Bei Sauerstoffabsorbieren handelt es sich meist um Beutel, die mit einer Materialmischung gefüllt sind, die bei Kontakt mit Sauerstoff mit diesem reagiert und ihn bindet. Es gibt mehrere Produkte auf dem Markt¹⁶, im Projekt wurde jedoch nur der Mitsubishi RP-A-Absorber verwendet, der zusätzlich noch die Luftfeuchte senkt. „RP-A besteht aus ungesättigten organischen Komponenten, Zeolith, Polyethylen, Aktivkohle und CaO. Ein Säckchen RP 5-A kann etwa 1,1 g Wasser adsorbieren und den Sauerstoff aus 500 ml Luft.“ (Waller, Long Life for Art: Produkte > Sauerstoffabsorber > Sauerstoffabsorber RP-A, 2012)

Die Verarbeitung der Absorber erfordert eine gewisse Vorplanung, da sie maximal 30 Minuten der Luft ausgesetzt sein sollten, um ihre Kapazität nicht zu beeinträchtigen.

¹⁶ s. Waller, 2004-2009

Auswertungskriterien - Sauerstoffabsorber	PE (50 µ)	PE (100 µ)	Surlyn™	ESCAL™	Alu-ES-CAL™	Vakuumbbeutel (+ Vakuum)
Anzahl Proben (Pulverindikatoren / Objekte)	4 / --	3 / --	3 / --	3 / 5	-- / 5	3 / --
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte) (Tage)	221 (22-349) / --	178 / --	178 (22-349) / --	643 (157-886) / 287,2 (280-289)	-- / 289	357,33 (22-886) / --
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	4,63 / --	4 / --	4,33 / --	1 / 1,2	-- / 1,2	2,17 / --
Anzahl der Proben mit (neuen) Veränderungen bzw. Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	4/3/0 / --	3/1/2 / --	3/2/1 / --	0/0/0 / 2/0/0	-- / 2/0/0	3/1/2 / --
Grad der neuen Veränderungen / Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	3,63/2/0 / --	2,83/3/2,75 / --	2,17/3,25/2 / --	0/0/0 / 0,4/0/0	-- / 0,2/0/0	0,5/0,17/1,33 / --
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	n/n/n / --	n/n/n / --	n/n/n / --	j/j/j / j/j/j	-- / (j)/(j)/(j)	(j)/(j)/n / --
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Veränderungen / Schäden (Tage)	2 / --	2,67 / -	3,33 / -	n.n. / 148,5	-- / 9	7 / --
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	2	1	1	3,5	4,5	1,5
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	6	6	5 - 6	1	1	4
Feuchtigkeitsdurchlässigkeit (Note 1 – 6)	6	6	5 - 6	1	1	3,5
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	1/1/1	1/1/1	3/3/3	2/2/2	2/2/2	3/4/4
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	ab 1,98 / 7,12 / 1725	2 / 7,15 / 1257,50	2,10 / 7,46 / 1323,88	ab 3,74 / 15,08 / 3239,37	ab 3,94 / 19,70 / 4924	ab 2,02 / 7,30 / 1295
erforderliches Gerät	n.n.		Einschweißgerät (z.B. Zange oder Standgerät), Schere, Stromquelle		Vakuumschweißgerät, Schere, Stromquelle	
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	n.n.		Zangenschweißgerät: ab ca. 878 €		Vakuumschweißgerät: ab ca. 260 €	
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	Raumklimatisierung erforderlich (=> entspr. Stromkosten, Wartungs- und Kontrollarbeiten)		Stichprobenartige Kontrollen empfehlenswert; Lebenszeit der Beutel voraussichtlich ca. 5-10 Jahre => erneutes Verpacken & Absorberwechsel nötig;		Nach 1-2 Monaten Raumklimatisierung (=> entspr. Strom, Wartungen und Kontrollen) oder Umpacken erforderlich	
Bemerkungen				Objekte: relativ kurze Lagerzeit => Aussagekraft eingeschränkt		
Zusammenfassung	zwecklose Kombinationen, da die Folien zu durchlässig für Gase sind, um eine Wirkung zuzulassen.			(Kontroll-)Indikator bei trocknendem RP-System z.B. Feuchtigkeitsindikatorpapier, sonst z.B. Ageless-Eye		Folie kann den O2-Gehalt nur ca 1-2 Monate unten halten => max. temporäre Lösung. zum Vakuum: s. 3.4.4.1 Vakuum

Tabelle 10: Auswertungstabelle zu verschiedenen Folien mit Sauerstoffabsorbemern.

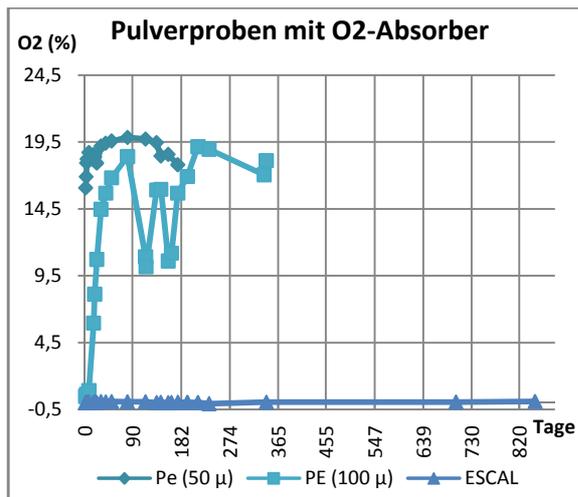


Abb. 16: Der Sauerstoffgehalt in verschiedenen Pulverprobenverpackungen mit Sauerstoffabsorbieren (PE 50 µ: Fe-A-0027-2e; ESCAL™: Fe-A-0032-6e; PE 100 µ: Fe-A-0042-3e).

abhängig.

Auch ein zusätzliches Vakuumieren oder Hinzugeben von Erde (s. 3.4.6.1 Zusatz: Erde) hatte das keinen (positiven wie negativen) Einfluss auf die Stabilität der Proben.



Abb. 17: Pulverindikator in Surlyn™ (Fe-A-0039-10e) bzw. Objekt in ESCAL™-Folie (Fe-A-0600-6e) mit Sauerstoffabsorber.

3.4.4.3 Zusatz: Inertes Gas (Stickstoff / Argon)

Statt den Sauerstoff vom Objekt fernzuhalten, indem man ihn absorbiert, kann man ihn auch durch ein anderes, inertes Gas ersetzen. Hierzu bieten sich Argon und der günstigere Stickstoff an.

Es können entweder Verpackungen rückbegast oder Vitrinen mit Stickstoffklima versehen werden (s. 3.4.4.4 Stickstoffvitrinen).

Das Befüllen von Verpackungen mit Gas funktioniert am besten mit einem speziell dafür ausgerüsteten Schweißgerät. Bei den stickstoffbegasteten Beuteln wurde dabei das Kammerweißgerät der Fa.

Boss am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege benutzt. Damit kann der Folienbehälter automatisch mit einer wählbaren Menge Gas gefüllt und verschweißt werden. Die Gasversorgung ist dabei über einer Flasche gewährleistet – ob ein Generator ebenfalls möglich wäre, ist unbekannt.

Für die argonbegasteten Beutel wurde eine improvisierte Lösung mit einem direkt an der Flasche befestigten Schlauch als Gaszuleitung und einem Zangenschweißgerät ausprobiert. Dabei wurden die Beutel mit den Proben bis auf eine kleine Öffnung, durch die der Schlauch gerade noch hindurch passte, zugeschweißt. Das Gas wurde dann durch den weit hineingeschobenen Schlauch in den Beutel geleitet, bis man davon ausgehen konnte, dass das Argon den Sauerstoff verdrängt hatte. Mit der Schweißzange wurde der Beutel dann geschlossen.

Das Resultat variierte jedoch stark und hängt sehr vom Geschick des Bearbeiters ab. Außerdem ist der Zeitaufwand sehr hoch. Als Standardlösung ist diese Variante also auf keinen Fall zu empfehlen.

Auswertungskriterien - Stickstoff	PE (100 µ)	Surlyn™	Vakuumbbeutel	ESCAL™	Alu- ESCAL™
Anzahl Proben (Pulverindikatoren / Objekte)	3 / --	3 / --	3 / 5	3 / 3	3 / 3
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte) (Tage)	741 / --	741 / --	741 / 859,8 (859-861)	741 / 858,67 (858-859)	741 / 861
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	5,5 / --	5,5 / --	3,5 / 4,3	1,67 / 1,33	1,33 / 1,83
Anzahl der Proben mit (neuen) Veränderungen bzw. Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	3/3/3 / --	3/3/3 / --	3/3/3 / 0/1/5	3/3/3 / 0/0/1,5	0/0/2 / 0/0/2
Grad der neuen Veränderungen / Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	4/3/1 / --	3,5/2,33/2 / --	0,5/2/2,5 / 0/0,3/3,6	0,5/0,5/1 / 0/0/0,67	0/0/0,33 / 0/0/2
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	n/n/n / --	n/n/n / --	j/(j)/n / j/(j)/n	j/j/(j) / j/j/j	j/j/j / j/j/n
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Veränderungen / Schäden (Tage)	4 / --	4 / --	93,33 / 475,2	14 / 859	741 / 721,5
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	1	1	1,5	3,5	4,5
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	6	5 - 6	4	1	1
Feuchtigkeit durchlässigkeit (Note 1 – 6)	6	5 - 6	3,5	1	1
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	3/3/3	4/4/4	3/3/3	3/4/3	3/3/3
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	0,08 / 0,25 / 62,81	0,18 / 0,56 / 129,19	ab 0,10 / 0,40 / 100,31	ab 1,82 / 8,18 / 2044,68	ab 2,02 / 10,12 / 2530,47
erforderliches Gerät	Kammerschweißgerät mit Rückbegasungsfunktion, Stickstoff-Gasflasche, Schere, Stromquelle				
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	Kammerschweißgerät: Fa. Boss, Titan 1300 (Sonderanfertigung BLfD): ca. 8500 €; Gasflasche N ₂ 5.0 (20 l / 200 bar = 4 m ³) - Miete: ca. 80 € / Jahr, Füllung + Lieferung (ca. 6000 20x30 cm-Beutel): ca. 150 €				
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	Gasflaschen: Evt. Miete, evt. TÜV (bei Kaufflaschen), Bestimmungen für Flaschenstandort beachten; Kammergerät: jährliche Geräterwartung, Stromkosten.			s. li. Stichprobenartige Kontrollen empfehlenswert; Lebenszeit der Folie ca. 5-10 Jahre => erneutes Verpacken nötig.	

Auswertungskriterien – Stickstoff (Forts.)	PE (100 µ)	Surlyn™	Vakuumbbeutel	ESCAL™	Alu- ESCAL™
Bemerkungen				Die Pulverindikatorbeutel haben sich aufgebläht.	Fast alle Objektbeutel waren beschädigt und daher undicht.
Zusammenfassung	zwecklose Kombination, da Folie zu durchlässig für O2, um Wirkung zuzulassen		O2-Gehalt blieb ca 1-2 Monate niedrig => max. temporäre Lösung.	(Kontroll-)Indikator z.B. Ageless-Eye	

Tabelle 11: Auswertungstabelle zu verschiedenen mit Stickstoff befüllten Folien.

Auswertungskriterien – Argon	Vakuumbbeutel	ESCAL™
Anzahl Proben (Pulverindikatoren / Objekte)	-- / 7	-- / 7
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte) (Tage)	-- / 976 (973-978)	-- / 976,57 (973-978)
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	-- / 4,14	-- / 1,36
Anzahl der Proben mit (neuen) Veränderungen bzw. Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	-- / 2/5/7	-- / 0/1/2
Grad der neuen Veränderungen / Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	-- / 0,5/1,71/2,79	-- / 0/0,14/0,29
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	-- / (j)/n/n	-- / j/(j)/(j)
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Veränderungen / Schäden (Tage)	-- / 325,86	-- / 551
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	1,5	3,5
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	4	1
Feuchtigkeitsdurchlässigkeit (Note 1 – 6)	3,5	1
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	3/3/3	3/3/3
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	ab 0,11 / 0,43 / 106,16	ab 1,83 / 8,21 / 2050,53
erforderliches Gerät	Schweißgerät (Zange oder Kammergerät mit Rückbegasungsfkt.), Argon-Gasflasche, Silikonschlauch, Schere, Stromquelle	
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	Zangenschweißgerät: ab ca. 878 €; Kammerweißgerät: Fa. Boss, Titan 1300 (Sonderanfertigung für BLfD - 145 x 115 x 97 cm): ca. 8500 € Gasflasche Argon (20 l / 200 bar = 4 m³) - Miete: 47,60 € / Jahr, Füllung inkl. Lieferung (ca. 6000 20x30 cm-Beutel): 199,21 € ¹⁷	
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	s. Tabelle 11 - Vakuumbbeutel	s. Tabelle 11 - ESCAL™
Zusammenfassung	Folie kann den O2-Gehalt nur ca 1-2 Monate unten halten => max. temporäre Lösung.	(Kontroll-)Indikator z.B. Ageless-Eye

Tabelle 12: Auswertungstabelle zu verschiedenen mit Argon befüllten Folien.

Auch hier zeigen die Ergebnisse die Abhängigkeit von der Folienqualität. Die dichten Folien schützten ihre Objekte bis zum Ende der Testdauer recht zuverlässig. Probleme gab es nur, wenn Schäden an der Folie oder eine unvollständige Schweißnaht vorlagen. Die PE-Folien sind für die sauerstofffreie

¹⁷ Gasflaschen-Preise können regional stark variieren.

Lagerung ungeeignet, da sie zu durchlässig sind. Die Vakuumbbeutel konnten den Sauerstoffgehalt immerhin für eine kurze Zeit unten halten.

Zwischen Argon und Stickstoff zeigte sich erwartungsgemäß kein Unterschied in Effektivität und Wirkungsdauer.

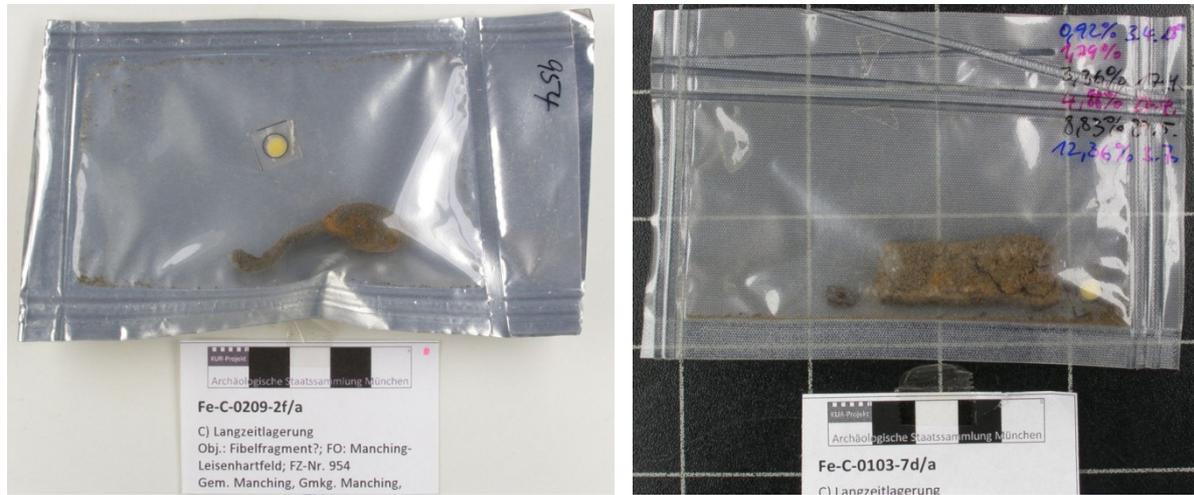


Abb. 18: Objekte in Alu-ESCAL™-Beutel mit Stickstoff (Fe-C-0209-2f/a) und Vakuumbbeutel mit Argon (Fe-C-0103-7d/a).

3.4.4.4 Stickstoffvitrinen

An der Archäologischen Staatssammlung München wurde in Kooperation mit der Fa. Jordan für dieses Projekt ein Stickstoffvitrinensystem entwickelt und im Depot installiert. Dieses wird mit einem geringen, aber konstanten Gasfluss auf einem Sauerstofflevel von unter 0,5 % gehalten. Steigt der Gehalt über den Grenzwert, wird automatisch mehr Stickstoff hineingeleitet. Gleichzeitig ist das zugeleitete Gas so trocken, dass sich die Luftfeuchte innerhalb der Vitrinen in für Eisenfunde geeignete Bereiche bewegt. Die Objekte sind also sowohl durch Sauerstoffentzug als auch durch trockenes Klima geschützt.

An einem direkt angeschlossenen Computer kann der Verlauf des Sauerstoffgehaltes in den Vitrinen gespeichert und abgelesen kann. Ist ein Netzwerkanschluss vorhanden, ist das auch an Computern in anderen Räumen möglich.



Abb. 19: Das Stickstoffvitrinensystem der Archäologischen Staatssammlung München.



Abb. 20: Zwei Objekte in der Stickstoffvitrine (Fe-C-0397 bzw. 0398-2).

Auswertungskriterien	Stickstoffvitrinensystem
Anzahl Proben (Pulverindiaktoren / Objekte)	3 / 16
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte) (Tage)	477 / 553,94 (553-554)
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	1,5 / 1,16
Anzahl der Proben mit (neuen) Veränderungen bzw. Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	3/0/0 / 0/2/2,5
Grad der neuen Veränderungen / Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	0,5/0/0 / 0/0,13/0,18
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	j/j/j / j/j/j
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Veränderungen / Schäden (Tage)	3 / 412
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	n.n.
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	n.n.
Feuchtigkeit durchlässigkeit (Note 1 – 6)	n.n.
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	6/4/1 ¹⁸
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	z.B. PE-Beutel (ab 0,04 / 0,11 / 27,50 €)
erforderliches Gerät	Stickstoffvitrinensystem (ASM: 2 Acrylglasvitriren (BxHxT: 60x80x65 cm und 120x80x65 cm), 2 Gasspeichertanks, Sauerstoffmessgerät, Stickstoffgenerator, Kontrollsystem, Computer, 2 Schwerlasttische), Druckluft- & Stromquelle, gute Raumbelüftung.
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	Stickstoffvitrinensystem der Fa. Jordan (s.o.): 39771,24 €; TÜV-Abnahme der 2 Druckbehälter: 368,90€ => ca. 40000 €
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	Stromverbrauch: ca. 10 kWh / Tag; Wartungskosten, TÜV

Tabelle 13: Auswertungstabelle zum Stickstoffvitrinensystem an der ASM.

Die Proben sind nach ca. 1,5 Jahren stabil und werden es voraussichtlich so lange sein, wie das Klima in den Vitrinen nicht längerfristig gestört ist.

Das System hat jedoch zwei Nachteile: Die hohen Anfangskosten und der begrenzte Raum, wodurch es in der Form des Versuchsaufbaus nicht massentauglich ist. Es ist jedoch durch weitere Vitrinen erweiterbar – ab einem bestimmten Volumen sind allerdings weitere Speichertanks und Stickstoffgeneratoren nötig.

Das System der ASM lief zunächst nur mit der kleinen Vitrine und verbrauchte ca. 9,5 kWh / Tag. Nachdem die größere Vitrine angeschlossen wurde, fiel auf, dass sich Stromverbrauch und damit Laufrhythmus des Generators kaum änderten. Die Kapazität der vorhandenen Gegebenheiten (mit ca. 50 m³ angegeben) ist also noch nicht ausgeschöpft.

3.4.5 Trockene Lagerung

Das Entfernen von Feuchtigkeit aus der Objektumgebung ist die häufiger angewandte Methode, da ein trockenes Klima in großen Räumen wesentlich leichter zu erzeugen ist als ein sauerstofffreies und Trockenmittel günstiger sind als Sauerstoffabsorber. Dabei scheint eine trockene Lagerung bei idealen Bedingungen (s.u.) vergleichbar effektiv wie eine sauerstofffreie.

¹⁸ Das Öffnen der Vitrinen dauert konstruktionsbedingt recht lang. Dies kann aber durch die Verwendung anderer Vitrinen umgangen werden.

Ein Nachteil hierbei könnte sein, dass sich durch ein Abtrocknen mitunter Korrosionsauflagerungen verhärteten, was ein nachfolgendes Freilegen oder Entsalzen erschwert.¹⁹

Um archäologische Objekte sicher und stabil zu lagern, ist eine Luftfeuchte von max. 19 % bzw., falls bereits Akaganeit vorhanden ist, 12 % rH erforderlich.²⁰ Da die Korrosionsrate exponential steigt, scheinen Werte bis ca. 30-35 % rH²¹ noch im vertretbaren Rahmen, zumal eine konstante Luftfeuchte von unter 30 % besonders in Räumen, die mehr oder weniger oft von Personen aufgesucht werden, kaum bzw. nur unter großem Kostenaufwand realisierbar sind.

Um ein trockenes Klima zu erzeugen stehen prinzipiell zwei Mittel zu Verfügung: Entfeuchtende Klimageräte, die sich hauptsächlich zur Raumklimatisierung eignen, oder Trockenmittel, die eher im kleineren Rahmen eingesetzt werden.

3.4.5.1 Raumklimatisierung / Raumentfeuchter

Relativ weit verbreitet ist die Entfeuchtung ganzer Depoträume mittels eines Luftentfeuchters. Diese saugen die Raumluft an, kondensieren die Feuchtigkeit an einem Kältemodul aus und blasen die wieder aufgewärmte Luft in den Raum zurück. Das Kondensat wird durch einen Schlauchanschluss abgeführt oder in regelmäßigen Abständen per Hand entsorgt. Allerdings ist es höchst schwierig, ganze Räume auf einem Wert von unter 20 % relativer Luftfeuchte zu halten. Oft wird daher, wie im Metalldepot der ASM, der zweite Schwellenwert von ca. 30 – 35 % rH angestrebt.

Für die Vergleichstabelle wurde der Generaleindruck der im Metalldepot gelagerten Funde wiedergegeben. Eine konkrete wissenschaftliche Bearbeitung wurde nicht vorgenommen, für die Beurteilung wurde aber soweit möglich ein Zeitraum von drei Jahren angesetzt.

Auswertungskriterien	Raumentfeuchtung
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	-- / 2
Grad der neuen Veränderungen / Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	-- / 0/0/0,5
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	-- / j/j/(j)
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	n.n.
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	n.n.
Feuchtigkeitsdurchlässigkeit (Note 1 – 6)	n.n.
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	-- / 1/1/1
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	z.B. PE-Beutel (ab 0,04 / 0,11 / 27,50 €)
erforderliches Gerät	Raumentfeuchter, Stromquelle, Abflussmöglichkeit
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	abhängig von Raumgröße, z.B. für bis zu 550 m ³ : Defensor OD 125-TH : 698,53 €
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	Stromverbrauch, evt. Wartung / Kontrollen an Maschine und stichpunktartig bei Objekten;

Tabelle 14: Vergleichstabelle zur Lagerung in entfeuchteten Räumen an der ASM.

¹⁹ Höpfner, 1999

²⁰ Watkinson & Lewis, 2004

²¹ Wang, 2007

Im Metalldepot der ASM wird durch ein Raumfeuchtungsgerät eine Luftfeuchte von maximal 35 % hergestellt. Im Winterhalbjahr liegt der Wert allerdings auch oft darunter. Der läuft Entfeuchter mit Hilfe eines eingebauten Hygrometers nur nach Bedarf, eine Angabe zum Stromverbrauch kann daher nicht gemacht werden. Dies würde hier aber auch wenig Aufschluss für andere Institute bieten, da die klimatischen Voraussetzungen wie die Ausgangsluftfeuchte von vielen regional und örtlich variierenden Faktoren abhängen und daher sehr individuell sind.

Die Objekte sind recht stabil, zeigen aber teilweise kleine Akaganeitablühungen. D.h. eine Korrosion wird zwar sehr stark verlangsamt, aber nicht vollständig unterbunden. Dies ist bei einem solchen Luftfeuchtwert allerdings auch nicht zu erwarten.

3.4.5.2 Zusatz: Silicagel

Für kleinere Volumina wie Objektverpackungen eignen sich Trockenmittel wie Molekularsiebe oder Silicagel. Besonders bei letzterem gibt es verschiedene Varianten, die z.B. unterschiedliche Feuchtegrade erzielen oder integrierte Farbindikatoren enthalten können.

Im Projekt wurde (loses) farbumschlagendes Silicagel²² eingesetzt, da so ein extra Indikator umgangen werden konnte und es regenerierbar ist. Trockenmittel in Beuteln sind dies zwar nicht, aber einfach und praktisch in der Handhabung. Hier und bei sich nicht verfärbenden Mitteln wie Molekularsieben kann zur Kontrolle der Wirksamkeit ein Feuchtigkeitsanzeigerstreifen hinzugegeben werden. Es sollte ein Indikator oder Silicagel gewählt werden, bei dem der Farbumschlag bei niedrigen Feuchtwerten erfolgt, um einen ausreichenden Zeitpuffer zum Wechseln des Trockenmittels zu gewährleisten.



Abb. 21: Pulverindikator in ESCAL™-Folie (Fe-A-0594-6d) und Objekt in Alu-ESCAL™-Beutel (Fe-C-0149-1f/c) mit Silicagel.

²² Silicagel Chamaeleon, Körnung 2 – 5 mm, brockige Form bzw. Silicagel orange, Körnung 2 - 5 mm, kugelige Form (Long Life for Art)

Die Lebensdauer des Trockenmittels verlängert sich natürlich, wenn die Objekte nur noch wenig Eigenfeuchte mitbringen. Daher ist bei grabungsfrischen Funden eine vorherige Trocknung vor dem endgültigen Verschweißen empfehlenswert.

Auswertungskriterien - Silicagel	PE (50 µ)	PE (100 µ)	Vakuumbbeutel	ESCAL™	Alu- ESCAL™
Anzahl Proben (Pulverindikatoren / Objekte)	-- / 1	-- / 5	3 / 1	3 / 3	-- / 5
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte) (Tage)	-- / 994	-- / 993	119 / 993	119 / 993	-- / 924
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	-- / 5	-- / 2,6	3,5 / 2	1,17 / 1	-- / 1,5
Anzahl der Proben mit (neuen) Veränderungen bzw. Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	-- / 0/0/1	-- / 0/0/4	3/--/3 / 0/0/1	1/--/0 / 0/0/0	-- / 0/0/5
Grad der neuen Veränderungen / Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	-- / 0/0/5	-- / 0/0/2,4	2,5/--/2 / 0/0/1	0,33/--/0 / 0/0/0	-- / 0/0/1
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	-- / (j)/(j)/n	-- / j/j(?) / n	n/--/n / (j)/(j)/(j)	j/j/j / j/j/j	-- / j/j/(n)
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Veränderungen / Schäden (Tage)	-- / 701	-- / 198,6	38 / 993	9 / n.n.	-- / 924
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	2	1	1,5	3,5	4,5
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	6	6	4	1	1
Feuchtigkeit durchlässigkeit (Note 1 – 6)	6	6	3,5	1	1
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	1/1/1	1/1/1	2/2/2	2/2/2	2/2/2
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	ab 0,44 / 1,51 / 377,50	ab 0,46 / 1,58 / 395	ab 0,48 / 1,73 / 432,50	ab 2,20 / 9,51 / 2376,87	ab 2,40 / 12 / 3000
erforderliches Gerät	n.n.	n.n.	Einschweißgerät (z.B. Zange oder Standgerät), Schere, Stromquelle		
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	n.n.	n.n.	Zangenschweißgerät: ab ca. 878 €		
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	Silicagelwechsel notwendig (Intervalldauer unbekannt), Raumklimatisierung würde Kapazität des Silicagels verlängern (=> entspr. Stromkosten, Wartungs- und Kontrollarbeiten)			nach ca. 4-6 Jahren werden Silicagelwechsel nötig; stichprobenartige Kontrollen empfehlenswert; Lebenszeit der Beutel voraussichtlich ca. 5-10 Jahre => erneutes Verpacken nötig;	
Bemerkungen					
Zusammenfassung	Eher ungeeignete Kombination: solange Silicagel wirkt, ist ein Schutz vorhanden. Hierfür sind mehr (PE) oder weniger (Vakuumbbeutel) häufige Wechsel pro Jahr notwendig => hoher Arbeitsaufwand. Indikator: s. re.			Als Kontrollindikator kommen z.B. farbumschlagendes Silicagel oder Indikatorstreifen in Frage.	

Tabelle 15: Auswertungstabelle zu verschiedenen Folien mit Silicagel.

Ein Trockenmittel kann theoretisch mit jeder Sorte von Folie o.a. dichten Verpackung (wie z.B. Plastikboxen²³) wirken, solange es vor dem Überschreiten seiner Wasseraufnahmekapazität gewechselt

²³ S. z.B. Guggenheimer, 2006

wird. Da dies besonders bei großen Fundmengen kaum möglich ist – Arbeitsaufwand und -zeit wären bei einem häufig nötigem Austausch einfach zu groß bzw. lang und damit zu teuer – kommen auch hier nur dichte Folien in Frage, um zumindest die Intervalle zwischen den Wechseln möglichst lang zu halten. Diese liegen bei den PE-Folien und den Vakuumbuteln unter einem Jahr.²⁴ Das Wechselintervall bei den hochdichten Folien dürfte bei mind. 4-6 Jahren liegen.²⁵ Dies konnte aber aufgrund der Projektdauer nicht nachgeprüft werden.

3.4.6 Sonstige Lagermethoden

3.4.6.1 Zusatz: Erde(+ inertes Gas)

Da die Objekte über Jahrhunderte im Erdboden überdauert haben, erscheint es logisch, dass das unter den gleichen Voraussetzungen weiterhin möglich sein sollte. Daher gibt es Ansätze, die solche Lagerbedingungen durch Beigabe von Erde und evt. Zugabe eines inerten Gases zu erzeugen versuchen.²⁶ Neben dem günstigen Klima bietet die Erde noch den Vorteil, als Puffer für Objekt und Folie gegenüber mechanischen Belastungen agieren zu können. Der offensichtliche Nachteil ist, dass die Sichtbarkeit des Objektes eingeschränkt wird. Eine vorherige sorgfältige fotografische Dokumentation des verpackten Fundes wäre auf jeden Fall notwendig.

Abb. 22: Objekt im PE(100µ)-Beutel mit Erde (Fe-A-0049-3c) – Beutel- und Detailsicht.



Abb. 23: Objekt in ESCALTM-Folie mit Erde und Argon (Fe-C-0100-7c/b) nach Ende der Testdauer.

²⁴ Nach Auskunft und Erfahrung von Tom Stöckl (BLfD) hält ein trockenes Klima in PA-PE-Folien der Stärke 160 µ mind. zwei bis drei Jahre.

²⁵ Mathias, Ramsdale, & Nixon, 2004; bei günstigen Lagerbedingungen (wie z.B. wenig Licht, ca. 50 % rH, 20 – 22 °C) evt. auch länger – s. Schmidt-Ott, 2012

²⁶ Höpfner, 1999 (zusätzlich noch Rückbegasung mit Stickstoff)

Auswertungskriterien - Erde	PE (100 µ)	Surlyn™ + O ₂ -Absorber	ESCAL™ + O ₂ -Absorber	Vakuumbbeutel + Argon	ESCAL™ + Argon
Anzahl Proben (Pulverindikatoren / Objekte)	-- / 4	-- / 1	-- / 2	-- / 5	-- / 5
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte) (Tage)	-- / 999	-- / 965	-- / 965	-- / 979	-- / 979
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	-- / 3,63	-- / 5	-- / 1	-- / 2,6	-- / 1
Anzahl der Proben mit (neuen) Veränderungen bzw. Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	-- / 0/0/4	-- / 0/1/1	-- / 0/0/0	-- / 0/0(?) / 3	-- / 0/0/0
Grad der neuen Veränderungen / Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	-- / 0/0? / 3,63	-- / 0/2,5/3	-- / 0/0/0	-- / 0/0(?) / 2,2	-- / 0/0/0
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	-- / j/(j)/n	-- / (j)/n/n	-- / j/j/j	-- / j/j(?) / n	-- / j/j/j
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Veränderungen / Schäden (Tage)	-- / 999	-- / 118	-- / n.n.	-- / 979	-- / n.n.
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	1	1	3,5	1,5	3,5
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	6	5 - 6	1	4	1
Feuchtigkeit durchlässigkeit (Note 1 – 6)	6	5 - 6	1	3,5	1
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	1/1/1	3/4/4	2/3/2	3/3/3	4/4/4
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	0,06 / 0,22 / 45	2,10 / 7,46 / 1323,88	ab 3,74 / 15,08 / 3239,37	ab 0,11 / 0,43 / 106,16	ab 1,83 / 8,21 / 2050,53
erforderliches Gerät	n.n.	Einschweißgerät (z.B. Zange oder Standgerät), Schere, Stromquelle		Schweißgerät (Zange oder Kammergerät mit Rückbegasungsfkt.), Argon-Gasflasche, Silikon-schlauch, Schere, Stromquelle	
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	n.n.	Zangenschweißgerät: ab ca. 878 €; Vakuumschweißgerät: ab ca. 260 €		Zangenschweißgerät: ab ca. 878 €; Kammergerät: Fa. Boss, Titan 1300 (Sonderanfertigung für BLfD): ca. 8500 € Ar-Flasche (20 l / 200 bar = 4 m ³) - Miete: 47,60 € / Jahr, Füllung + Lieferung: 199,21 € ²⁷	
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	Raumklimatisierung erforderlich (=> entspr. Stromkosten, Wartungs- und Kontrollarbeiten)			Gasflasche: Miete od. TÜV (Kaufflaschen), Standortbestimmungen!; Kammerger.: Wartung, Strom	Lebenszeit der Folie ca. 5-10 Jahre => erneutes Verpacken nötig; Gasflasche, Kammergerät: s. li.
Bemerkungen				Kontrollen aufgrund der eingeschränkten Sicht schwierig.	
Zusammenfassung	zwecklose Kombination, da Folien zu durchlässig für O ₂ und Wasserdampf, um eine Wirkung zuzulassen.		(Kontroll-)Indikator: z.B. Ageless-Eye	Folie kann Klima nur ca. 1-2 Monate halten => max. temporäre Lösung.	

Tabelle 16: Auswertungstabelle zu verschiedenen Folien mit Erde (und z.T. O₂-Absorbieren bzw. Argon).

²⁷ Gasflaschen-Preise können regional stark variieren.

Da Pulverindikatoren in Gegenwart mit Erde voraussichtlich stark reagieren würden, wurde diese Kombination nur mit Objekten getestet. Die Proben wurden mit Ausnahme von denen, die Argon enthielten, auf der Grabung verpackt.

Um das Ziel zu erreichen, das Bodenklima zu imitieren, muss die Folie hochdicht gegenüber Gasen und Wasserdampf sein. Nur die Proben in der ESCAL™-Folie blieben bis zum Schluss stabil. Bei diesen waren allerdings noch sauerstoffbeseitigende Maßnahmen angeschlossen, so dass nicht festgestellt werden kann, welche den eigentlichen schützenden Effekt hatte.

Aufgrund der mangelnden Sichtbarkeit sind allerdings Zwischenkontrollen der verpackten Funde so gut wie unmöglich. Einzig regelmäßiges Röntgen könnte evt. Aufschluss über entstandene Schäden geben, was aber einen sehr hohen Arbeitsaufwand beinhalten würde und nur ein eigentlich zu spätes Eingreifen ermöglichen würden.

In Anbetracht der vergleichbar guten Ergebnisse bei einigen Verpackungsvarianten ohne Erde, ist aber zu überlegen, ob man die Sichtbarkeit der Funde durch Erde in Kauf nehmen möchte.

3.4.6.2 Skin-System

Aus dem Bereich der Warenverpackung stammt das sogenannte Skin-System, das an der ASM zur Verfügung steht. Hierbei werden die Objekte mit der Surlyn™-Folie auf eine PE-beschichtete Pappe (POLYBOARD® Skinkarton) verschweißt. So ist das Objekt gut fixiert, was z.B. Schäden durch Hin- und Herrutschen in Verpackungen verhindert, und leicht in Kisten einsortierbar. Sollten Teile durch Korrosion abfallen, werden sie durch die Folie dennoch am Platz gehalten.

Aufgrund der verwendeten Materialien ist jedoch offensichtlich, dass keine Abschirmung gegen Sauerstoff oder Wasserdampf erfolgt. Weitere Maßnahmen zum Objektschutz wie z.B. eine Regulation der Raumluftfeuchte sind also notwendig.



Abb. 24: Die Skin-Maschine an der Archäologischen Staatssammlung München (ASM) für Pappen der Größe 70 x 45 cm.



Abb. 25: Eingeschnittenes Objekt in der Verpackung und ausgepackt nach Ende der Testdauer (Fe-C-0091-6a).

Auswertungskriterien – Skin-System	Kein Zusatz	Erde	Silicagel
Anzahl Proben (Pulverindikatoren / Objekte)	6 / 2	-- / 5	3 / --
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte) (Tage)	531,67 (123-861) / 979	-- / 979	627 / --
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	3,92 / 2	-- / 3,33	3,17 / --
Anzahl der Proben mit (neuen) Veränderungen bzw. Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	3/6/5 / 0?/0?/1	-- / 0?/0?/3	3/3/3 / --
Grad der neuen Veränderungen / Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	0,83 / 2,33 / 2,3 / 0?/0?/1,25	-- / 0?/0?/2,8	1,67/(1,67)/1,83 / --
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	(j)/(j)/n / j(?) / j(?) / n	-- / j(?) / j(?) / n	(j)/(j)/n / --
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Veränderungen / Schäden (Tage)	41,5 / 979	-- / 979	22 / --
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	1	1	1
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	6	6	6
Feuchtigkeitsdurchlässigkeit (Note 1 – 6)	6	6	6
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	6/2/2	6/2/2	6/2/2
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	ab 0,57 / 1,12 / 278,75	ab 0,57 / 1,12 / 278,75	ab 0,97 / 2,52 / 628,75
erforderliches Gerät	Skin-Maschine, Starkstromquelle, Druckluftanschluss; (Raumentfeuchter o.ä. Raumklimatisierung)		
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	Skin-Maschine für ca. 70 x 45 cm-Verpackungen: ca. 15.000 € (gebraucht), 35.000 € (neu)		
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	keine Wartung durch Fachmann nötig (nur normale Maschinenpflege - z.B. Ölwechsel alle 2 Jahre), Stromverbrauch ca. 10 kWh; Raumklimatisierung erforderlich (=> entspr. Stromkosten, Wartungs- und Kontrollarbeiten)		
Bemerkungen	Objekte konnten in verpacktem Zustand aufgrund der eingeschränkten Sicht optisch nicht gut beurteilt werden. Kein Zusatz: Bei einem der Objekte handelt es sich vermutlich um Schlacke. Erde: Ein Teil der verpackten Objekte hatte vermutlich keinen Metallkern.		
Zusammenfassung	Folie verhindert ein Ver-rutschen abgefallener Teile.	zwecklose Kombinationen, da das Skin-System zu durchlässig für O2 und Feuchtigkeit ist, um eine Wirkung der Zusätze zuzulassen	

Tabelle 17: Auswertungstabelle zum Skin-System ohne Zusatz, mit Erde bzw. Silicagel.

Das Skin-System zeichnet sich weniger durch eine klimatische Schutzwirkung als durch die oben beschriebenen Vorteile auf der mechanischen Seite und ihre kurze Bearbeitungszeit bei größeren Fundmengen aus. Um aber Korrosionsschäden zu vermeiden, sind weitere Maßnahmen wie z.B. das Erzeugen eines trockenen Raumklimas notwendig.

Die „eingeskinnten“ Objekte konnten optisch nur eingeschränkt beurteilt werden. Mehrfach zeigte sich, dass ein Objekt, das von außen unbeschädigt aussah, dennoch einige Abplatzungen aufwies. Diese konnten vor dem Auspacken nicht erkannt werden, da die abgefallenen Schollen fixiert und die sichtbaren Spalten zu fein waren, um sie durch die Folie zu erkennen.

Ein weiterer Nachteil ist das teilweise schwierige Herauslösen aus der Verpackung, das besonders bei filigranen Stücken mit Unterscheidungen den Einsatz von Skalpelln u. ä. Werkzeugen erfordert, um Schäden und mechanische Belastungen zu vermeiden. Etwas erleichtert wird es aber, wenn die vorher Folie mit einem Fön erwärmt wird.

Interessant war jedoch das etwas atypische Verhalten der Pulverproben, die sich bis auf eine Ausnahme Lagerung bei unbeeinflussten Raumklima nur stark verzögert umwandelten. Eine Erklärung hierfür gibt es bis dato nicht, da die Verpackung eigentlich keine Barriere für Wasserdampf und Sauerstoff darstellt.

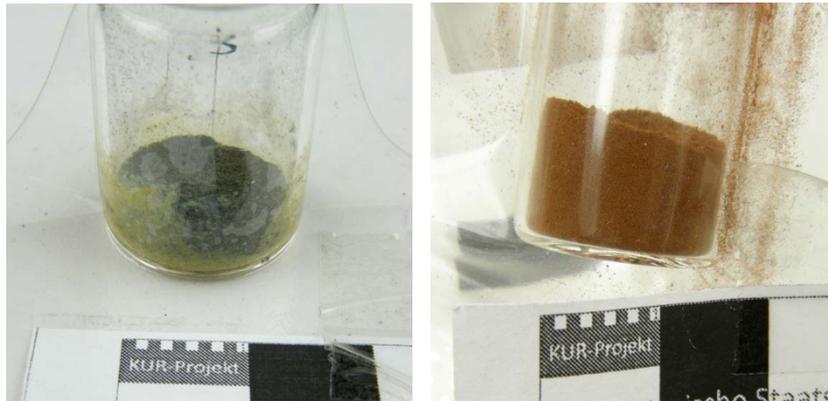


Abb. 26: Pulverindikator in Skin-Verpackung (= Surlyn™-Folie + Pappuntergrund, Fe-C-0122-6a) nach 245 Tagen und nur in Surlyn™-Folie (Fe-A-0167-10b) nach 233 Tagen.

3.4.6.3 (Tief-)Gekühlte Lagerung

Da sich chemische Reaktionen mit zunehmender Kälte verlangsamen, sollte auch eine Kältelagerung von Objekten einen Schutz gegen Korrosionsschäden bewirken. Auch der Befall von Schimmel oder anderen schädlichen (Mikro-)Organismen wird so unterbunden, wodurch diese Option auch für organische Materialien und Blockbergungen interessant ist.

Die Schutzwirkung steigt mit sinkender Temperatur, so dass eine Tiefkühlung in jedem Fall effektiver ist als eine Lagerung im Kühlschrank. Dennoch wird zumindest auch bei Tiefkühltemperaturen um ca. -20 °C die Korrosionsreaktion nur deutlich verzögert, aber nicht unterbunden.²⁸

Nachteile dieses Verfahrens sind der Stromverbrauch der Maschinen, die schwerwiegenden Folgen im Falle eines Ausfallens der Kühlaggregate und das nur begrenzte Platzangebot.

Für das Projekt wurden daher hauptsächlich zu Vergleichszwecken verschieden verpackte Pulverindikatoren bei +4 °C im Kühlschrank und -35 °C im Gefrierschrank gelagert.

²⁸ Kuhn & Eggert, 2010

Auswertungskriterien - Kühlschrankschrank	PE (100 µ)	Surlyn™	Vakuumbbeutel	ESCAL™	Alu- ESCAL™	Vakuumbbeutel - vakuumiert
Anzahl Proben (Pulverindikatoren / Objekte)	3 / --	3 / --	3 / --	3 / --	3 / --	3 / --
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte) (Tage)	732 / --	732 / --	732 / --	732 / --	732 / --	732 / --
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	5 / --	5,33 / --	3,5 / --	3,5 / --	3,5 / --	3,33 / --
Anzahl der Proben mit (neuen) Veränderungen bzw. Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	3/3/3 / --	3/3/3 / --	3/3/3 / --	3/3/3 / --	3/3/3 / --	3/2/3 / --
Grad der neuen Veränderungen / Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	3/2,5/2 / --	2,33/2,67/2 / --	2/1,67/1,5 / --	2,67/1,67/1 / --	3/0,67/0,67 / --	1,33/1,33/1 / --
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	n/n/n / --	n/n/n / --	(j)/(j)/(n) / --	n/n/n / --	(j)/(j)/(j) / --	(j)/(j)/(n) / --
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Veränderungen / Schäden (Tage)	2 / --	2 / --	2 / --	8 / --	8 / --	2 / --
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	1	1	1,5	3,5	4,5	1,5
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	6	5 - 6	4	1	1	4
Feuchtigkeit durchlässigkeit (Note 1 – 6)	6	5 - 6	3,5	1	1	3,5
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	1/1/1	3/3/3	2/2/2	2/2/2	2/2/2	3/4/4
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	0,06 / 0,22 / 45	0,16 / 0,49 / 111,38	ab 0,08 / 0,33 / 82,50	ab 1,80 / 8,11 / 2026,87	ab 2 / 10 / 2500	ab 0,08 / 0,33 / 82,50
erforderliches Gerät	Kühlschrank, Stromquelle		Einschweißgerät, Schere, Kühlschrank, Stromquelle		Vakuumschweißgerät, Schere, Kühlschrank, Stromquelle	
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	Kühlschrank: ab etwa 1188 €		Zangenschweißgerät: ab ca. 878 €; Kühlschrank: ab etwa 1188 €		Vakuumschweißgerät: ab ca. 260 €; Kühlschrank: s. li.	
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	Stromkosten, Wartung (Kühlschrank), Kontrollen					
Bemerkungen	In den Beuteln herrscht etwas Unterdruck.			Beutel sind bei Probenende gebläht.		
Zusammenfassung	Reaktion scheint generell ein wenig verlangsamt im Vgl. zur Raumtemperatur. ESCAL™: der O ₂ -Gehalt ist gesunken, eine Reaktion findet also vermutlich statt. Vakuumbbeutel, vakuumiert: Folie kann den O ₂ -Gehalt nur ca 1-2 Monate unten halten => max. temporäre Lösung; Anm. zum Vakuum: s. 3.4.4.1 Vakuum					

Tabelle 18: Auswertungstabelle zu verschiedenen Folien bei +4 °C.

Auswertungskriterien - Tiefkühlschrank	PE (100 µ)	Surlyn™	Vakuumbutel	ESCAL™	Alu- ESCAL™	Vakuumbutel - vakuumiert
Anzahl Proben (Pulverindikatoren / Objekte)	3 / --	3 / --	3 / --	3 / --	3 / --	3 / --
Durchschnittl. Testdauer (Pulverindikatoren / Objekte) (Tage)	707 / --	707 / --	707 / --	707 / --	707 / --	707 / --
Stabilität der Probe / des Objektes (Note 1 – 6)	3,5 / --	3,17 / --	2,5 / --	2,5 / --	2,17 / --	2,17 / --
Anzahl der Proben mit (neuen) Veränderungen bzw. Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe	3/3/3 / --	3/3/3 / --	2,5/3/3 / --	0/3/3 / --	1/2/2 / --	3/3/3 / --
Grad der neuen Veränderungen / Schäden nach 1 Monat / 6 Monaten / zum Ende der Probe (Note 1 – 6)	0/1,5/3 / --	1/2/1,33 / --	0,83/1,67/1,67 / --	0/1/1 / --	0,33/0,67/0,67 / --	0,83/0,83/0,5 / --
Schutz durch Verpackung nach 1 Monat / 6 Monaten / Ende der Probe (j/n)	j/(j)/(n) / --	(j)/n/n / --	(j)/(j)/(n) / --	j/(j)/(j) / --	j/(j)/(j) / --	(j)/(j)/(n) / --
Durchschnittl. Dauer bis zum Entdecken der ersten Veränderungen / Schäden (Tage)	44 / --	23 / --	15,67 / --	44 / --	44 / --	12,33 / --
Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	1	1	1,5	3,5	4,5	1,5
Sauerstoff- / Gasdichte (Note 1 – 6)	6	5 - 6	4	1	1	4
Feuchtigkeit durchlässigkeit (Note 1 – 6)	6	5 - 6	3,5	1	1	3,5
Zeitdauer beim Verpacken (Objekt / Grab / Gräberfeld) (Note 1 – 6)	1/1/1	3/3/3	2/2/2	2/2/2	2/2/2	3/4/4
Materialkosten (inkl. 19 % MwSt.) (Objekt / Grab / Gräberfeld) (€)	0,06 / 0,22 / 45	0,16 / 0,49 / 111,38	ab 0,08 / 0,33 / 82,50	ab 1,80 / 8,11 / 2026,87	ab 2 / 10 / 2500	ab 0,08 / 0,33 / 82,50
erforderliches Gerät	Tiefkühlschrank, Stromquelle		Einschweißgerät, Schere, Tiefkühlschrank, Stromquelle			Vakuumschweißgerät, Schere, Tiefkühlschrank, Stromquelle
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	Tiefkühltruhe / -schrank: ab 13598,19 €		Zangenschweißgerät: ab ca. 878 €; Tiefkühltruhe / -schrank: s. li.			Vakuumschweißgerät: ab ca. 260 €; Tiefkühlschrank: s. li.
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	Stromkosten, Wartung (Tiefkühlschrank), Kontrollen					
Bemerkungen	In den Beuteln herrscht etwas Unterdruck.					
Zusammenfassung	Reaktion ist verlangsamt im Vgl. zu +4 °C und bei Raumtemperatur. ESCAL™: der O ₂ -Gehalt ist gesunken, eine Reaktion findet also vermutlich statt. Vakuumbutel, vakuumiert: Folie kann den O ₂ -Gehalt nur ca. 1-2 Monate unten halten => max. temporäre Lösung; Anm. zum Vakuum: s. 3.4.4.1 Vakuum					

Tabelle 19: Auswertungstabelle zu verschiedenen Folien bei -35 °C.

Wie zu erwarten war, zeigt sich besonders im tiefgekühlten Bereich eine deutliche Verzögerung in der Umwandlungsreaktion im Vergleich zur Raumtemperatur. Bei +4 °C ist nur ein sehr geringer Unterschied zu merken. Der Reaktionsverlauf ist jedoch der gleiche wie bei Raumtemperatur, so ist z.B. bei den hochdichten Folien ebenfalls zunächst eine Rotfärbung zu beobachten, die dann ins Anthrazitgraue umschlägt.

Besonders bemerkbar macht sich die Verzögerung bei den tiefgekühlten PE-Folien, bei denen die Korrosionsreaktion nach ca. 2,5 Jahren noch mitten im Umwandlungsstadium zu sein scheint, obwohl sie bei Raumtemperatur nach spätestens 10 – 12 Wochen abgeschlossen ist.

Es bleibt jedoch die Tatsache, dass eine Korrosion der Pulverproben auch bei Temperaturen um -35 °C stattzufinden scheint.



Abb. 27: Gekühlte Pulverproben in PE(100 μ)- (li.) bzw. ESCAL™-Folie (re.) – das jeweils linke Bild zeigt die bei 4 °C gelagerte Probe, während die rechte bei -35 °C gelagert worden war.

3.4.7 Zusammenfassung: Auswertung der Lagermethoden

Es gibt bei der Lagerung zwei grundsätzliche Optionen: Verpackungs- und großräumige Lösungen, wobei hier zu letzteren auch Methoden wie Klimavitrinen und tiefgekühlte Lagerung gezählt werden sollen.

3.4.7.1 Verpackungen und Folien

Bei den Verpackungen wurden verschiedene Folien und Zusätze getestet. Aber auch das eigentliche Verpackungsverfahren selbst ist zu überdenken, da es sowohl Vor- als auch Nachteile bietet (s. Tabelle 20).

Der bedeutendste Nachteil ist der Material- und Zeitaufwand. Dieser entsteht sowohl kurzfristig bei der Erstverpackung als auch beim früher oder später notwendigen Neuverpacken, falls die Verpackung als langfristige Lösung dienen soll. Den Großteil der Zeit wird dabei durch das Verschließen in Anspruch genommen, da nur ein Verschweißen sicheren Schutz bietet. Druckverschlussbeutel sind zu durchlässig für Sauerstoff und Feuchtigkeit. Ein wichtiger Faktor beim Verschweißen ist das verwendete Gerät, da sich die einzelnen Typen stark in Schnelligkeit, Ergebnisqualität und Mobilität unterscheiden. Von den im Projekt verwendeten Geräten war das Zangenschweißgerät bei weitem am schnellsten, aufgrund seiner dünnen Schweißlippe war es jedoch besser mind. zwei Nähte zu setzen, so dass dieser Vorteil z. T. revidiert wurde. Das Kammergerät lieferte wiederum die besten Nähte,

war aber aufgrund der Ausmaße und des Gewichts nur eingeschränkt transportabel (z.B. auf Grabungen). Das Vakuumschweißgerät schließlich war sehr langsam, aber dafür recht handlich und robust. Es sollte also schon bei der Auswahl des Gerätes auf das Hauptanwendungsgebiet geachtet werden.

Vorteile – Verpackung	Nachteile – Verpackung
Das Klima in Verpackungen ist leichter zu beeinflussen.	Der kurzfristige Arbeitsaufwand (Verpacken etc.) ist auf jeden Fall höher als bei einer großräumigen Lösung.
Die Objekte sind nicht nur gegen widrige Klimaeinwirkungen geschützt, sondern auch gegen Staub, Schmutz u.ä.	Eine Erneuerung der Verpackung oder auch des Klimazusatzes wird nach gewisser Zeit nötig sein → erneuter Arbeitsaufwand.
Die Objekte sind individuell geschützt, ändert sich z.B. das Klima im Aufbewahrungsraum zum Negativen, schadet das den Funden nicht.	Bei großen Fundmengen sind einzelne Fehlerhafte Verpackungen kaum zu erkennen → einzelne Objekte können unbemerkt zerfallen.
Die Ansprüche an eine Depotklimatisierung sind nicht mehr so hoch.	
Verschiedene Materialgruppen mit unterschiedlichen Klimaanforderungen können zusammen gelagert werden.	

Tabelle 20: Vor- und Nachteile einer (effizienten) Verpackung gegenüber anderen Lagermethoden

Um dem Zeitproblem entgegenzuwirken, wäre eine Überlegung, mehrere Objekte zusammen in einer sicheren Methode zu verpacken. Aber auch hier ist es ein schmaler Grat zwischen Wirtschaftlichkeit und Umstand – die Herangehensweise will daher sorgfältig durchdacht sein.

Ein (nicht getesteter) Vorschlag für Objekte von / auf der Grabung wäre, eine Stück hochdichte Folie etwa doppelt so groß wie die Kiste, in der die Objekte gelagert werden sollen, zu schneiden. Die Objekte wurden auf der Grabung zunächst in PE-Beutel gepackt und mit Fundzettel versehen. Auf eine Folienhälfte werden nun die Objekte in ihren Beuteln und die zugehörigen Fundzettel mit einem langen Klebestreifen geklebt, wobei ein Rand für die Schweißnaht freigelassen werden muss. Die Objektbeutel müssen – z.B. durch eine Perforierung – einen Luftaustausch zulassen. Die Sichtbarkeit von beiden Seiten sollte gewährleistet bleiben, also nicht durch Fundzettel oder andere Objekte eingeschränkt werden. Gleichzeitig wird so sichergestellt, dass sich die Funde durch gegeneinander stoßen nicht beschädigen können. Anschließend wird die zweite Folienhälfte umgeklappt und der Beutel zugeschweißt. (s. Abb. 28)

Diese Methode wäre sowohl auf einer Grabung (z.B. zum Abschluss eines Grabungstages mit den Eisenfunden des Tages) als auch im Restaurierungslabor umsetzbar.

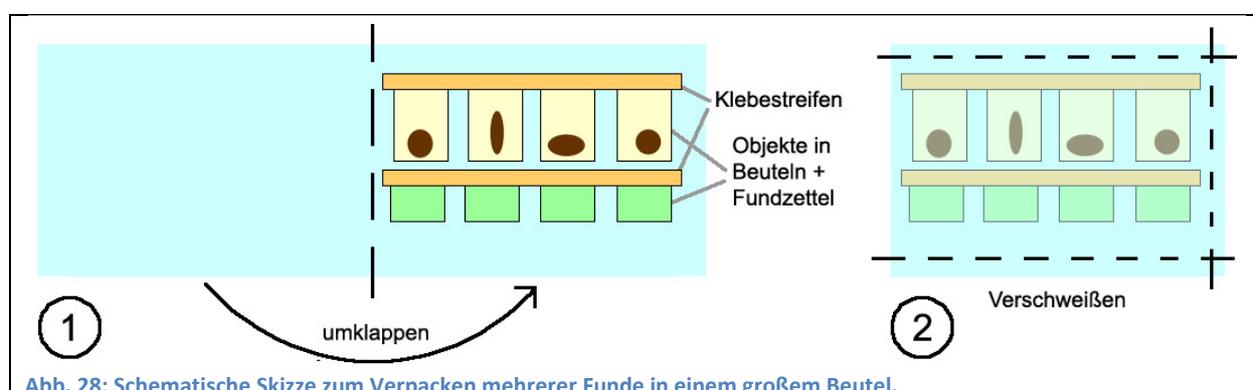


Abb. 28: Schematische Skizze zum Verpacken mehrerer Funde in einem großen Beutel.

Ein weiterer Nachteil ist der eingeschränkte Zugriff auf die eingeschweißten Objekte. Transparente Verpackungen bieten hier einen Kompromiss, der zumindest einen Blick auf das Objekt erlaubt. Kommt noch ein Röntgenbild hinzu, sollten viele Fragen auch ohne ein Auspacken geklärt werden können.

Verpackungen, die keine Sicht auf das Objekt zulassen, ziehen nach sich, dass die Objekte zum Betrachten entnommen werden müssen. Dadurch wird das in der Verpackung aufgebaute Klima zerstört. Durch die unbedingt notwendige Fotodokumentation vor dem Einpacken und das Wiederverpacken nach dem Betrachten entsteht außerdem ein erhöhter Arbeitsaufwand.

Generell konnte z.B. an den Proben, die eingeschweißt von der Grabung kamen, festgestellt werden, dass das Einpackresultat stark von den praktischen Fähigkeiten, Routine und nicht zuletzt der Motivation des bearbeitenden Personals abhängt. Für ungeschulte Leute sollte daher eine sehr exakte Anleitung zur Verfügung stehen und idealerweise noch eine praktische Einweisung erfolgen.

Im Bereich der Folien haben sich deutliche, wenn auch wenig überraschende Tendenzen gezeigt: Während die PE-basierenden Folien für jegliche Form der Klimatisierung ungeeignet sind, liefern die High-Tech-Produkte ESCAL™- und Aluverbundfolie hervorragende Ergebnisse. Entsprechend ist aber auch ihr Preis angesiedelt, der bei dem fiktiven Gräberfeld, das als Berechnungsgrundlage diente, selbst ohne klimatisierende Zusätze bei über 2000 € lag.

Die Vakuumbutel könnten als kurzfristige Lösung z.B. um die Zeit von einer Grabung bis zur Endversorgung interessant sein. In ihnen wird ein Objekt für ca. 1-2 Monate vom Außenklima abgeschirmt und kosten erheblich weniger als die Barrierefolien (Gräberfeld: ab ca. 83 €).

Einen Sonderfall stellt das Skin-System dar, das zwar klimatisch ebenso wenig Schutz wie die PE-Folien, aber sehr guten „mechanischen“ Schutz bietet. Deshalb ist es in Verbindung mit einem konditioniertem Raumklima eine bedenkenswerte Option (Gräberfeld: ca. 280 €).

Generell sollte bei Folien und Beuteln auf einen sorgfältigen Umgang auch mit den ‚Rohstoffen‘ geachtet werden, um Schäden durch Knicke oder punktuelle Belastungen zu vermeiden. Diese sind nicht immer sichtbar, können aber dennoch die Dichtigkeit beeinträchtigen.

Wird eine undichte Verpackung gewählt, bleibt zum Schutz des Objektes, nur das Raumklima um die Verpackung herum zu optimieren.

3.4.7.2 Zusätze

Jegliche Art von stabilisierendem Zusatz kann nur wirken, wenn die Verpackung entsprechend dicht ist, da sonst seine Kapazität schnell aufgebraucht ist. Möchte man einen solchen einsetzen, muss also auch in eine entsprechende hochqualitative Folie investiert werden.

Abgesehen davon scheint es in der Effektivität kaum einen Unterschied zwischen Trocken- und sauerstofffreier Lagerung zu geben. Die Korrosionsreaktion scheint von beiden unterbunden zu werden.

Bei gasdichten Verpackungen zeigte sich, dass der Sauerstoff auch ohne sauerstoffsenkende Zusätze sank. Dies lag vermutlich daran, dass er von dem Objekt aufgebraucht wurde, so dass quasi von alleine eine sauerstofffreie Lagermethode entstand. Es müssten weitergehende Untersuchungen darüber

erfolgen, wie weit die Korrosion dabei fortschreitet und das Objekt Schaden nimmt. Die Projektproben in entsprechenden Verpackungen zeigen jedoch keinerlei von außen sichtbaren Schadensbildern. In Zusammenhang mit der Beobachtung, dass sich zumindest die Pulverindikatoren bereits bei Sauerstoffgehalten um ca. 1 % umzuwandeln beginnen²⁹, könnte das oben erwähnte Phänomen jedoch ein rechtzeitiges Wechseln von Sauerstoffabsorbieren verhindern: Die beginnende Korrosionsreaktion würde den Sauerstoffgehalt evt. trotz fehlender Wirksamkeit des Zusatzes unten halten. Um den rechtzeitigen Wechselzeitpunkt bestimmen zu können, ist ein Indikator notwendig. Eine einfache Variante sind Sauerstoffindikatoren, die bei 0,1 % Sauerstoff einen Farbwechsel vornehmen. Diese sollen aber nach 6-12 Monaten nicht mehr zuverlässig funktionieren³⁰, für eine längere Lagerzeit sind sie also keine gute Option. Die im Projekt verwendeten Sauerstoffsensoren sind sehr teuer und für eine Massenanwendung kaum geeignet. Eine weitere Möglichkeit – zumindest bei den RP-A-Absorbieren, die auch die Luftfeuchte senken – wären Feuchtigkeitsindikatoren (Preis für das „Berechnungsgräberfeld“: z.B. ab 238 €). Diese bieten sich natürlich auch bei Trockenmittelzusätzen an.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich von den Verpackungsvarianten für eine Langzeitversorgung am ehesten die Kombination einer hochdichten Folie mit einem Trockenmittel oder Stickstoff anbieten, da beide effektiv sind und günstiger als die Kombination mit Sauerstoffabsorbieren. Wird bei den Trockenmitteln eines mit Indikatorfunktion verwendet, kann auf einen Extrapapierindikator auch verzichtet werden, andernfalls empfiehlt sich zumindest bei einem gewissen Prozentsatz an verpackten Funden die Beigabe eines solchen. Hier liegt auch der Nachteil der Kombination mit Stickstoff – nach den reinen Zahlen ist sie günstiger, eine Überwachung der Sauerstoffwertes ist aber erheblich schwieriger. Auch ist die notwendige Maschinerie platz- und kostenintensiver.

Für Ausgrabungen bieten sich als Zusätze eher Trockenmittel als Gas oder gar Absorber an, jedoch sollte dann ein vorheriges (schnelles) Trocknen z.B. im Ofen der Funde erfolgen. Ist das nicht möglich wäre wohl am ehesten ein dichtes Verpacken – z.B. auch die Vakuumbbeutel – ohne Zusatz mit möglichst schnellem Einbringen in die Werkstatt angebracht.

3.4.7.3 Großräumige Lösungen

Bei den großräumigen Lösungen tat sich besonders die Stickstoffvitrine als sehr effektiv hervor. Preislich kann sie jedoch sowohl in der Geräteanschaffung als auch in den laufenden Kosten mit einer Raumentfeuchtung kaum mithalten. Auch das Platzangebot ist deutlich geringer. Dafür kann die Raumentfeuchtung wiederum eher selten einen wirklich stabilen Schutz bieten, da die erforderliche Luftfeuchte von unter 12 % rH bzw. 19 % rH nur unter großem Bau- und Kostenaufwand künstlich hergestellt und v.a. gehalten werden kann. Der leichter realisierbare Wert von ca. 30 % rH

²⁹ Diese Beobachtung wurde wissenschaftlich nicht weiterverfolgt. Um weitergehende Aussagen über Regelmäßigkeiten, Erklärungen oder die Übertragbarkeit auf Objekte machen zu können, wäre weitere Forschung nötig.

³⁰ Waller, Long Life for Art: Produkte > Sauerstoffabsorber > Sauerstoffindikatoren, 2012

vermindert und verlangsamt die Korrosion an Eisenobjekten zwar, unterbindet sie aber nicht komplett.

Das gleiche gilt auch für die Tiefkühlung, die jedoch durch ihren Stromverbrauch verhältnismäßig hohe laufende Kosten verursacht, weniger Platz bietet und bei einem Geräteausfall schwerwiegendere Folgen hat.

Generell ist also eine Raumentfeuchtung die günstigste der einigermaßen effektiven Methoden in den Tests zu sein. An der ASM wird sie mit dem Skin-System kombiniert, wodurch die Funde auch mechanisch geschützt und stabilisiert sind.

Abschließend sind die Methoden mit mindestens drei Objekt- oder Pulverproben und am Ende der Probendauer noch stabilen Objekten in einer Übersichtstabelle zusammen gefasst. Es sei nochmal darauf hingewiesen, dass insbesondere die Zeitberechnung stark von Faktoren wie dem verwendeten Gerät, das sich mit Sicherheit an anderen Institutionen von dem der ASM unterscheiden wird, verwendetem Material (z.B. Beutel oder Folie) und Bearbeiter abhängt. Die Angaben wurden daher über die Notenvergabe bewusst eher vage gehalten. Auch bei den Preisangaben sollte in Hinterkopf behalten werden, dass sie sich auf ein bestimmtes Produkt eines speziellen Lieferanten im Frühjahr 2012 beziehen (s. 3.4.9 Bezugsquellen für die genannten Materialien und Geräte).

Methode	Anzahl Proben (Pulver / Obj.)	Durchschnittl. Testdauer (Tage)	Probens-tabilität (Note 1 – 6)	Folienempfindlichkeit (Note 1 – 6)	Verpackungsdauer (Obj. / Grab / Gr.feld) (Note 1 – 6)	Materi-alkosten (inkl. MwSt.) (Obj. / Grab / Gr.feld) (€)	Anschaffungs-kosten für Ge-rät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	Bedenkenswertes Fol-geaufwand in Stich-punkten
ESCAL™ + Silicagel	3 / 3	119 / 993	1,17 / 1	3,5	2/2/2	ab 2,20 / 9,51 / 2376,87	Zangen-schweißgerät: ab ca. 878 €	Silicagelwechsel nach ca. 4-6 Jahren; stichprobenartige Kontrollen; erneutes Verpacken nötig;
Alu- ESCAL™ + Silicagel	-- / 5	-- / 924	-- / 1,5	4,5	2/2/2	ab 2,40 / 12 / 3000		
ESCAL™ + O ₂ -Abs.	3 / 5	643 / 287,2	1 / 1,2	3,5	2/2/2	ab 3,74 / 15,08 / 3239,37	Kammer-schweißgerät (hier: Sonderanfertigung für BLfD): ca. 8500 €	stichprobenartige Kontrollen; erneutes Verpacken + Absorberwechsel nötig;
Alu-ESCAL™ + O ₂ -Abs.	-- / 5	-- / 289	-- / 1,2	4,5	2/2/2	ab 3,94 / 19,70 / 4924		
ESCAL™ + N ₂	3 / 3	741 / 858,67	1,67 / 1,33	3,5	3/4/3	ab 1,82 / 8,18 / 2044,68	N ₂ -Flasche Miete: ca. 80 € / Jahr, Füllung: ca. 150 €	Gasflaschen: Evt. Miete, evt. TÜV, Bestimmungen für Flaschenstandort; Kammergerät: jährliche Wartung, Stromkosten; stichprobenartige Kontrollen; erneutes Verpacken nötig;
Alu-ESCAL™ + N ₂	3 / 3	741 / 861	1,33 / 1,83	4,5	3/3/3	ab 2,02 / 10,12 / 2530,47		
ESCAL™ + Ar	-- / 7	-- / 976,57	-- / 1,36	3,5	3/4/4	ab 1,83 / 8,21 / 2050,53	Zangen-schweißgerät: ab ca. 878 €; Kammer-schweißgerät (s.o.): ca. 8500 €	stichprobenartige Kontrollen; erneutes Verpacken nötig;
ESCAL™ + Ar + Erde	-- / 5	-- / 979	-- / 1	3,5	4/4/4	ab 1,83 / 8,21 / 2050,53		
ESCAL™ + Vakuum	3 / 1	537,33 / 983	2 / 1	3,5	3/4/4	ab 1,80 / 8,11 / 2026,87	Vakuum-schweißgerät: ab ca. 260 €	stichprobenartige Kontrollen; erneutes Verpacken nötig;
Alu-ESCAL™ + Vakuum	-- / 5	-- / 925	-- / 1,1	4,5	3/4/3	ab 2 / 10 / 2500		
Stickstoffvitri-nensystem	3 / 16	477 / 553,94	1,5 / 1,16	n.n.	6/4/1	ab 0,04 / 0,11 / 27,50	Stickstoffvitri-nensystem der Fa. Jordan: ca. 40000 €	Stromverbrauch: ca. 10 kWh / Tag; Wartungskosten, TÜV
Raumentfeuchtung	n.n.	n.n.	-- / 2	n.n.	1/1/1	ab 0,04 / 0,11 / 27,50	z.B. Defensor OD 125-TH : 698,53 € (<550 m ³)	Wartung, Stromkosten; stichprobenartige Kontrollen;

Tabelle 21: Übersicht der Lagermethoden mit bis zu Note 2 in der Kategorie "Probenstabilität".

3.4.8 Diskussion

Wie zu erwarten war, gibt es keine Nonplusultra-Lösung. Verschiedene Methoden drängen sich eher in den Vordergrund und andere erweisen sich definitiv als ungeeignet. Doch die für einen selbst als geeignet erscheinende Lösung kann immer nur individuell gewählt werden, wobei sorgfältig zwischen Vor- und Nachteilen und den gegebenen Möglichkeiten abgewogen werden muss.

Einige Punkte, die in die Überlegung mit einbezogen werden sollten, sollen hier kurz aufgegriffen werden.

Ausgangspunkt der Überlegungen muss natürlich das Ziel sein – sollen die Objekte auf einer Grabung nur bis zur Einlieferung in die Restaurierungslabors geschützt werden oder handelt es sich um das ‚endgültige‘ Bereitmachen zur Depotlagerung, wo sie die nächsten Jahrzehnte verbringen sollen. Besonders in letzterem Fall dürfen also nicht nur die kurzfristig notwendigen Arbeitsmaßnahmen in die Überlegungen mit einbezogen werden, sondern auch zukünftige Arbeitsschritte wie z.B. ein erneutes Verpacken. Während dies bei kleinen Fundmengen bewältigbar erscheint, ist dies im Falle von großen Depots wie dem der ASM schon fast ein Ausschlusskriterium. Hier kommen fast nur großräumige Lösungen in Frage wie die Raumentfeuchtung, die jedoch realistisch betrachtet nicht ganz so effektiv ist.

Andererseits mag der Arbeitsaufwand bei den Objektverpackungen zwar generell sehr hoch erscheinen. Doch stellt sich die Frage, ob dies nicht in Kauf genommen werden sollte, um die Funde zumindest für die nächsten ca. 10 Jahre auf jeden Fall stabil zu halten. Danach stünden vielleicht neue Methoden zur Verfügung, die einfacher sind, oder die Objekte können in dieser Zeit entsalzt werden, wodurch sie klimatisch unempfindlicher und eine höhere Luftfeuchte von ca. 30 % rH vermutlich besser vertragen werden.

So wäre auch eine zweigleisige Lösung mit Funden, die bis zu einer Entsalzung verpackt bleiben, eine Überlegung wert.

Bei Grabungen sollte schon im Vorfeld klar sein, wie mit empfindlichen Funden verfahren wird. Generell sollten die (Eisen-)Funde so schnell wie möglich professionell – also über das PE-Tütchen hinaus – versorgt werden. In Frage kommen eine möglichst baldige Einlieferung in besser klimatisierte Räume wie ein Trockendepot oder in das Restaurierungslabor, wo dann die entsprechend gewählte Versorgung vorgenommen wird, oder eine Bearbeitung vor Ort. Hierfür bieten sich am ehesten transportable Lösungen wie eben Folienverpackungen an. Auch die Lagerung in Plastikboxen mit einem Trockenmittel wäre eine Option (wurde in diesem Projekt jedoch nicht getestet).³¹

Welche Lösung auch immer gewählt wird, sie erfordert Planung und sollte schon bei den Vorüberlegungen für Grabungen mit in die Budget-, Zeit- und Personalplanung einberechnet werden. Hierfür muss als weitergehendes Ziel aber auch das Bewusstsein für die Notwendigkeit solcher Maßnahmen bei den Grabungsplanern, -geldgebern und letztendlich auch -personal, das die Maßnahmen entsprechend umsetzen soll, geschaffen werden.

³¹ s. z.B. Guggenheimer, 2006

3.4.9 Bezugsquellen für die genannten Materialien und Geräte

Bezugsquelle	Gerät / Material
Abby's Neoplast Singener Str. 46b 78256 Steißlingen www.neoplast.de	- LDPE-Druckverschlussbeutel, 50µ, transparent
Carl Roth GmbH + Co. KG Schoemperlenstr. 3-5 76185 Karlsruhe www.carlroth.de	- Eisen ≥99,5 %, p.a., pulv., ca. 10 µm Korngröße
dm-folien GmbH Hans-Böckler-Straße 21 72770 Reutlingen www.dm-folien.com www.dm-folien-shop.de	- LDPE-Druckverschlussbeutel, 90µ, transparent
European Tech Serv NV (ETS) Essenlaan 7 9130 Kieldrecht Belgien	- Non-invasives Sauerstoffmessgerät OxySense 210T
Helmut Boss Verpackungsmaschinen KG Zum Wingert 5 61352 Bad Homburg www.vacuum-boss.com	- Kammerschweißgerät mit Rückbegasungsfunktion: Titan 1300 (Sonderanfertigung für BLfD - 145 x 115 x 97 cm)
Hilab.de Speditionstr. 21 D-40211 Düsseldorf hilab.de	- Tiefkühltruhe GFL 6343
ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG Robert-Bosch-Strasse 10 74081 Heilbronn www.illig.de	- Skin-Maschine für ca. 70 x 45 cm-Verpackungen
Jordan Ventil Fitting Rohr GmbH + Co. KG Josef-Ruhr-Str. 30 53879 Euskirchen www.vfr-jordan.de	- Stickstoffvitrinensystem an der ASM (2 Acrylglasvitrinen 60 x 65 x 80 cm bzw. 120 x 65 x 80 cm, Sauerstoffmessgerät SGM7.1, Stickstoffgenerator Parker NitroFlow Basic LP Mobil, 2 Gasspeichertanks 90 Liter, Kontrollsystem, 2 Schwerlasttische)
Kartonveredlung KNAPP GmbH Dortmunderstrasse 6-12 68723 Schwetzingen knapp-gmbh.de	- Surlyn TM -Folie (Rolle 150 µ, B = 54 cm, L = 300 m) - POLYBOARD [®] Skinkarton "Neutral Weiß" ohne Druck, PE-beschichtet, 600 g, 70x45 cm
Linde AG Geschäftsbereich Linde Gas Seitnerstr. 70 82049 Pullach	- Stickstoff 5.0 - 20 l / 200 bar = 4 m ³ (inkl. Lieferung) – Gasflaschenfüllung: ca. 150 €, Miete: ca. 80 € / Jahr ³² - Argon - 20 l / 200 bar = 4 m ³ (inkl. Lieferung) – Gasflaschenfüllung: 199,21 €, Flaschenmiete: 47,60 € / Jahr (ASM-Rechnung von 2008)

³² Angaben von Thomas Stöckl, Restaurator am Bayrischen Landesamt für Denkmalpflege

<p>Long Life for Art Christoph Waller Hauptstraße 47 D-79356 Eichstetten www.cwaller.de</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Zangenschweißgerät: Impulsgeber Polystar 110 GE + Schweißzange Polystar 150 D - Vakuumschweißgerät LaVa V.100 - Raumentfeuchter: Defensor OD 125-TH (<i>Beispielgerät</i>) - ESCAL™-Schlauchware, Breite 24 cm - Flachbeutel aus einseitig ESCAL™ und einseitig Aluverbundfolie A 30T - Sauerstoffabsorber RP-3A - Silicagelbeutel 60g, ca. 110 x 80 mm, Hüllstoff: Vlies, nicht regenerierbar (für Preisberechnung) - Silicagel Chamaeleon, Körnung 2 – 5 mm, brockige Form (Projektarbeit) - Silicagel orange, Körnung 2 - 5 mm, kugelige Form (Projektarbeit) - Feuchtigkeitsanzeigerstreifen (Farbumschlag von rosa nach blau bei 8% rF)
<p>Sigma-Aldrich Chemie GmbH Eschenstrasse 5 82024 Taufkirchen bei München www.sigmaaldrich.com/germany.html</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Iron(II)-chloride tetrahydrate – puriss. p.a., ≥99.0% (RT) - (Iron – puriss. p.a., carbonyl-Iron powder, low in magnesium and manganese compounds, ≥99.5% (RT), ca. 6-9 µm)
<p>Vakuumtuete.de Auerstr. 2 D - 37269 Eschwege www.vakuumtuete.de</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Vakuumbbeutel mit eingepprägter Struktur bzw. „UNSERE BESTEN“
<p>VWR International GmbH Lise-Meitner-Str. 1 85737 Ismaning www.vwr.de</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Liebherr ATEX-zertifizierter KÜhlschrank ohne Umluft, FKEX 1800 MediLine, 180 l

3.5 Entsalzung

Bei der Entsalzung sollen die während der Bodenlagerung in das Objekt hinein diffundierten Salze soweit wie möglich entfernt werden, um die Wahrscheinlichkeit des Entstehens aggressiver Korrosion – meist in Form von chloridhaltigem Akaganeit – herabzusetzen (s. 3.1 Die Problematik). Entsalzte Objekte gelten als weniger empfindlich gegenüber ungünstigen klimatischen Bedingungen und würden z.B. eine Luftfeuchte von ca. 30 % vermutlich besser vertragen als „versalzene“ Objekte.³³ Dennoch sollte auch bei der anschließenden Lagerung für einen weiteren Schutz (z.B. durch einen Überzug oder eben kontrolliertes Klima) gesorgt sein.

Chloridionen, die noch nicht im Eisenmineral Akaganeit gebunden sind, sind noch recht leicht und schnell aus einem Objekt zu entfernen. Dies wäre z.B. bei frisch geborgenen Funden der Fall, da sich das Akaganeit erst bei Kontakt mit der Luft anfängt zu bilden. Würden Objekte also direkt nach Entnahme aus dem Boden sauerstofffrei oder trocken gelagert werden, wäre eine spätere Entsalzung einfacher und schneller zu handhaben.³⁴

Da dies in der Realität jedoch höchst selten umgesetzt wird, wurden verschiedene meist aufwändige und langwierige Verfahren entwickelt, um dem Akaganeit zu Leibe zu rücken.

Aufgrund der nur eingeschränkten Eignung für Massenfunde (s. 3.4 Lagerung) beschäftigte sich das Projekt eher am Rande mit der Entsalzung. Darum soll im folgenden Text hier der Schwerpunkt meist auf eine kurze Methodenbeschreibung und – soweit möglich – eine Kosten- und Zeitgegenüberstellung gelegt werden, jedoch keine tiefergehende Evaluierung.

Auswertungskriterien	Bewertungseinheit
Zustand der Objekte nach Ende des Testdauer im Vgl. zu nach der Entsalzung*	Note 1 – 6 (1 = keine Veränderungen, 6 = stark geschädigt)
Durchschnittliche Dauer einer Entsalzungsbehandlung (an einem Objekt)	Tage / Wochen / Monate
benötigte Menge an Verbrauchsmaterialien / Chemikalien (1l bzw. Durchgang / 1 Gräberfeld = 7500 l bzw. 250 Durchgänge)	Gramm / Liter
Preis für benötigte Verbrauchsmaterialien / Chemikalien (1l bzw. Durchgang / 1 Gräberfeld = 7500 l bzw. 250 Durchgänge) (inkl. 19 % MwSt.)	€
Arbeitszeitaufwand (1l bzw. Durchgang / 1 Gräberfeld = 7500 l bzw. 250 Durchgänge)	Note 1 – 6 (1 = sehr schnell, 6 = sehr zeitaufwändig)
erforderliches Gerät	
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.)	€
Bedenkenswerter Folgeaufwand	

Tabelle 22: Auswertungsschema der Entsalzungsmethoden.

* nur bei den Hitzeverfahren

Für die Zeit- und Materialberechnung wurde ein Objekt, ein 1 l-Bad bzw. 1 Erhitzungsdurchgang und ein Gräberfeld mit 250 Gräbern à fünf Eisenobjekte zugrunde gelegt. Die fünf Objekte sollten dabei – analog zu den Lagermethoden (s. 3.4.1 Die Vorgehensweise im Projekt und bei der Auswertung) – zweimal etwas unter 20 x 30 cm und dreimal etwas unter 10 x 15 cm groß sein. Für diese fünf Objek-

³³ Greiff & Bach, 2000

³⁴ Greiff & Bach, 2000

te wurden bei der Berechnung jeweils 10 l Entsalzungsbad bzw. eine Ofenladung angenommen. Dies würde für ein Gräberfeld bei vier Baddurchgängen 10.000 l oder 250 Ofenladungen bedeuten. Bei der subkritischen Entsalzung waren zum Zeitpunkt des Erstellens des Berichts noch keine Angaben zum Material und Zeitaufwand vorhanden, so dass sie hier leider nur unvollständig aufgeführt werden können.

Wie bei den Lagermethoden sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass das „Berechnungs-Gräberfeld“ mit einem aus der Realität vermutlich eher wenig zu tun hat und die Arbeitszeit zu stark von individuellen Gegebenheiten vor Ort abhängt, um hier allgemeingültig wiedergegeben zu werden. Daher sind Werte wie Materialverbrauch, -kosten und Arbeitszeit als reine Vergleichswerte anzusehen.

3.5.1 Badentsalzung



Abb. 29: Ein Entsalzungsbad an der ASM.

Bei den Badverfahren werden die zu entsalzenden Objekten in mehreren aufeinander folgenden Bädern behandelt. Die Chloride diffundieren dabei in die Badflüssigkeit, was umso schneller geht, je größer der Konzentrationsunterschied zwischen Objektinnerem und der umgebenden Lösung ist. Durch Badwechsel muss also dafür gesorgt werden, dass der Unterschied groß genug bleibt. Generell ist eine Behandlungsdauer von mindestens drei bis vier Monaten anzusetzen, oft auch länger.

Den gängigen Badverfahren ist gemeinsam, dass meist ein hoher pH-Wert erzeugt wird, da dies das Eisen passiviert und die Benetzungsfähigkeit der Lösung heraufsetzt.³⁵ Die Lauge löst außerdem die Chloride aus dem Akganeit heraus.

Eine erhöhte Temperatur von etwa 50 – 60 °C beschleunigt den Vorgang und dürfte gleichzeitig aufgrund der erhöhten Molekularbewegung eine Badumwälzung überflüssig machen.³⁶

Objekte sollten mindestens nach Fundort getrennt entsalzt werden. Doch je kleiner die Wanne, desto besser ist die Kontrollmöglichkeit während der Behandlung. Dies bedeutet jedoch wiederum, dass v.a. bei größeren Komplexen wie einem Gräberfeld nicht nur ein hoher Arbeitsaufwand sondern auch ein großer Platzbedarf entsteht.

3.5.1.1 Natriumsulfitentsalzung

Am gängigsten ist in Deutschland wohl die Natriumsulfitentsalzung, ein Badverfahren, bei dem das Objekt in eine Lösung aus Natronlauge und Natriumsulfit eingelegt wird. Ihr Entsalzungserfolg liegt zwar nicht bei 100 %, doch ist sie durchaus eine der effektivsten Methoden, v.a. dann, wenn ein tiefereingehender Eingriff in das Objekt wie z.B. ein Verändern des Metallgefüges vermieden werden soll.

³⁵ Greiff & Bach, 2000

³⁶ Schmidt-Ott & Oswald, 2006

Während die Natronlauge in der oben beschriebenen Weise zum Tragen kommt, erfüllt das Sulfid bei der Methode die Aufgabe, den ins Bad diffundierenden Luftsauerstoff abzufangen und so weitere Korrosion zu unterbinden. Gleichzeitig wird verhindert, dass Fe^{3+} -Salze entstehen, die Kapillaren u. a. Austrittswege der Chloride aus dem Objekt verstopfen und somit die Entsalzung behindern könnten.³⁷

Die an der ASM praktizierte Natriumsulfitentzalung stützt sich hauptsächlich auf das bei Schmidt-Ott & Oswald, 2006 beschriebene Verfahren. Daher werden beim Kostenüberschlag die entsprechenden Werte zugrunde gelegt.³⁸

Auswertungskriterien	Natriumsulfid - Badentsalzung
Durchschnittliche Dauer einer Entsalzungsbehandlung	4 Bäder à 3 – 4 Wochen
benötigte Menge an Verbrauchsmaterialien / Chemikalien (1l / 1 Gräberfeld = 10.000 l) (g / l)	Natriumhydroxid (NaOH): 4 g / 40 kg Natriumsulfid (Na_2SO_3): 6,3 g / 63 kg Entmineralisiertes Wasser: 1 l / 10.000 l Salzsäure (HCl): ca. 0,01 l / 100 l Calciumchlorid ($\text{CaCl}_2 \times 2 \text{H}_2\text{O}$): ca. 10 g / 100 kg Bariumhydroxid ($\text{Ba}(\text{OH})_2 \times 8 \text{H}_2\text{O}$): je nach Objektgröße evt. Lochfolie; Silbernitrat (AgNO_3)
Preis für benötigte Verbrauchsmaterialien / Chemikalien (1l / 1 Gräberfeld = 10.000 l) (inkl. 19 % MwSt.) (€)	NaOH: 0,07 € / 672,08 € Na_2SO_3 : 0,12 € / 1.187,42 € Entmineralisiertes Wasser: ca. 1 € / 10.000 € (oder aus Aufbereitungsanlage) HCl: ca. 0,03 € / 268,90 € $\text{CaCl}_2 \times 2 \text{H}_2\text{O}$: ca. 0,11 € / 1.956,40 € $\text{Ba}(\text{OH})_2 \times 8 \text{H}_2\text{O}$: 54,50 €/kg
Arbeitszeitaufwand (1l / 1 Gräberfeld = 1250 Objekte / 10.000 l) (Bad ansetzen, 3 Badwechsel inkl. Neutralisieren, in VE-Wasser auswaschen + Sulfite aus dem Objekt entfernen, Objekte trocknen)	4 – 5 / 4 – 5
erforderliches Gerät	Bainmarie o.ä., (Gastro-)Wannen, Magnetrührer + Rührstäbchen, Waage (2 Kommastellen); Evt.: Titriergerät o.ä., Pipette
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	Bainmarie-Wagen: 1662,03 €; Gastronormbehälter (Gr. 1/3, Tiefe 150 mm): ab 13,67 €; Gastronormdeckel (Gr. 1/3): ab 4,68 €;
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	Stromkosten, zusätzlicher Wasserverbrauch, evt. (Chemikalien-)Entsorgung

Tabelle 23: Übersichtstabelle zur Natriumsulfitentzalung.

3.5.1.2 Natronlauge

Statt der Sulfid-Laugen-Mischung kommt mitunter auch ein reines Natronlaugenbad zum Einsatz. Dabei wird der Sauerstoff auf eine andere Weise vom Bad ferngehalten, z.B. durch Bedecken der Badoberfläche mit einem schweren und reaktionsträgen Gas wie Stickstoff oder Vakuumieren der Behäl-

³⁷ Greiff & Bach, 2000

³⁸ Eine Badkonzentration von 6,3 g Na_2SO_3 und 4 g NaOH pro Liter und Badwechsel alle 3 Wochen.

ter. Der Vorteil gegenüber der alkalischen Sulfitentsalzung ist, dass keine Nachbehandlung zum Neutralisieren des Sulfits notwendig wird und keine Sulfate im Objekte verbleiben können.



Abb. 30: Vakuumierbarer Gastronormbehälter der Fa. LaVa.

Die Vorgehensweise und Zeitaufwand entsprechen weitgehend der Sulfitentsalzung.

Ein direkter Vergleich der Natronlaugen- und Natriumsulfit-Entsalzung in Bezug auf ihre Effektivität findet sich u.a. bei Al-Zahrani, 1999.

In der ASM werden zum Fernhalten des Sauerstoffes vakuumierbare Gastronormbehälter verwendet, daher werden diese auch als Berechnungsgrundlage benutzt.

Auswertungskriterien	Natronlauge - Badentsalzung
Durchschnittliche Dauer der Entsalzungsbehandlung	4 Bäder à 3 – 4 Wochen
benötigte Menge an Verbrauchsmaterialien / Chemikalien (1l / 1 Gräberfeld = 10.000 l) (g / l)	Natriumhydroxid (NaOH): 4 g / 40 kg Entmineralisiertes Wasser: 1 l / 10.000 l Salzsäure (HCl): ca. 0,01 l / 100 l
Preis für benötigte Verbrauchsmaterialien / Chemikalien (1l / 1 Gräberfeld = 10.000 l) (inkl. 19 % MwSt.) (€)	NaOH: 0,07 € / 672,08 € Entmineralisiertes Wasser: ca. 1 € / 10.000 € (oder aus Aufbereitungsanlage) HCl: ca. 0,03 € / 268,90 €
Arbeitszeitaufwand (1l / 1 Gräberfeld = 10.000 l) (Bad ansetzen, 3 Badwechsel inkl. Neutralisieren, in VE-Wasser auswaschen, Objekte trocknen)	4 – 5 / 4 – 5
erforderliches Gerät	Bainmarie o.ä., z.B. Vakuum-Gastronormbehälter, Magnetrührer + Rührstäbchen, Waage (2 Kommastellen); Vakuumschweißgerät Evt.: Titriergerät o.ä., Pipette
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	Bainmarie-Wagen: 1662,03 €; Vakuum-Gastronormbehälter: ab 132,50 € (Gr. 1/3, Tiefe 150 mm); Vakuumschweißgerät: ab ca. 260 €;
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	Stromkosten, zusätzlicher Wasserverbrauch, evt. (Chemikalien-)Entsorgung

Tabelle 24: Übersichtstabelle zur Natronlaugenentsalzung.

3.5.2 Subkritische Entsalzung



Abb. 31: Subkritischer Entsalzungsreaktor im Clemson Conservation Center.

In Clemson, South Carolina, USA wird seit 2003 an der Entwicklung der Entsalzung in subkritischer Flüssigkeit gearbeitet. Der Mitentwickler Nelson Gonzalez schickte Mitte 2011 eine treffende Beschreibung der Methode, die hier – aus dem Englischen übersetzt – übernommen werden soll:

“Diese Methode kombiniert einen sehr hohen Druck (40 bar) mit recht hohen Temperaturen (180 °C) und dem Umspülen des Objektes mit Natronlauge (0,5 Gew.%), um archäologische Eisenobjekte zu stabilisieren. Druck und Temperatur bringen die Flüssigkeit in

sogenannte subkritische Bereiche, so dass sie trotz der hohen Temperaturen flüssig bleibt. Dadurch beginnen sich Eigenschaften wie Eindringverhalten zu verändern, so dass die tiefer liegenden Bereiche mit den höheren Chloridkonzentrationen besser erreicht werden können. Die Temperatur von 180 °C reduziert außerdem die Korrosionsprodukte in stabilere Verbindungen und erleichtert so zusätzlich das Freisetzen der Chloride. Die Behandlung mit diesem Verfahren ist normalerweise bereits nach wenigen Tagen abgeschlossen, so dass sie deutlich schneller als andere Methoden zur Eisenkonservierung ist. Obwohl die Reaktoren, die benötigt werden, um subkritische Bedingungen herzustellen, vergleichsweise einfach sind, sind ihre Anschaffungs- und Herstellungskosten doch ein Nachteil. So sind ist der Preis z.B. für einen kleinen 1-l-Reaktor bei etwa 10.000 US\$ und für einen 40-l-Reaktor bei etwa 150.000 US\$ anzusetzen. Es ist jedoch zu erwarten, dass sich die Baukosten für ein solches System mit Fortschreiten der Forschung deutlich absenken werden, so dass sie auch für Restaurierungslaboratorien, die nicht im Forschungsbereich tätig sind, erschwinglich werden.“³⁹

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Objekte (ein Messer aus Steinheim und eine Fibel aus Manching) nach Clemson zur Entsalzung geschickt. Bei beiden konnte die Behandlung innerhalb weniger Tage abgeschlossen werden, sie zeigten anschließend auch in der Feuchtkammer keinerlei weitere Reaktionen.



Abb. 32: Subkritisch (li.) und in Natriumsulfit (re.) entsalztes Objekt.

³⁹ Gonzalez, 2011 – Übersetzung des Originaltextes

Auffallend ist bei subkritisch behandelten Objekten jedoch die Oberfläche, die im Unterschied zu badentsalzten Objekten mit einer dünnen roten pudrigen Schicht bedeckt ist. Dabei handelt es sich um Hämatit. Ein probeweises Freilegen einer Objektoberfläche zeigte jedoch, dass nach dem Freilegen kein großer Unterschied zu herkömmlich behandelten Objekten zu erwarten ist. Organische Auflagerungen überstehen allerdings eine subkritische Behandlung nicht.

Auswertungskriterien	Subkritische Entsalzung
Durchschnittliche Dauer der Entsalzungsbehandlung	Je nach Objekt: Einige Tage bis 1-2 Wochen
benötigte Menge an Verbrauchsmaterialien / Chemikalien (1l / 1 Gräberfeld = ?? l) (g / l)	??
Preis für benötigte Verbrauchsmaterialien / Chemikalien (1l / 1 Gräberfeld = ?? l) (inkl. 19 % MwSt.) (€)	??
Arbeitszeitaufwand (1l / 1 Gräberfeld = ?? l) (Vordokumentation, Nachspülen, Objekte trocknen (?))	??
erforderliches Geräts	„Reaktor“; + ??
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	„Reaktor“ ab ca. 10.000 US\$; + ??
Bedenkenswerter Folgeaufwand	Stromkosten, Wasserverbrauch, (Chemikalien-)Entsorgung, + ??

Tabelle 25: Übersichtstabelle zur subkritischen Entsalzung.⁴⁰

3.5.3 Hitzeverfahren

Hitzebehandlungen mit oder ohne reduzierende Gasatmosphäre sollen das Akaganeit in ein stabileres Eisenmineral umwandeln. Dabei sind Temperaturen von 200°C und mehr erforderlich. Ab etwa 150 °C sind jedoch Veränderungen im Metallgefüge zu erwarten⁴¹, wodurch z.B. Informationen zu Herstellungstechniken verloren gehen können. Auch organische Auflagen überstehen den Erhitzungsvorgang nur schlecht. Aus diesen Gründen werden solche Verfahren heutzutage nur selten angewandt.

Ihr Vorteil ist allerdings die kurze Dauer – eine Hitzebehandlung wäre nach etwa einem Tag abgeschlossen und der geringe Aufwand. Dadurch wäre sie für Massenfunde eher geeignet als die Badentsalzung. Daher wurden im Rahmen des Projektes einige Tests im niedrigeren Temperaturbereich durchgeführt.

3.5.3.1 Ofenbehandlung

Akaganeit ist nicht hitzeresistent, weswegen in der Theorie ein Entsalzungseffekt durch eine Ofenbehandlung möglich sein sollte.

Im Rahmen des Projektes wurden einige Pulverproben aus Akaganeitpulver und Objekte bei 180 °C, 200 °C und 300 °C bei normaler Raumluft erhitzt.

⁴⁰ Zum Zeitpunkt der Berichtsabgabe lagen leider noch keine Auskünfte zu Materialverbrauch, Arbeitszeit und etwaigem weiteren Gerät vor. Die Informationen werden auf der Projektwebseite nachgeliefert, sobald sie da sind.

⁴¹ Scott & Eggert, 2009, S. 3

Auswertungskriterien – Ofenbehandlung	180 °C	200 °C	300 °C
Zustand der Objekte nach Ende des Testdauer im Vgl. zu nach der Entsalzung (Note 1 – 6)	3-4	3-4	4
Durchschnittliche Dauer der Entsalzungsbehandlung	5 – 20 Stunden		
benötigte Menge an Verbrauchsmaterialien / Chemikalien (1 Durchgang / 1 Gräberfeld = 250 Durchgänge) (g / l)	n.n.		
Preis für benötigte Verbrauchsmaterialien / Chemikalien (1 Durchgang / 1 Gräberfeld = 250 Durchgänge) (inkl. 19 % MwSt.) (€)	n.n.		
Arbeitszeitaufwand (1 Durchgang / 1 Gräberfeld = 250 Durchgänge) (in Ofen legen, entnehmen)	1 / 1		
erforderliches Gerät	Ofen mit Temperaturen bis 200 - 300 °C		
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	Ofen (Venticell 111 – bis 250 °C): 1.864,78 €		
Bedenkenswerter Folgeaufwand	Stromverbrauch		

Tabelle 26: Übersichtstabelle zur Entsalzung durch Ofenbehandlung.

Tatsächlich zeigte sich bei den Pulverproben eine graduelle Reduzierung des Chloridgehaltes und Umwandlung in stabilen Hämatit. So haben sich nach fünf Stunden bei 180 °C 13 % Hämatit und einige Zwischenprodukte gebildet, während bei 200 °C bereits 91 % Hämatit vorhanden waren. Bei 300 °C war die Umwandlung vollständig vollzogen.

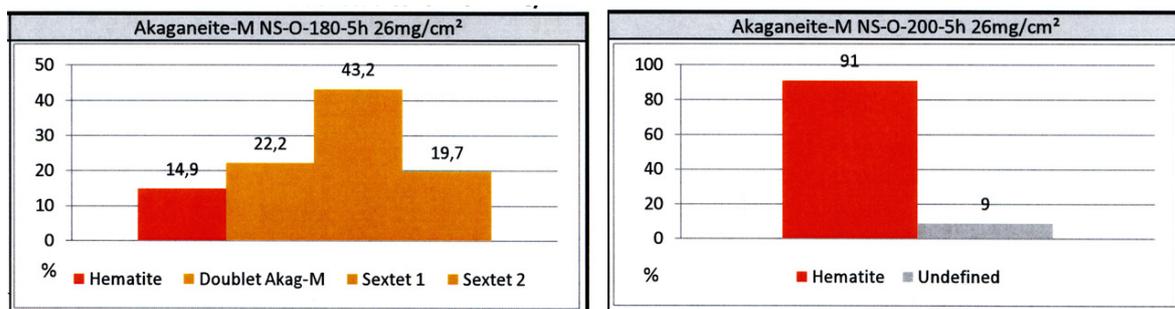


Abb. 33: Die vorläufige Mößbauer-Auswertung von jeweils 5 Stunden lang bei 180 °C (li.) bzw. 200 °C (re.) erhitzten Pulverproben. (Diagramme von U. Wagner / T. Demoulin)

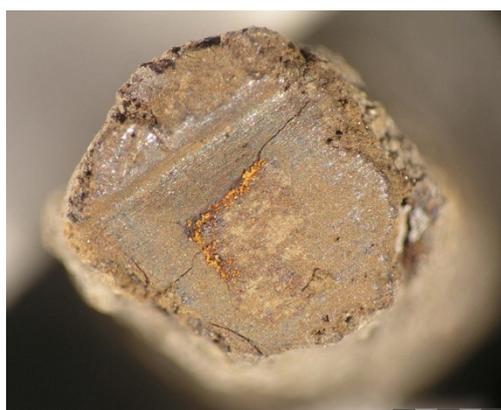


Abb. 34: 3,5 Monate nach einer fünfstündigen Hitzebehandlung bei 200 °C: Am Objekt (Fe-B-0427-6) haben sich Risse und Akaganeit-Ausblühungen gebildet.

Leider zeigte sich aber, dass das Verfahren bei Objekten auch bei einer längeren Erhitzungsdauer von bis zu 20 Stunden nicht zum gewünschten Erfolg führte. Bei den meisten erhitzten Objekten kam es unabhängig von der verwendeten Temperatur auch nach der Behandlung noch zu aktiver Korrosion und Akaganeit-Ausblühungen (bei Lagerung in unkontrolliertem Klima).

Höhere Temperaturen könnten einen größeren Entsalzungseffekt zeigen, würden aber mit Sicherheit Gefügeinformationen zerstören (s. 3.5.3 Hitzeverfahren).

Besonders bei ohnehin schon fragilen Objekten mit dünner Materialstärke war zudem nach der Behandlung bei 300 °C eine Versprödung der Korrosionsprodukte zu beobachten, so dass bei jedem Anfassen kleine Bröckchen abfielen. Dies könnte mit hitzebedingten Erweiterungen bereits bestehender (Mikro-)Risse zusammen hängen. Da sich diese Versprödung nicht auf Bereiche oberhalb der Originaloberfläche beschränkt, ist dadurch die Gefahr von objektschädigendem Materialverlust gegeben.



Abb. 35: Bei 300 °C erhitztes Objekt nach der Behandlung – die größeren Abplatzungen waren bereits vor dem Erhitzen abgefallen, doch die kleinen Splitter zeugen von der Versprödung der Korrosionsauflagen.

3.5.3.2 Gasreduktion



Abb. 36: Die Gasreduktionsanlage der Archäologischen Staatssammlung.



An der ASM wurde schon vor mehreren Jahren ein Prototyp einer Reduktionsanlage mit automatisierter Ablaufsteuerung installiert.

In ihm können Objekte unter Formiergasatmosphäre⁴² bei Temperaturen um 400 °C reduzierend behandelt werden. Dabei bewirkt der Wasserstoffanteil des Formiergases eine Umwandlung der meisten Korrosionsprodukte auf dem Objekt in schwarzes Magnetit, wodurch auch die Chloride entfernt werden. Der Vorgang dauert etwa einen Tag inkl. Abkühlen des Ofens.

Der Prozessablauf ist folgendermaßen: Nach dem Beladen des Reduktionsofens, wird der Innenraum zunächst evakuiert bis im Innern nur noch ein Druck von etwa 45 mbar herrscht. Um den Kontakt zwischen dem Formiergas und Sauerstoff zu vermeiden, wird der Restsauerstoff durch eine Flutung mit Stickstoff hinaus gedrückt. Erst danach erfolgt die Flutung mit Formiergas und das Hochheizen auf die gewünschte Temperatur. In diesem Zustand wird der Ofen meist zwischen 10 und 20 Stunden gehalten, bevor die Abkühlungsphase und eine zweite Flutung mit Stickstoff eingeleitet werden. Zur

⁴² In diesem Fall 5 % Wasserstoff mit 95 % Stickstoff.

Sicherheit wird der Ofen nochmals auf ca. 70 mbar evakuiert. Belüften und Öffnen erfolgen erst, wenn die Temperatur nur noch max. 100 °C beträgt.

Der Reduktionsvorgang benötigt eine Temperatur von etwa 400 °C – darunter wird die Reaktion nicht angestoßen und es erfolgt nur die normale Erhitzungsreaktion. Das Verfahren bedeutet also einen recht massiven Eingriff in das Metallgefüge.

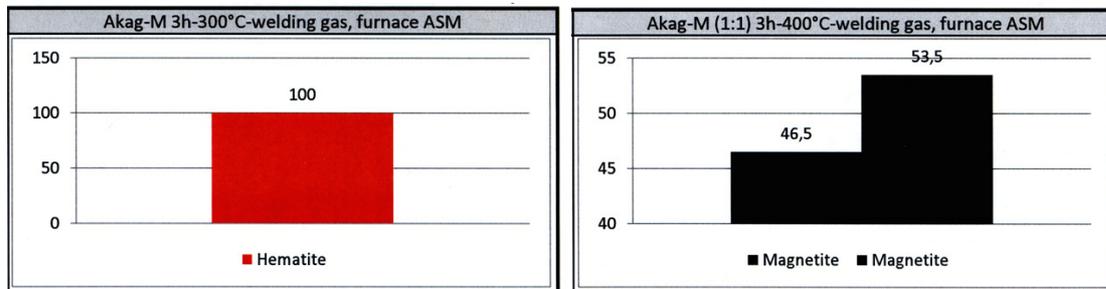


Abb. 37: Die vorläufigen Mößbauer-Ergebnisse einer bei 300 °C (li.) bzw. 400 °C (re.) gasreduzierten Akaganeitpulverprobe. (Diagramme von U. Wagner / T. Demoulin)



Abb. 38: Akaganeitpulver vor (li.) und nach einer Gasreduktion bei 300 °C (Mitte) bzw. 400 °C (re.).

Auswertungskriterien – Gasreduktion	300 °C	400 °C
Zustand der Objekte nach Ende des Testdauer im Vgl. zu nach der Entsalzung (Note 1 – 6)	4	4-5
Durchschnittliche Dauer der Entsalzungsbehandlung	Ca. 1 Tag	
benötigte Menge an Verbrauchsmaterialien / Chemikalien (1 Durchgang / 1 Gräberfeld = 250 Durchgänge) (g / l)	Stickstoff: 600 – 700 l / ca. 162.500 l Formiergas: 100 - 400 l / 25.000 – 100.000 l	
Preis für benötigte Verbrauchsmaterialien / Chemikalien (1 Durchgang / 1 Gräberfeld = 250 Durchgänge) (€)	Gasflasche Stickstoff 5.0 (50l) - Miete: ca. 165 € / Jahr, Füllung inkl. 16 % MwSt.: ca. 70 € Gasflasche Formiergas 90/10 (50 l) – Miete ca. 165 € / Jahr, Füllung inkl. 16 % MwSt.: ca. 106 € (Preise: Stand 2003)	
Arbeitszeitaufwand (1 Durchgang / 1 Gräberfeld = 250 Durchgänge) (Reduktionsofen befüllen, anfangs Ablauf weitertakten, Objekte entnehmen)	1 – 2 / 1 – 2	
erforderliches Gerät	Reduktionsanlage	
Anschaffungskosten für Gerät (inkl. 19 % MwSt.) (€)	Da der Ofen ein Prototyp war, der nach und nach entwickelt wurde, sind die Kosten für ein solches Gerät leider nicht nachvollziehbar.	
Bedenkenserwerter Folgeaufwand	Stromverbrauch, Flaschenmiete / TÜV	

Tabelle 27: Übersichtstabelle zur Entsalzung durch Gasreduktion.

Von den auf diese Weise behandelten Objekten zeigte allerdings etwa die Hälfte der Probeobjekte innerhalb weniger Monate wieder Ausblühungen (bei Lagerung in unkontrolliertem Klima). Zusätzlich war auch hier wie bei der Hitzebehandlung ohne Gas eine Versprödung zu beobachten.



Abb. 39: Messer aus Steinheim bei Dillingen (Bayern) vor, direkt nach und drei Monate nach der Entsalzung (von oben nach unten).

3.5.4 Zusammenfassung

Die Hitzeverfahren mögen zwar ungleich schneller als die bisher weit verbreitete Badentsalzung sein, doch scheinen sie nicht effizient genug. Die Gefügeveränderung und die teilweise Versprödung der Korrosionsauflagen bis teilweise unter die eigentliche Objektoberfläche sind zusätzliche Nachteile, die die Methoden nicht sehr empfehlenswert machen.

Das subkritische Verfahren bietet eine interessante Option für die Zukunft. Für den Moment jedoch scheinen die Kosten außer Reichweite für die meisten Institutionen. Eine Möglichkeit wäre ein Dienstleistungslabor, das sich nur auf diese Methode spezialisiert und auf Auftragsbasis für Museen und Landesämter entsalzen könnte. Doch bleibt immer zu beachten, dass Organik dieses Verfahren nicht überstehen wird. Das Verhalten fremdmetallischer Auflagen ist noch unbekannt.

So scheint für den Augenblick die Badentsalzung die einzige realistische Option für den alltäglichen Gebrauch darzustellen. Doch hier bleiben die lange Behandlungsdauer und der große Aufwand die entscheidenden Nachteile, wodurch sie nur eingeschränkt für Massenfunde geeignet sind.

3.5.5 Bezugsquellen für die genannten Materialien und Geräte

Bezugsquelle	Gerät / Material
Gastropolis24 GmbH Kettelerstraße 29 59759 Arnsberg www.gastropolis24.de	<ul style="list-style-type: none"> - Bainmarie Wagen 1365 - Gastronormbehälter GNF Edelstahl mit Fallgriffen - Gastronormdeckel GDF
Carl Roth GmbH + Co. KG Schoemperlenstr. 3-5 76185 Karlsruhe www.carlroth.de	<ul style="list-style-type: none"> - Natriumhydroxid (≥99 %, p.a., ISO, in Plätzchen – bis max. 0,005 % Cl) - Natriumsulfit (≥98 %, p.a., ACS, wasserfrei – bis max. 0,02 % Cl) - Salzsäure (≥30 %, techn. Qualität) - Calciumchlorid-Dihydrat (≥99 %, p.a., ACS - Düngemittelqualität) - Bariumhydroxid-Octahydrat (≥98 %, p.a., ISO – bis max. 0,002 % Cl)
Long Life for Art Christoph Waller Hauptstraße 47 D-79356 Eichstetten www.cwaller.de	<ul style="list-style-type: none"> - Vakuumschweißgerät LaVa V.100
neoLab Migge Laborbedarf-Vertriebs GmbH Rischerstr. 7-9 69123 Heidelberg www.myneolab.de	<ul style="list-style-type: none"> - Silbernitrat-Maßlösung 0,01 M (0,01 N Lösung)
Lava Vakuumverpackung Valentinstraße 35 - 1 D - 88348 Bad Saulgau / Lampertsweiler www.la-va.com	<ul style="list-style-type: none"> - Original Lava SB - Vakuum-Gastronormbehälter - (Vakuumschweißgerät LaVa V.100)
Linde AG Geschäftsbereich Linde Gas Seitnerstr. 70 82049 Pullach	<ul style="list-style-type: none"> - Stickstoff 5.0
Mercateo AG Postfach 1460 06354 Köthen www.mercateo.com	<ul style="list-style-type: none"> - Trockenschrank Venticell 111
Mettler Toledo Ockerweg 3 35396 Gießen	<ul style="list-style-type: none"> - Titriator T90 Excellence Line - Pipette - Waage
Thomas Lehmailr Schweißtechnischer Vertrieb Stuttgarter Str. 20 80807 München	<ul style="list-style-type: none"> - Formiergas 90/10

3.6 Allgemeine Zusammenfassung & Ausblick

Das Projekt „Massenfunde in archäologischen Sammlungen“ befasste sich schwerpunktmäßig mit Lager- und Verpackungsmethoden und nur am Rande mit der Entsalzung.

Die Methoden wurden an Objekten und Pulverindikatoren getestet und die Ergebnisse nach Auswertung zusammen mit einem Kosten- und Zeitvergleich präsentiert.

Im Entsalzungsbereich präsentierte sich keine wirkliche Alternative zu den Badverfahren. Die Hitzeverfahren zeigten sich bei den getesteten Temperaturen (≤ 400 °C) nicht effektiv genug und haben überdies den restaurierungsethischen Makel, dass sie trotzdem bereits das Metallgefüge und damit die Objektinformationen verändern. Die subkritische Methode ist zumindest derzeit noch zu teuer in der Anschaffung. Dennoch lohnt es sich sie weiter im Auge zu behalten.

Generell ist bei Massenfunden jedoch davon auszugehen, dass meist zunächst eine Lagerlösung im Vordergrund muss. Wenn ein umfangreiches Gräberfeld geborgen und in Restaurierungslabor oder Depot eingeliefert wird, ist es höchst unwahrscheinlich, dass sofort mit einer (Bad-)Entsalzung begonnen werden kann und selbst dann müssen die Funde, die nicht in Bearbeitung sind, zwischengelagert werden.

Sowohl in der Verpackungs- als auch in der sonstigen Lagertechnik ist – erwartungsgemäß – teuer, was gut ist (Stichpunkt ESCALTM-Folie oder Stickstoffvitriolen). Doch gibt es einige Kompromisslösungen, die sowohl bei den Ergebnissen als auch aufwand- und kostentechnisch meist im vertretbaren Rahmen lagen – wie die Raumentfeuchtung.

Genau dieses Beispiel zeigt auch eines der Hauptprobleme einer solchen Methodenbewertung: Sind die lokalen / individuellen Gegebenheiten ungünstig, wie z.B. bei einem zugigen Dachbodenraum, der als Depot dienen soll (Extrembeispiel), würde eine Raumentfeuchtung vermutlich aufgrund des ständigen Laufens der Maschinen die Kosten über den immensen Stromverbrauch in ungeahnte Höhen jagen.

Daher können die vorliegenden Daten nur als Entscheidungsgrundlage dienen, was am geeignetsten erscheint, muss jedoch auf Fallbasis beurteilt werden.

Die ASM hat sich aufgrund dieser Daten folgendes wirtschaftliches Konzept zurechtgelegt: Zur Lagerung von nicht-stabilisierten Objekten soll das Stickstoffvitriolensystem als zuverlässigste Lagervariante weiterentwickelt werden. Für stabilisierte Objekte werden weitere Räume mit konditioniertem Raumklima (Raumfeuchte < 30 % rH und $20 - 22$ °C) bereitgestellt. Zur Vermeidung von kurzzeitigen Schwankungen am Objekt und mechanischen Beschädigungen werden hierzu die Funde im sogenannten Skin-Verfahren eingeschweißt.

Zu guter Letzt sollen hier noch einige Punkte aufgegriffen werden, die im Verlaufe des Projektes auftauchten und bei denen sich weitere und tiefere Forschung lohnen könnte.

Bemerkenswert war das Ergebnis, dass der Sauerstoff in hochdichten Verpackungen ebenfalls nach einiger Zeit auf 0 % sank. Zudem zeigten die so verpackten Pulverindikatoren ein irreguläres Verhalten, indem sie zunächst (normal) rotbraun, anschließend aber dunkelanthrazitgrau wurden. Interessant wären hier Antworten auf Fragen wie z.B.:

Was ist bei den Pulverindikatoren statt des oder gar aus dem Akaganeit entstanden?

Wie weit schreitet die Korrosion durchschnittlich bei einem so verpackten Objekt voran?

Wie viel Akaganeit entsteht dabei?

Wie lange bleibt der Sauerstoffgehalt in solchen Verpackungen bei 0 %?

Wäre dies also eine veritable Option für Grabungs- und Depotversorgung?

Verblüffend war außerdem das verzögerte Umwandlungsverhalten der eingeskinnten Pulverindikatoren. Da keine der Verpackungsbestandteile in irgendeiner Form klimatischen Schutz bieten kann und die Folie alleine in den Tests wesentlich schlechter abschnitt, ist das Phänomen rätselhaft.

Auch wenn die Methode dennoch nicht besonders gute Ergebnisse ablieferte, könnte eine Untersuchung der Gründe dafür eventuell Anregungen für weitere Konservierungsmöglichkeiten liefern.

Besonders für den Grabungsbereich wären weitere und v.a. günstigere Optionen im Folienbereich von Vorteil. Hier lohnt es sich besonders den Lebensmittelbereich zu verfolgen, da die Forschung dort sehr dynamisch ist. So gibt es mittlerweile sauerstoffabsorbierende oder feuchtigkeitsregulierende Folien. Sie könnten auf ihre Eignung für den restauratorischen Bereich hin untersucht werden.

Bei der Entsalzung sind die weiteren Ergebnisse der subkritischen Methode aus Clemson, USA mit Spannung zu erwarten. Da die ersten Forschungen hauptsächlich mit marinen Funden durchgeführt wurden, wären breit angelegte Studien mit Bodenfunden der nächste Schritt für die archäologische Restaurierung.

Es wäre sicher auch von Interesse, wenn ein zweites Institut z.B. in Europa die Methode aufgreifen würde, so dass an breiterer Front entwickelt werden könnte.

Eine weitere Optimierung der Badentsalzungsabläufe ist ein weiteres bearbeitungswürdiges Forschungsfeld. Hier ist vielleicht der Vergleich der alkalischen Sulfit- und reinen Natronlaugenentsalzung hervorzuheben, da sich bei gleicher Eignung durchaus ein Verzicht auf die Zugabe von Natriumsulfit positiv auf Arbeitszeit und Materialverbrauch auswirken würde.

Zum Schluss sei auch auf das Schwester-KUR-Projekt „Restaurierung und fachgerechte Unterbringung von Eisenfunden“, welches am Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt und am Landesmuseum für Vorgeschichte, Halle in Zusammenarbeit mit der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart durchgeführt wurde. Hier wurde u.a. eine neue Entsalzungsmethode entwickelt und erforscht.

3.7 Abbildungsnachweis Eisen

Alle Abbildungen und Fotos von C. Mazzola, ASM, außer anders angegeben.

3.8 Literaturverzeichnis Eisen

Al-Zahrani, A. A. (1999). *Chloride Ion Removal from Archaeological Iron and Beta-FeOOH - PhD-Thesis*. Cardiff: University of Wales.

Gonzalez, N. (3. November 2011). RE: text for exhibition booklet (Description of the subcritical method - Email an Cristina Mazzola).

Greiff, S., & Bach, D. (2000). Eisenkorrosion und Natriumsulfitentsalzung: Theorie und Praxis. *Arbeitsblätter für Restauratoren , Gruppe 1 - Eisen* (Heft 2), S. 319-339.

Guggenheimer, S. (2006). *Investigation into the potential of low-oxygen and dry/cold storage for freshly excavated iron artefacts (Thesis)*. La-Chaux-de-Fonds: School of the University of Applied Sciences Western Switzerland.

Hanselmann, R. (August 2008). *Ionomere (Römpf Online)*. Abgerufen am 14. März 2012 von Thieme Römpf Online: <http://www.roempp.com/prod/>

Höpfner, M. (1999). Passive Konservierung großer Mengen archäologischer Eisenfunde. *Arbeitsblätter für Restauratoren , Gruppe Magazinierung* (Heft 2), S. 77-82.

Kuhn, C., & Eggert, G. (2010). Freezing Corrosion – A Viable Storage Option? In G. Eggert, & B. Schmutzler (Hrsg.), *Archaeological Iron Conservation Colloquium 2010 - Extended Abstracts. Poster Session*. Stuttgart: Staatliche Akademie der Bildenden Künste.

Mathias, C., Ramsdale, K., & Nixon, D. (2004). Saving archaeological iron using the Revolutionary Preservation System. In J. & Ashton (Hrsg.), *METAL 04, Proceedings of the International Conference in Metals Conservation* (S. 28-42). Canberra, Australia: National Museum of Australia.

Motzenbäcker, B. (27. Februar 2012). Antwort-Email auf eine Anfrage an die Fa. Knapp zu den Materialien der Skin-Verpackung.

Paddenberg, D. (Februar/März 2009). Persönliches Gespräch über Einschweißen auf der Grabung auf dem Leisenhartfeld in Manching.

Schmidt-Ott, K. (23. April 2012). Antwortemail an Cristina Mazzola zum Thema "AW: sauerstofffreie Lagerung / ESCAL-Folie".

Schmidt-Ott, K., & Oswald, N. (2006). Neues zur Eisenentsalzung mit alkalischem Sulfit. *VDR Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut* (Heft 2), S. 126-134.

Scott, D. A., & Eggert, G. (2009). *Iron and Steel in art - Corrosion, Colorants, Conservation*. London: Archetype Publication Ltd.

Selwyn, L. (2004). Overview of archaeological iron: The corrosion problem, key factors affecting treatment and gaps in current knowledge. In J. Ashton, & D. Hallam (Hrsg.), *METAL 04, Proceedings of the International Conference in Metals Conservation* (S. 294-306). Canberra: National Museum of Australia.

Turgoose, S. (1982). Post-Excavation Changes in Iron Antiquities. *Studies in Conservation* (27), S. 97-101.

Waller, C. (2012). *Long Life for Art: Produkte > Sauerstoffabsorber > Sauerstoffabsorber RP-A*. Abgerufen am 17. April 2012 von Long Life for Art: <http://www.cwaller.de/deutsch.htm>

Waller, C. (2012). *Long Life for Art: Produkte > Sauerstoffabsorber > Sauerstoffindikatoren*. Abgerufen am 19. April 2012 von Long Life for Art: <http://www.cwaller.de/deutsch.htm>

Waller, C. (2012). *Long Life for Art: Produkte > Sperrschichtfolien*. Abgerufen am 17. April 2012 von Long Life for Art.

Waller, C. (2004-2009). *Sauerstoffarme Lagerung von Kunstwerken aus Metall und organischen Substanzen, giftfreie Schädlingsbekämpfung durch Sauerstoffentzug: Long Life for Art*. Abgerufen am 02. April 2012 von Long Life for Art: http://www.cwaller.de/fr_didaktik.htm --> Sauerstoffarme Lagerung

Wang, Q. (2007). Effect of relative humidity on the corrosion of iron: an experimental view. *The British Museum Technical Research Bulletin* , 1, S. 65-73.

Watkinson, D., & Lewis, M. (2004). SS Great Britain iron hull: Modelling corrosion to define storage relative humidity. In J. Ashton, & D. Hallam (Hrsg.), *METAL 04, Proceedings of the International Conference in Metals Conservation* (S. 88-102). Canberra: National Museum of Australia.

4. Holz

4.1 Die Problematik

Holz ist seit den frühesten Anfängen der menschlichen Entwicklung einer der wichtigsten Werkstoffe. Seine gute Verfügbarkeit, leichte Bearbeitbarkeit und vielseitigen Werkstoffeigenschaften bis hin zum Gebrauch als Energieträger wissen die Menschen bis in die heutige Zeit zu nutzen.

Warum aber sind nur wenige hölzerne Objekte in archäologischen Sammlungen zu finden? Das liegt an der schnellen Vergänglichkeit organischer Substanzen. Verrotten als Zerfallsprozess kennt man vom kompostieren oder brachliegenden Baumstämmen in unseren Wäldern. Neben tierischem Schädlingsbefall zersetzen hauptsächlich Mikroorganismen wie Pilze und Bakterien die chemischen Bestandteile des Holzes – Cellulose, Hemicellulose und Lignin.

Auf archäologischen Grabungen Mitteleuropas findet man daher meist nur noch größere Konstruktionshölzer als dunkle torfige Bodenverfärbungen. In permanent wassergesättigten und sauerstoffarmen Böden, wie z.B. Mooren, im Grundwasserbereich oder an Gewässerufeln, können Hölzer auch archäologisch relevante Zeiträume überdauern. Unter solchen Bedingungen werden die Cellulosen nur langsam von anaeroben Bakterien zersetzt und das Ligningerüst kaum geschädigt. Das Wasser füllt außerdem die geschädigten und geschwächten Zellen voll aus und hilft, sie so weiter in Form zu halten. Daher auch der Name archäologisches Nassholz, da das Holz komplett mit Wasser gesättigt ist. Stark abgebautes Holz kann äußerst weich sein, ähnlich wie ein vollgesogener Schwamm.

So hilfreich das Wasser für die Erhaltung ist, so problematisch ist aber auch seine schadensfreie Entfernung für eine Aufbewahrung der Hölzer unter raumklimatischen Bedingungen. Aufgrund seiner hohen Oberflächenspannung wirken beim Verdunsten Zugkräfte auf die geschwächten Zellen, die zu einem Kollaps führen können. In der Folge würden die Nasshölzer bei einem *unkontrollierten* Austrocknen übermäßig stark schrumpfen, reißen und sich verwerfen. Alle Informationen über Form, Bearbeitungsspuren oder Alter (Datierung über Dendrochronologie) wären somit unwiederbringlich verloren.

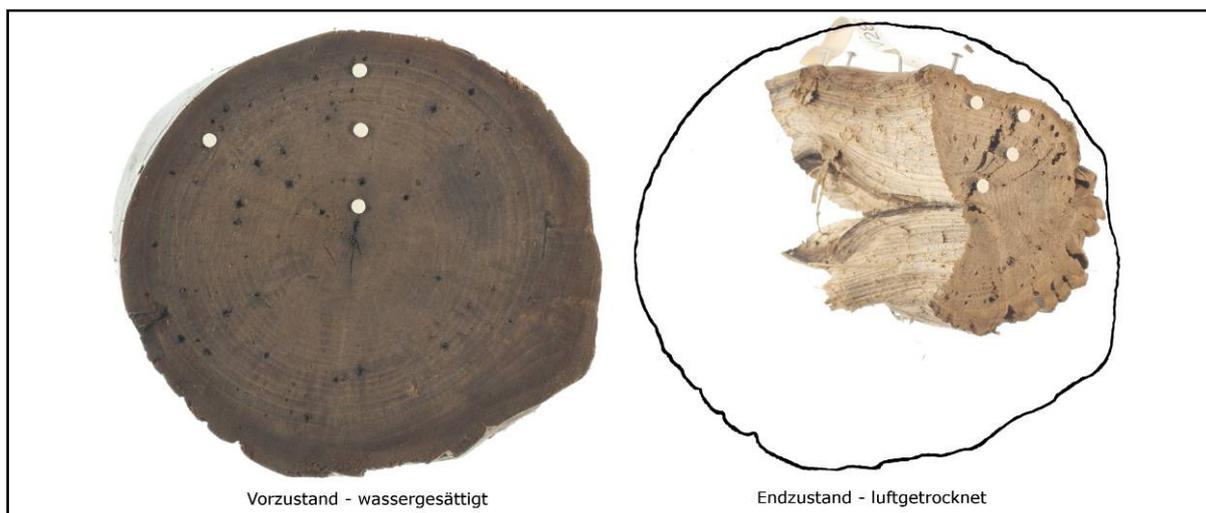


Abb. 40: Trocknungsschwund eines unkonservierten, neolithischen Eschepfahls (Wassergehalt 900%).

4.2 Lagerung

Mit der Freilegung bzw. Bergung archäologischer Nasshölzer muss also schon direkt die erste konservatorische Maßnahme eingeleitet werden: Das Austrocknen der Hölzer verhindern!

Zur Zwischenlagerung können die Hölzer unter Wasser, durch regelmäßiges Beregnen/Benetzen oder verpackt in wasserdampfdurchlässigen Folien aufbewahrt werden.

Es ist davon auszugehen, dass auch hierbei durch hydrolytische und bakteriologische Prozesse weiterhin Holzsubstanz geschädigt wird. Aus unserer am RGZM gemachten Erfahrung kann man aber sagen, dass solche Vorgänge nur sehr langsam ablaufen und auch über Jahre hinweg keine erkennbaren Veränderungen verursacht haben.



Abb. 41: Lagerung in wassergefüllten Kunststoffbehältern oder Folienverpackung.

4.3 Konservierung

Um archäologische Nasshölzer unter normalen raumklimatischen Bedingungen zu lagern oder zu präsentieren muss eine Konservierung erfolgen und dabei zweierlei gewährleisten:

- die für das Objekt schadensfreie Entfernung des Wassers
- die Stabilisierung der geschwächten Holzzellen durch das Einbringen eines Festigungsmittels

Die heutzutage praktizierten Methoden lassen sich nach zwei Vorgehensweisen unterscheiden:

- Tränkung mit wasserlöslichen Festigungsmitteln
- Tränkung mit wasserunlöslichen Festigungsmitteln

Nach einer Tränkung mit *wasserlöslichen* Festigungsmitteln ist der abschließende Trocknungsvorgang von besonderer Bedeutung, da beim Verdunsten des Wassers starke Kontraktionskräfte auf die geschwächten Zellen wirken. Um dies zu minimieren oder gar auszuschließen, kommen schonende Trocknungsverfahren, wie die Gefriertrocknung (Verdunstung durch Sublimation) oder eine langsame, kontrollierte Lufttrocknung (Verdunstung bei möglichst geringer Differenz des Feuchtegehaltes zwischen Oberfläche und Holzinnerem) zur Anwendung. Praktisch sieht eine kontrollierte Lufttrocknung so aus, dass die Hölzer luftdicht eingepackt und regelmäßig für eine kurze Zeit zum Ablüften geöffnet werden.

Um eine Tränkung mit *wasserunlöslichen* Festigungsmitteln überhaupt durchführen zu können, muss folglich zuvor das Wasser durch geeignete Lösungsmittel ersetzt werden. Dies geschieht durch mehrmaliges Tränken der Nasshölzer in Lösungsmittelbädern. Ist das Wasser restlos durch Lösungsmittel ersetzt worden, wird das Festigungsmittel eingebracht. Der Vorteil bei dieser Vorgehensweise besteht darin, dass die verwendeten Lösungsmittel nur eine sehr geringe Oberflächenspannung besitzen und somit beim Abdampfen keine starken Zugkräfte auf die Holzzellen ausüben können - die Dehydration erfolgt hierbei also vor der eigentlichen Durchtränkung mit Festigungsmitteln.

Zu den gebräuchlichsten und im Rahmen dieses Projektes verglichenen Methoden gehören:

4.3.1 Konservierung mit wasserlöslichen Festigungsmitteln

4.3.1.1 Konservierung mit PEG (Polyethylenglykol)

(Text : Stephan Brather)

Polyethylenglykole sind fadenförmige Polymere mit unterschiedlicher Kettenlänge. Sie sind je nach Molekülgröße flüssig bis hartwachsartig, wasserlöslich und schmelzen ab etwa 50 °C.

Nachdem man seit den 1940er Jahren erfolgreich Polyethylenglykol (PEG) zur Verhinderung einer Schrumpfung bei Papier, Leder und frischem Holz eingesetzt hatte, wurde es ab Mitte der 1950er Jahre auch für archäologisches Nassholz angewandt. Durch große Konservierungsprojekte, wie die Konservierung des königlichen Schiffes Vasa in Stockholm, der Wikinger-Schiffe von Roskilde oder einer Kogge in Bremerhaven, entwickelte sich die sogenannte Volltränkung rasch zu einer Art Standardmethode.

Dabei steigerte man die Konzentration eines höher-molekularen PEG in den auf 60 bis 80 °C erwärmten Wasserbädern mit Nassholz solange, bis das Wasser vollständig verdunstet und durch PEG ausgetauscht war. Die Hölzer wurden abschließend aus der verbliebenen PEG-Schmelze entnommen und oberflächlich gesäubert.

Heute werden je nach Erhaltungszustand des Holzes Polyethylenglykole mit unterschiedlichen Molekülmassen in geringeren Konzentrationen eingesetzt: Bei guter Holzerhaltung soll nieder-molekulares PEG das Wasser in den Zellwänden ersetzen und bei stärkerem Holzabbau vorrangig höher molekulares PEG in den Zellhohlräumen mechanische Stabilität erzeugen. Die Tränkung kann bei Raumtemperatur oder zur Beschleunigung in beheizten Becken bei etwa 50 °C erfolgen, wobei die Konzentration schrittweise auf 45 % erhöht wird.

Das im Holz noch verbliebene Wasser entfernt eine anschließende Gefriertrocknung – dies dauert nochmals etwa drei bis vier Monate. Abschließend erfolgt eine Oberflächenreinigung.

4.3.1.2 Konservierung mit Melaminharz (Kauramin-Methode)

(Text: Markus Wittköpper)

Kauramin 800 ist der Produktname für ein wasserverdünnbares, irreversibel vernetzendes Melaminharz, dessen sehr kleine Moleküle sich positiv auf Eindringfähigkeit und Tränkungsdauer auswirken. Die Konservierung findet bei normalen Raumklima statt. Jeder wasserdichte Behälter ist zur Tränkung geeignet.

Nach Entfernung der oberflächlichen Verschmutzungen werden die Hölzer in deionisiertem Wasser gereinigt. Wasserlösliche Bestandteile, die während der Bodenlagerung eingeschwemmt wurden, Gerbstoffe, organische und anorganische Salze und Säuren lassen sich so auswaschen. Melaminharze sind säurehärtend, d.h. Säurereste können bereits vor der vollständigen Durchtränkung der Objekte eine vorschnelle Aushärtung verursachen.

Danach werden die archäologischen Nasshölzer mit einer 25%igen Konservierungslösung behandelt. Ist das Holz vollständig durchtränkt, wird das Melaminharz bei 60°C einige Tage im Wärmeschrank ausgehärtet.

Optimale Ergebnisse erzielt man anschließend durch eine langsame, schonende Trocknung in wasserdampfdurchlässigen PE-Folien. Bei großen Hölzern lässt sich die Trocknungszeit mit Mikrowellenenergie verkürzen.

Aufgrund des niedrigen Anteils an Festigungsmitteln sind die Objekte nach der Konservierung leicht und hell. Eine abschließende Behandlung mit Holzöl oder –wachs intensiviert die Holzfarbe und schützt die Hölzer vor Feuchtigkeitsschwankungen.

4.3.1.3 Konservierung mit Zucker (Saccharose)

(Text : Stephan Gebhardt)

Haushaltzucker (Saccharose, der Extrakt aus dem Saft des Zuckerrohrs oder der Zuckerrübe) wird seit Mitte der 1970er Jahre zur Nassholztränkung angewendet. Zucker bietet sich an, da es aufgrund seines pflanzlichen Ursprungs größtenteils aus den gleichen Molekülen wie das Holz aufgebaut ist, sich gut in Wasser löst sowie klar und fest aushärtet (auskristallisiert). Weitere Vorteile sind seine Verfügbarkeit und Lagerfähigkeit.

Da Zuckerlösung korrosiv wirkt, müssen die Badbehälter aus Kunststoff oder Edelstahl sein. Die Hölzer werden in einer Folge von Bädern, deren Zuckerkonzentration stufenweise von 10% auf bis zu 60% angehoben wird, durchtränkt. Jedes Bad wird neu angesetzt und der Tränkverlauf durch Messung mit einem Refraktometer überwacht.

Um zu verhindern, dass Mikroorganismen wie Bakterien und Pilze den Zucker abbauen und die Lösung verderben, sind folgende Maßnahmen zu ergreifen:

- Die Badtemperatur sollte 20°C nicht überschreiten
- Sauerstoffzufuhr und Insektenbefall durch Folienabdeckung der Bäder verhindern
- Zugabe von Bioziden
- Regelmäßige Kontrollen der Badqualität durch Beurteilung von Klarheit und Geruch sowie Messung des pH-Wertes, der als Indikator für bakterielle Aktivität dient

Die Trocknung, während der auch der Zucker beginnt auszukristallisieren, kann durch eine langsame, kontrollierte Lufttrocknung oder Gefriertrocknung erfolgen. Abschließend wird die Oberfläche von Zuckerresten feucht gereinigt und nach vollständiger Abtrocknung ein Schutzüberzug (Mowilith 50) aufgetragen.

4.3.2 Konservierung mit wasserunlöslichen Festigungsmitteln

4.3.2.1 Konservierung mit der Alkohol-Ether-Harz Methode

(Text : Katharina Schmidt-Ott)

Die Alkohol-Ether-Harz-Methode zur Konservierung von nassorganischen Objekten wendet das Schweizerische Nationalmuseum seit den frühen 1950er Jahren an. Sie ist geeignet um Hart- und Weichhölzer verschiedenster Arten und Abbaugrade und Materialkombinationen mit Holz zu konservieren.

Zuerst werden die organischen Nassfunde zur Entwässerung in Ethanolbäder eingelegt. Der Ethanol ersetzt langsam das Wasser in den Zellen und das Wasser aus dem Holz mischt sich mit dem Ethanolbad. Der Wassergehalt im Ethanol wird über eine Dichtemessung der Lösung regelmäßig kontrolliert. Alle zwei Wochen sind die Bäder mit stets höherer Ethanolkonzentration zu erneuern. In der Regel sind acht Badwechsel notwendig. Erst wenn kein Wasser mehr im Ethanol messbar ist, d.h. dass die Zellen nun nur noch mit Ethanol gefüllt sind, folgt der zweite Behandlungsschritt.

In diesem ersetzt Diethylether den Alkohol. Diethylether zeichnet sich durch eine geringe Oberflächenspannung aus, beim Verdampfen kollabieren die Zellen daher nicht. Erneut sind etwa acht Badwechsel notwendig, bis kein Ethanol mehr aus den Objekten herausgelöst wird.

Die Stabilisierung der Hölzer erfolgt dann in einem dritten Bad durch das Einbringen eines in Diethylether löslichen Harzgemisches. Eine abschließende Trocknung unter leichtem Vakuum entzieht den Objekten den Diethylether. Die Harze verbleiben und stabilisieren die Zellstrukturen.

Durch die leichte Entzündbarkeit der Substanzen sind bei der Anwendung dieser Methode spezielle Sicherheitsvorkehrungen notwendig.

4.3.2.2 Konservierung mit der Silikonöl-Methode

Diese Methode ähnelt in der Verfahrensweise der Plastination, die von der Herstellung anatomischer Präparate bekannt ist. Die in den 1990er Jahren an der Texas University entwickelte Silikonöl-Konservierung ist nicht nur für Nassholz, sondern auch für alle anderen organischen Materialien anwendbar.

Analog zur Alkohol-Ether-Methode werden auch hier die Nasshölzer zuerst durch einen Lösungsmittelaustausch „dehydriert“. Nach einem Austausch des Wassers durch Ethanol wird dieser durch Aceton ersetzt.

Als dritter Austauschprozess erfolgt die Imprägnierung der komplett mit Aceton gesättigten Hölzer mit vernetzungsfähigen Silikonölen in einem Tränkungsbad unter schwachem Vakuum. Das verdampfende Aceton erzeugt dabei einen Unterdruck in den Holzzellen, der es der Silikonöl-Lösung ermöglicht bis in alle Hohlräume vorzudringen. Damit sich die eingedrungenen Silikonöle überhaupt zu einem stabilisierenden Polymer verbinden können, wird der Lösung noch ein sogenannter Vernetzer beigemischt.

Durch Auswahl unterschiedlicher Silikonölypen oder Verändern des Mischungsverhältnisses von Silikonöl und Vernetzer kann die Konsistenz des Festigungsmittels (härter oder elastischer) individuell auf das Objekt abgestimmt werden.

Nach Beendigung der Tränkung und Entfernung überschüssiger Tränkungslösung von den Oberflächen werden die Hölzer in einem geschlossenen Behältnis den Dämpfen eines Katalysators ausge-

setzt, der die Aushärtung initiiert. Das Verdampfen des flüssigen Katalysators geschieht durch Erwärmung auf 52°C. Die Behandlung ist irreversibel.

4.4 Projektvorgehensweise

Um die Konservierungsergebnisse dieser Methoden objektiv miteinander vergleichen zu können, wurden im Rahmen dieser Projektarbeit aus archäologischen Hölzern Versuchskörper zugeschnitten und systematisch im Vor- und Endzustand dokumentiert. Die Grundlage bildete eine Auswahl von 22 in Holzart, Erhaltungszustand oder Form unterschiedlichen Versuchsreihen. Von jeder sollte jedes der 7 beteiligten Institute 5 Proben zur Konservierung bekommen. Da die resultierende Mindestmenge an 40 vergleichbaren Probekörpern nicht aus jedem Holz gewonnen werden konnte, bekamen die zwei Institute, die mit einem hohem Lösungsmittelaufwand ihre Methoden betreiben, eine reduzierte Auswahl an Versuchsreihen zur Verfügung gestellt.

Zu den projektbeteiligten Instituten gehören:

Archäologische Staatssammlung in München

(Dreistufige PEG-Konservierung)

Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege in Zossen

(Zweistufige PEG-Konservierung)

National Museum of Denmark in Kopenhagen

(Einstufige PEG-Konservierung)

Römisch-Germanisches Zentralmuseum in Mainz

(Melaminharzkonserverung – Kauraminmethode)

Schweizerisches Nationalmuseum in Zürich

(Alkohol-Ether-Harz-Konservierung)

Sächsisches Landesamt für Archäologie in Dresden

(Zuckerkonserverung)

Texas A&M University, Department of Anthropology, Center for Maritime Archaeology & Conservation

(Silikonöl-Konservierung)

Nach abgeschlossener Behandlung und Rückgabe der Hölzer erfolgt die Dokumentation und Auswertung hinsichtlich der Veränderungen an Form, Gewicht, Festigkeit und Farbe.

Zum Vergleich von Ökonomie und Ökologie der unterschiedlichen Verfahren bekamen alle Projektteilnehmer eine fiktive Aufgabenstellung zur Konservierung eines römischen Brunnens, anhand derer Zeit-, Material- und Energiebedarf, sowie Entsorgungskosten zu kalkulieren waren.

Bis dato zeichnen sich schon einige Unterschiede insbesondere bei der Dimensionsstabilisierung ab, doch sind einige Konservierungsprozesse noch nicht abgeschlossen und alle Daten noch nicht eingegangen, so dass von einer Auswertung zum jetzigen Zeitpunkt abgesehen wird.

4.4.1 Die Versuchshölzer - Probenzuschnitt

Die Probekörper wurden aus archäologischem Nassholz geschnitten. Wünschenswert wäre es gewesen von jeder heimischen Holzart, in verschiedenen Abbaustadien und in ausreichender Menge entbehrliches Material zu bekommen, was leider nicht möglich war. Meistens wurden uns schwach bis mittelstark abgebaute Eichenhölzer angeboten, was aber auch auf die Häufigkeit dieses Fundmaterials zutrifft. Um dem Rechnung zu tragen, wurden mehrere Versuchsreihen aus Eichenholz entwickelt, die sich in Form/Querschnitt und Abbaugrad unterschieden. Weitere Forderungen an den Zuschnitt der Probekörper waren eine Mindestlänge von 10cm bei Erhalt des kompletten Querschnittes, d.h. die Hölzer sollten nur abgelängt und nicht aufgeschnitten werden, was z.B. bei Hölzern mit abgebauten Randbereich die Vergleichbarkeit der Proben gewährleisten sollte. Rechnet man für 7 beteiligte Institute je 5 Proben (statistische Auswertbarkeit) und 5 Proben als Referenzmaterial kommen mindestens 4 laufende Meter Holz je Versuchsreihe zusammen. Da diese Länge nicht immer gegeben war, mussten einige Hölzer dennoch von der Mitte her aufgetrennt werden.

Übersicht der Versuchsreihen :

Versuchsreihe :	Holzart :	Durchschnittlicher Umax :	Abbaugrad :	Alter :	Menge :	Probenform :
V01	Eiche	163%	3 bis 2		32	Pfosten, abgelängt
(V02)	Eiche	221%	3 bis 2	Röm.	22	Balken mittig aufgeschnitten u. abgelängt
V03	Kiefer	Auftrieb	3		48	U-Wasserleitung - Aufschnitt in 6 Längsstreifen, abgelängt
(V04)	Eiche	275% bis 1305%	2 bis 1	Neolith.	25	5 unterschiedliche Holzstücke, abgelängt
V05	Eiche	106%	3		60	U-Wasserleitung - Aufschnitt in 5 Längsstreifen, abgelängt
V06	Erle	668%	1		44	Trog - Aufschnitt in 7 Längsstreifen, abgelängt
V07	Buche	736%	1		44	Halbholz, längs radial geachtelt, abgelängt
V08	Kiefer	327%	2	M.A	35	Planke mittig aufgeschnitten u. abgelängt
(V09)	Eiche	164%	3	Röm.	18	Pfosten, abgelängt
V10	Eiche	170%	3	Röm.	41	Pfosten mittig aufgeschnitten u. abgelängt
(V11)	Eiche	191%	2	Röm.	14	Pfosten, abgelängt
(V12)	Eiche	344%	2	Röm.	15	Pfosten, abgelängt
(V13)	Buche	650%	1		12	Pfosten, abgelängt
	Eiche	291%	2		10	Pfosten, abgelängt
V14	Eiche	205%	2	Röm.	47	Balken mittig aufgeschnitten u. abgelängt
V15	Eiche	177%	Biegefestigkeit 3	Röm.	30	Diele - Aufschnitt in 6 Längsstreifen, abgelängt
V16	Eiche	211%	2	Röm.	39	Diele mittig aufgeschnitten, abgelängt
(V17)	Eiche	237%	2	Röm.	18	Diele, abgelängt
V18	Fichte/Lärche	348%	2	Neuzeitl.	38	Stamm mit Wurzelstock, Aufschnitt in 8 Längsst., abgelängt
V19	Eiche	127%	3	Röm.	16	Balken, abgelängt
V20	Eiche	140%	3	Röm.	52	Dielen, abgelängt
(V21)	Tanne	287%	2	Röm.	36	Brett mittig aufgeschnitten, abgelängt
V22	Tanne	353%	2	Röm.	49	Brett - Aufschnitt in 3 Längsstreifen, abgelängt
V23	Fichte/Lärche	365%	2	Röm.	36	Balken, abgelängt
V24	Erle	818%	1	Röm.	65	Staketen, abgelängt
V25	Tanne	478%	1	Röm.	24	Balken - Aufschnitt in 8 Streifen, abgelängt
(V26)	Eiche	175%	3	Röm.	46	Diele - Aufschnitt in 3 Längsstreifen, abgelängt
V27	Eiche	553%	1	Röm.	42	Äste - abgelängt (dick)
V27-A	Eiche	665%	1	Röm.	34	Äste - abgelängt (dünn)
V28	Esche	1042%	1	Neolith.	44	Pfahl - abgelängt
V29	Buche	885%	1	Bronzezeitl.	38	Spaltbohle(Stamm) - mittig aufgetrennt u. abgelängt
V30	Tanne	576%	1	Neolith.	35	Pfahl - abgelängt
V31	Buche	887%	Biegefestigkeit 1	Bronzezeitl.	26	Spaltbohle(Stamm) -in Längsstreifen aufgetrennt u. abgelängt
					gesamt :	1135
					Gesamt :	863

Abb. 42: Die eingeklammerten Versuchsreihen wurden bei der Auswahl für den Konservierungsvergleich aussortiert.

Nach dem Ablängen der Hölzer an der Bandsäge konnte man die unterschiedlich abgebauten Bereiche an den Querschnittsflächen optisch gut unterscheiden, womit das weitere Aufsägen in vergleichbare Proben erleichtert wurde. Während sich die Holzfasern an den gut erhaltenen Bereichen noch aufstellten, blieben die abgebauten Bereiche glatt.



Abb. 43: Rot hervorgehoben ist der gut erhaltene Bereich mit aufgestellten Fasern - Eichepfosten, mittig aufgetrennt.

4.4.2 Untersuchung der Holzart

Anhand von Dünnschnitten (Quer-, Radial- u. Tangentialschnitt) wurden unter dem Durchlichtmikroskop die Holzarten bestimmt. Durchgeführt wurde diese Untersuchung von Dr. Niels Bleicher vom dendrochronologischen Labor des Amtes für Städtebau der Stadt Zürich.

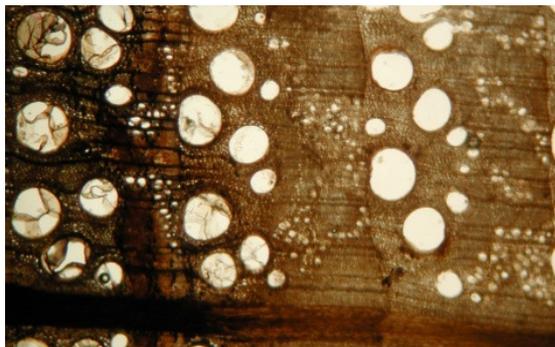


Abb. 44: Versuchsreihe V01 - Eiche.

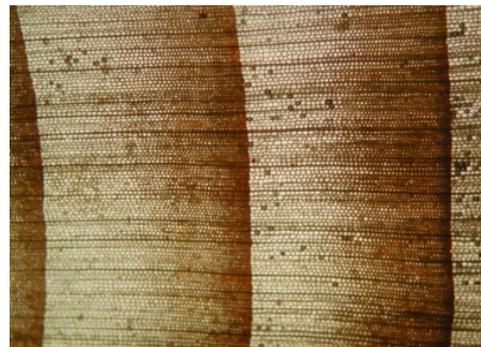


Abb. 45: Versuchsreihe V30 - Tanne.

4.4.3 Untersuchung des Abbaugrades

Je mehr Holzsubstanz abgebaut ist, umso höher liegt sein maximales Wasseraufnahmevermögen. Bei komplett mit Wasser gesättigten Hölzern kann der zu ermittelnde Wassergehalt also dazu dienen den Grad des Abbaus näher zu beschreiben. Wichtig ist diese Information für die Handhabung der Objekte oder zur feineren Abstimmung des an zu wendenden Konservierungsverfahrens. Insbesondere beim zweistufigen PEG-Verfahren richten sich die Konzentrationen von nieder- und höhermolekularen PEG danach inwieweit geschädigte Zellwände durch den festen PEG-Typ gestützt werden müssen.

Zur einfachen Berechnung würde man das Nassholz wiegen, danach bis zur Gewichtskonstanz im Ofen bei über 100 °C trocknen, wieder wiegen und den Wasseranteil bestimmen. Der Nachteil liegt auf der Hand - das Holz wäre zerstört. Würde man bei einem hohen Fundaufkommen dennoch ein

entbehrliches Stück hierfür opfern, stellt sich die Frage, ob der ermittelte Abbaugrad auch für das restliche Holz anzunehmen wäre.

Eine zerstörungsfreie Alternative bietet die vergleichende Massebestimmung mit dem Wiegen an normaler Atmosphäre und dem Wiegen unter Wasser.

Da die reine Holzsubstanz unabhängig seiner Holzart ca. eine Dichte von 1,5g/cm³ besitzt, erfährt es unter Wasser einen Auftrieb gemäß seines an Wasser verdrängten Volumens. 1cm² Wasserverdrängung entspricht 1g Gewichtserleichterung - die Waage würde also bei einem aus reiner Holzmasse bestehendem Würfel von 1 cm³ 0,5g anzeigen. Das dreifache Unterwassergewicht entspricht also der noch vorhanden Holzmasse, das Wiegen an normaler Atmosphäre dem Gewicht von Holzmasse und Wasseranteil und der durch Differenz beider Gewichte gebildete Betrag dem Volumen des Holzkörpers.

Inwieweit die Annahmen mit den Daten der unkonservierten, zuerst luftgetrockneten und dann ofengetrockneten Holzproben korrespondieren, zeigt folgende Übersicht:

Holzprobe	Nassgewicht	Gewicht unter Wasser	Holzgewicht errechnet	Atrogewicht	Umax	Schwankungsbreite Umax	Volumen vor Trocknung
V01-001	2242,7	359,7	1079,1	1030	118	108 - 226 %	1882,9
V03-001	911,4			186	390	-(Auftrieb der Hölzer)	901,5
V03-030	759,9			203	274		782,3
V05-032	1637,4	253	759	703	133	86 - 141 %	1383,9
V05-038	1972,1	333,7	1001,1	923	114		1633,0
V06-023	576,2	25,2	75,6	77	648	465 - 1355 %	546,9
V06-038	616,1	21,1	63,3	69	793		595,0
V07-023	794,4	33,9	101,7	104	664	565 - 1186 %	772,7
V07-031	781,35	31,9	95,7	100	681		752,8
V08-Exp01	220,26	12,7	38,1	71	210	197 - 733 % (teilweise durch Auftrieb verfälscht)	211,5
V10-002	828,6	101,3	303,9	275	201	139 - 202 %	725,7
V10-008	1201,1	151,4	454,2	424	183		1048,4
V14-028	1940,3	197,3	591,9	558	248	128 - 325 %	1737,7
V14-041	1491	176	528	486	207		1308,3
V16-015	559	46,9	140,7	121	362	167 - 422 %	512,2
V18-018	1642,1	105,8	317,4	271	506	238 - 454 %	1548,6
V18-019	1188,2	109,5	328,5	280	324		1109,8
V18-026	1123,5	74,2	222,6	187	501		1055,1
V19-001	8170	942,5	2827,5	2705	202	109 - 280 %	7425,2
V19-015	9980	1577,5	4732,5	4350	129		8536,9
V20-020	6090	714,5	2143,5	1980	208	98 - 273 %	5415,3
V20-031	3810	568,8	1706,4	1600	138		3247,8
V22-007	532,5	49,3	147,9	136	292	196 - 494 %	486,1
V22-028	500	42,3	126,9	104	381		453,6
V23-020	1158,1	96	288	192	503	189 - 526 %	365,2
V23-036	898	67,4	202,2	209	330		837,2
V24-023	151,8	5,8	17,4	18	743	599 - 1048 %	146,3
V24-058	138,6	4,3	12,9	13,5	927		132,4
V24-059	88,2	3,1	9,3	9,6	819		83,0
V25-016	873,8	49,3	147,9	166	426	354 - 651 %	827,9
V27-017	311,6	15,9	47,7	46	577	326 - 703 %	293,3
V27-024	267,5	15,5	46,5	44	508		252,0
V27-036	261,7	10,8	32,4	36,2	623		250,5
V27A-004	158,9	6	18	20	694	398 - 916 %	152,6
V28-027	1382,44	46,4	139,2	165	738	863 - 1632 %	1333,1
V29-036	1067	37,57	112,71	129	727	802 - 1046 %	1022,0
V30-Exp01	93,2	4,78	14,34	16,5	465	464 - 714 %	88,0

Nassgewicht (g) : Gewicht an Atmosphäre - normale Wägung

Gewicht unter Wasser (g) : Wiegen unter Wasser

Holzgewicht errechnet (g) : Dreifaches Unterwassergewicht = Holzgewicht

Atrogewicht (g) : Gewicht nach Ofentrocknung bei 105°C (Restfeuchte 0% - absolut trocken) = Holzgewicht

Umax (%) : Maximales Wasseraufnahmevermögen (errechnet aus Nass- und Atrogewicht)

Schwankungsbreite Umax : Verteilung des maximalen Aufnahmevermögens aller Proben einer Versuchsreihe

Volumen vor Trocknung (cm³) : Volumenangabe aus Datei der gescannten Probe

(Volumenberechnung durch Wiegen - In Tabelle nicht erfasst) : Differenz aus Nassgewicht und Unterwassergewicht

Betrachtet man sich die teilweise großen Schwankungsbreiten des U_{\max} -Wertes der Probestücke innerhalb einer Versuchsreihe, stellt man fest, dass die Ableitung des Abbaugrades aus nur einer Atroprobe sowohl einen guten Mittelwert, aber auch einen extremen Randwert erzeugen kann. Die Holzmassen- und Volumen-Werte, die sich aus der vergleichenden Massebestimmung ermitteln und errechnen lassen, harmonisieren mit maximalen Abweichungen bis zu ca. 10% relativ gut mit den gemessenen Werten der Atroprobe und dem Volumen der Scandaten. Die Ermittlung des Wassergehaltes aus der vergleichenden Wiegung an Luft und unter Wasser liefert somit eine gute Annäherung.

4.4.4 Chemische Untersuchung der Restsubstanzen

Kohlenhydratanalysen sollten Auskunft darüber liefern, welche Zellwand bildenden Holzsubstanzen am ehesten vom Abbau betroffen sind. Zur Bestimmung der Mengenverhältnisse wurde eine Kohlenhydratanalyse von der Universität Hamburg, Zentrum für Holzwirtschaft, durchgeführt.

Als Probenmaterial bedarf es nur geringer Mengen (1 g Trockenmasse), so dass im Vorfeld aus den Versuchshölzern (mit einem für die jeweilige Versuchsreihe durchschnittlichem Wassergehalt) ein für den Erhaltungszustand repräsentativer, kleiner Riegel geschnitten wurde. Im Labor wurden die Holzproben im Vakuumtrockenschrank bei 40°C getrocknet und danach mit einer Kryomühle unter Flüssigstickstoff zu einem feinen Pulver gemahlen. Nach einer zweistufigen sauren Hydrolyse, in der die Polysaccharide in ihre Monomere aufgespalten werden, wird das Hydrolysat mittels HPLC (hier Borationenaustauschchromatographie) qualitativ und quantitativ auf die typisch im Holz vorkommenden Zucker ausgewertet. Der abfiltrierte Hydrolyserückstand wurde gewogen und kann als Maß für das in der Probe enthaltene Lignin herangezogen werden.

Die detaillierten Untersuchungsergebnisse sind ebenso in der Datenbank hinterlegt, wie eine daraus konstruierte, einfache schematische Darstellung der Mengenverhältnisse der Restsubstanzen (nach Polysaccharidberechnung) unter Berücksichtigung der verbliebenen Restdichte.

Am Beispiel der Versuchsreihe V28 (neolithischer Eschepfahl mit einem U_{\max} von 1042%) stellen sich die Ergebnisse wie folgt dar:

Rohdaten	Rückstand % abs.	Cellobiose % abs.	Rhamnose % abs.	Mannose % abs.	Arabinose % abs.	Galaktose % abs.	Xylose % abs.	Glucose % abs.	4-O-Me % abs.
1. Messung	68,8	0,04	0,54	0,42	1,64	1,25	2,20	7,02	0,00
2. Messung	68,8	0,04	0,61	0,42	1,59	1,31	2,14	7,05	0,00
3. Messung	68,9	0,03	0,53	0,42	1,64	1,30	2,28	7,05	0,00
Versuchsreihe	V28								
Holzart	Esche								
Ø - Umax	1040%								

Originaldaten

	Rückstand % abs.	Rhamnose % abs.	Mannose % abs.	Arabinose % abs.	Galaktose % abs.	Xylose % abs.	Glucose % abs.	4-O-Me % abs.	Summe % abs.
1. Messung	68,8	0,54	0,42	1,64	1,25	2,20	7,06	0,00	13,11
2. Messung	68,8	0,61	0,42	1,59	1,31	2,14	7,09	0,00	13,16
3. Messung	68,9	0,53	0,42	1,64	1,30	2,28	7,08	0,00	13,25
Mittelwert	68,8	0,56	0,42	1,62	1,29	2,21	7,08	0,00	13,18
s (n-1)	0,1	0,04	0,00	0,03	0,03	0,07	0,02	0,00	0,07
s (n-1) [%]	0,1	7,78	0,00	1,78	2,50	3,18	0,22	#DIV/0!	0,54

Kohlenhydrate auf 100 % normiert

	Rhamnose % rel.	Mannose % rel.	Arabinose % rel.	Galaktose % rel.	Xylose % rel.	Glucose % rel.	4-O-Me % rel.	Summe % rel.
1. Messung	4,12	3,20	12,51	9,53	16,78	53,86	0,00	100,00
2. Messung	4,63	3,19	12,08	9,95	16,26	53,88	0,00	100,00
3. Messung	4,00	3,17	12,38	9,81	17,21	53,44	0,00	100,00
Mittelwert	4,25	3,19	12,32	9,77	16,75	53,73	0,00	100,00
s (n-1)	0,34	0,02	0,22	0,21	0,47	0,25	0,00	0,00
s (n-1) [%]	7,94	0,54	1,78	2,18	2,83	0,46	#DIV/0!	0,00

Gesamtanalyse auf 100 % normiert unter Beibehaltung des definitiv ermittelten Rückstandes

	Rückstand %	Rhamnose %	Mannose %	Arabinose %	Galaktose %	Xylose %	Glucose %	4-O-Me %	Summe %
1. Messung	68,80	1,28	1,00	3,90	2,97	5,23	16,80	0,00	100,00
2. Messung	68,80	1,45	1,00	3,77	3,11	5,07	16,81	0,00	100,00
3. Messung	68,90	1,24	0,99	3,85	3,05	5,35	16,62	0,00	100,00
Mittelwert	68,83	1,32	0,99	3,84	3,04	5,22	16,75	0,00	100,00
s (n-1)	0,06	0,11	0,01	0,07	0,07	0,14	0,11	0,00	0,00
s (n-1) [%]	0,08	8,06	0,71	1,75	2,16	2,68	0,65	#DIV/0!	0,00

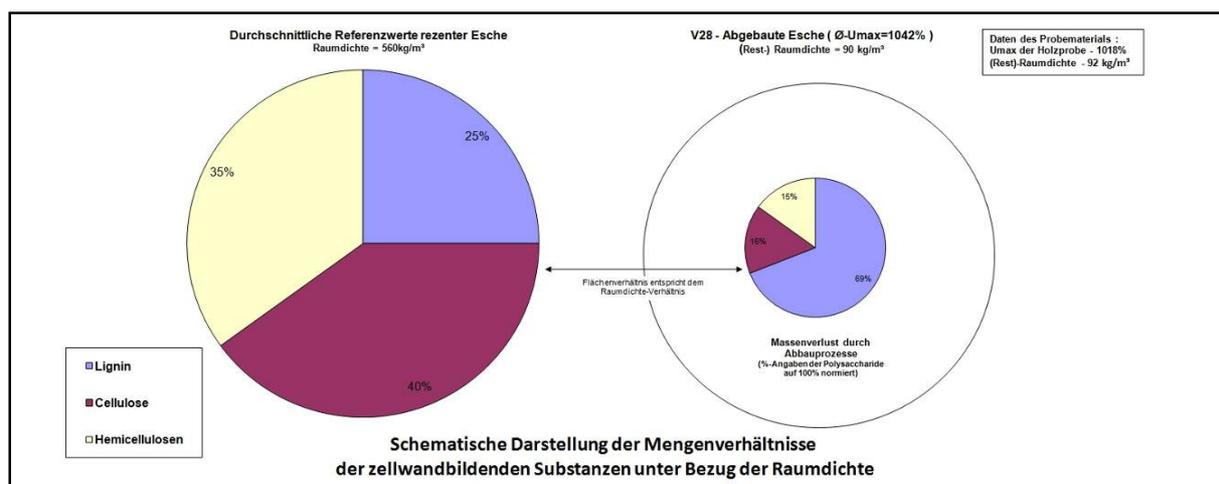


Abb. 46: Das Flächenverhältnis entspricht der veränderten Raumdichte von rezenter zu abgebauter Esche von V28.

Auffällig an den Ergebnissen ist der fast schon zu erwartende hohe Wert der Hydrolyserückstände, sprich der Ligninanteile. Durch den Verlust der leichter abbaubaren Kohlenhydrate steigt natürlich der Wert des Ligningehaltes im Verhältnis zu den schwindenden Cellulosewerten.

Der Verlust der Cellulosen bedeutet auch gleichzeitig den Verlust der Längsstabilität (Biege- und Zugfestigkeit) des Holzes, da diese die hierfür notwendigen langkettigen Fibrillen ausbilden. Dies erklärt warum abgebaute Hölzer ohne Kraftaufwand an jeder Stelle durch falsche Handhabung leicht auseinanderbrechen können. Das Handling solcher unkonservierter Holzobjekte ist daher nur mit formschlüssigen Kapseln durchzuführen.

4.4.5 Untersuchung der Formveränderung

Als wichtigstes Kriterium für einen Konservierungserfolg galt die Erhaltung von Form und Umfang der Holzproben. Da die Probekörper nicht nach einer exakten Geometrie zugeschnitten wurden, kamen zwei Vermessungsmethoden zur Anwendung:

- Vermessung mit einem 3D-Streifenlichtscanner
- Vermessung mit einem Messschieber zwischen Edelstahlnägeln, die ins Holz eingeschlagen wurden und dort während des gesamten Konservierungsprozesses verblieben

Interessant war hierbei nicht nur die erstmals genaue Dokumentation der Formenveränderung anhand der Scandaten und Modelle, sondern auch inwieweit sich die einfacher gewonnenen Messschieber-Daten damit vergleichen lassen.

4.4.5.1 Vermessung mit Messschieber

Zur Bestimmung von radialem, tangentialem und longitudinalem Schwund wurden in entsprechend holzanatomischer Ausrichtung Edelstahlnägeln in das Holz eingeschlagen und der Abstand zwischen den Nagelschäften vor und nach der Konservierung mit einer Schieblehre vermessen. Der jeweilige Schwund, der sich aber am ganzen Holzkörper vollzieht, kann hierbei nur exemplarisch an einer Stelle zwischen zwei Punkten erfasst werden. Sollte sich das Holz verwerfen, kann hierüber mit dieser Methode keine Aussage getroffen werden.



Abb. 47: Radial, tangential und longitudinal ausgerichtete Vermessungsnägel.

Von einem festen Sitz der Nägel in stärker abgebauten Hölzern konnte nicht ausgegangen werden, so dass die Schieblehre ohne Druck an den Nagelschäften anzusetzen war. Beim Vermessen des Endzustandes zeigte sich, dass sich einige Nägel durch entstandene Risse lockerten oder sogar gelöst hatten. Rissen Hölzer vom Kern her zwischen den zwei Nägel zur Messung des tangentialen Schwundes auf, wurde die Gesamtlänge, abzüglich der Spaltbreite, notiert.



Abb. 48: Radiale Vermessung.



Abb. 49: Gelöster Nagel u. verfälschte Tangentialmessung durch Aufreißen.

4.4.5.2 Vermessung durch 3D-Streifenlichtscan

Jede Holzprobe wurde vor und nach der Konservierung gescannt. Zur Anwendung kam ein Streifenlichtscanner Typ ATOS III der Firma GOM mit einem Messfeld von 50x50cm und einer Auflösung von 2000x2000 Punkten (entsprechend des Messfeldes ergibt sich so ein Punktabstand von ca. 0,25mm). Aufgenommen wurde jede Probe in 16 Einstellungen, 8 Einstellungen je von Ober- und Unterseite mit jeweils um 45° verschobenem Blickwinkel. Am Rechner erfolgte dann die Weiterbearbeitung der Rohdaten zu geschlossenen 3D-Modellen. Zur Montage beider Ansichten (Ober- und Unterseite) konnten die runden, weiß getuschten Köpfe der Edelstahlnägel, die als Punkte vom Scanner erkannt und als Referenzpunkte definiert wurden, benutzt werden. Diese "Nagel"-Punkte wurden auch dazu verwendet, um zu jedem Objekt drei Ebenen (Radial-, Tangential- und Querschnitt) zu konstruieren, anhand derer die Modelle virtuell geschnitten werden können.

Im nächsten Schritt erfolgte in einem automatisierten Prozess das Übereinanderlegen der Modelle von Vor- und Endzustand. Zur Bestimmung der Lage wurden die Abstände zwischen Vor- und Endzustand minimiert und die Modelle so in Position gebracht.

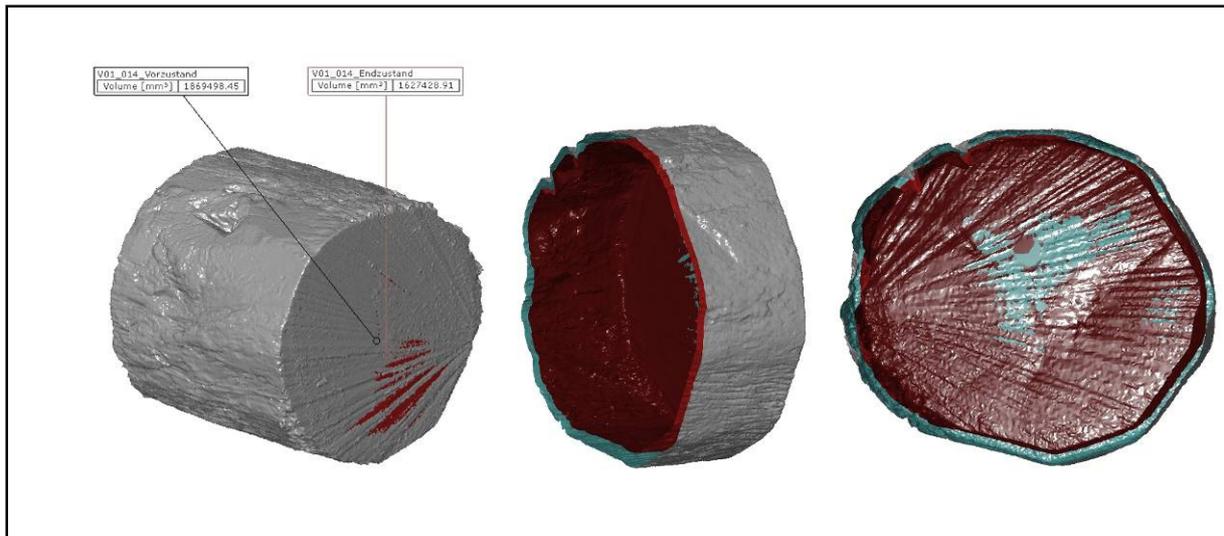


Abb. 50: 3D-Modell von V01-014 (Eichepfosten, Vorzustand-grau, Endzustand-rot, Innenfläche von Vorzustand-türkis) Gesamtansicht u. virtuell aufgeschnitten (parallel zum Querschnitt).

Waren die Formveränderungen zum Vorzustand zu gravierend, versagte die automatisierte Ausrichtung. In diesem Fall musste von Hand nach frei gesetzten Punkten die Lageverschiebung erfolgen.

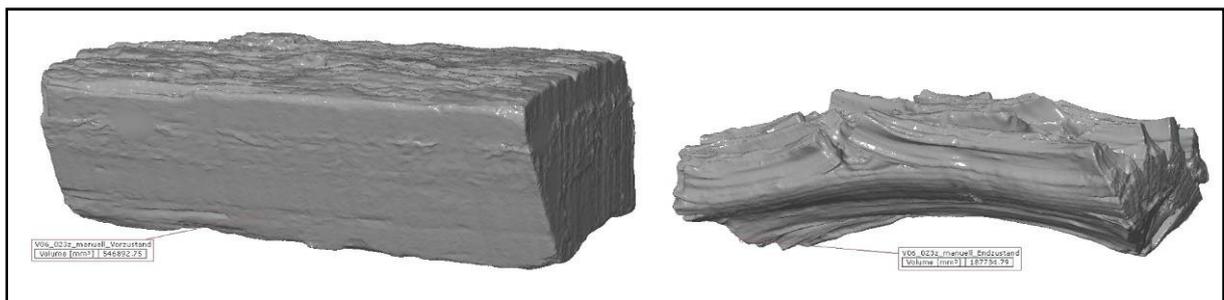


Abb. 51: Starke Formveränderung bei den unkonservierten, luftgetrockneten Referenzhölzern. Hier am Beispiel von Vor- und Endzustand von V06-023 (stark abgebautes Erlenholz).

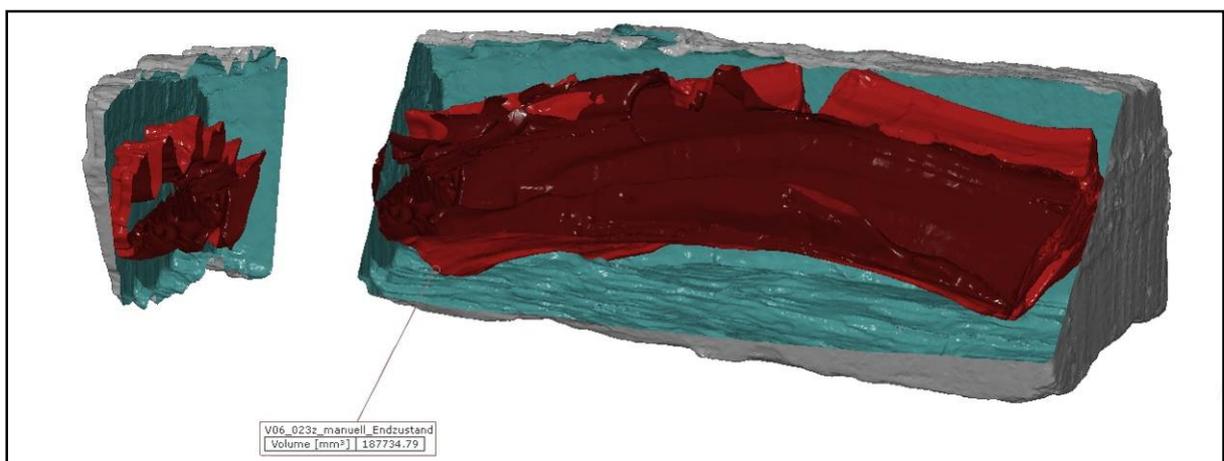


Abb. 52: Positionierung obigen Objektes nach manueller Ausrichtung von Vor-(grau) und Endzustand (rot) im virtuellen Schnitt.

Durch diese Art der Montage soll nicht nur die Formveränderung schnell ersichtlich werden, sondern auch anhand der zuvor definierten Schnittebenen der radiale, tangential und longitudinale Schwund ablesbar und über einen Flächenvergleich berechenbar sein.

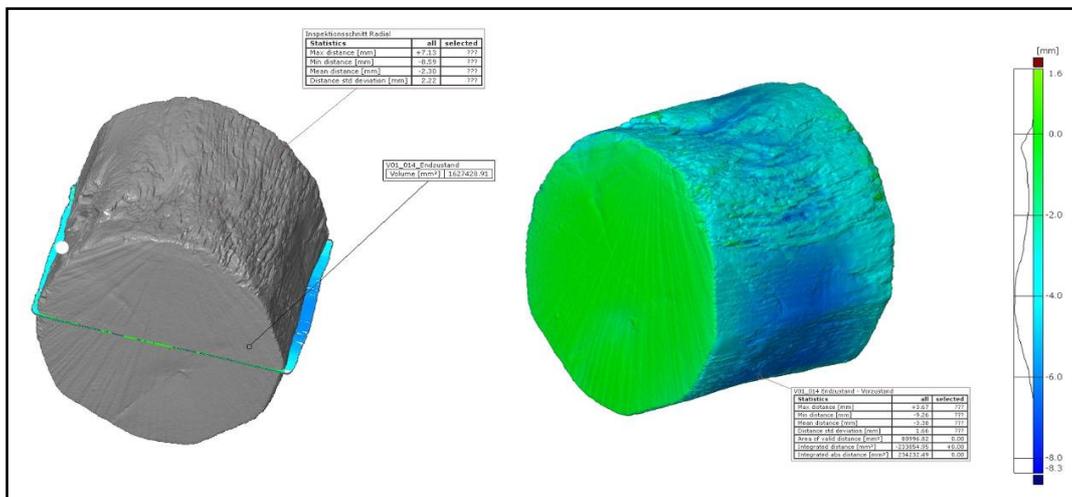


Abb. 53: Links: Endzustand mit Abweichung zum Vorzustand in radialer Schnittebene (Maßdifferenz entsprechend Farbskala)
 Rechts: Endzustand - die unterschiedlichen Farben entsprechen gemäß der Farbskala den Maßdifferenzen zum Vorzustand.

Weitere Daten, die über die Scans generiert und in die Datenbank aufgenommen werden, sind die Volumina, die Größe der Oberfläche, minimale und maximale Abweichungen, sowie die statistische Verteilung der Maßdifferenzen (im obigen Bild - Kurve links der Farbskala).

Einziger Nachteil an dieser Methode ist, dass bei einer Aufnahmeentfernung von ca. 72cm tiefe, feine Risse oder Hinterschneidungen nicht eingescannt werden können. Zur Herstellung geschlossener Oberflächen mussten diese Fehlstellen dennoch (ebenenbündig) geschlossen werden. Anhand der Zustandsfotos und kurzer Beschreibungen sind die Risse aber in der Datenbank dokumentiert.



Abb. 54: Am Modell sind die feinen Radial-Risse nur ansatzweise zur erkennen - Am Foto des Vorzustandes schon deutlicher.

4.4.6 Vergleich der Farbveränderung - Fotodokumentation

Inwieweit archäologische Hölzer ihre natürliche, ursprüngliche Farbe behalten haben ist schwierig zu beurteilen, da nicht mehr nachvollziehbar ist welchen farbverändernden Prozessen das Holz sowohl zu Gebrauchszeiten, als auch während der langen, nassen Bodenlagerung ausgesetzt gewesen war. Um die Farbe konservierter und unbehandelter archäologischer Hölzer objektiv beurteilen zu können, bedarf es eigentlich eines Probestückes, das ohne Behandlung mit einem Festigungsmittel aber dennoch ohne Volumenschwund und einer damit einhergehenden „Verdichtung“ der Holzmasse getrocknet würde um als Referenz zu dienen. Da dies aber nicht möglich ist, wurden zum Farbvergleich repräsentative Foto-Ausschnitte unterschiedlich behandelter Probeshölzer mit Ausschnitten einer unkonserverten und einer luftgetrockneten, geschwundenen Holzprobe, sowie eines rezenten Holzstückes gleicher Holzart in einer "Farbkarte" montiert.



Abb. 55: Versuchsreihe V06 - Stark abgebaute Erle.

Zudem ist in der Datenbank zu jedem Probekörper eine Fotomontage abrufbar, die auf einen Blick Vor- und Endzustand in zwei Ansichten präsentiert.



Abb. 56: Fotomontage von V06-011 - jeder Zustand wurde mit obiger Graukarte/Maßstab fotografiert, anhand derer die Ausschnitte skaliert werden konnten.

Alle Fotos wurden unter gleichen Lichtbedingungen und Einstellungen der Kamera vorgenommen.

4.4.7 Untersuchung der Druck-/ Biegefestigkeit

Genormte Prüfungen der Druck- und Biegefestigkeit sollen Daten darüber liefern, inwieweit die konservierten Hölzer statisch belastbar sind und es die unterschiedlichen Tränkungsmittel vermögen die Funktion der meist fehlenden Cellulose zu ersetzen. Zur Messung der Druckfestigkeit können alle Probekörper verwendet werden. Für die Biegefestigkeit wurden zwei Versuchsreihen (V15 u. V31) angelegt, deren zugeschnittene Probekörper bei gleichem Querschnitt eine Länge von ca. 30cm haben. Das hierfür keine exakt vergleichbaren Probekörper erzeugt werden konnten liegt am weichen Zustand stark abgebauter Hölzer, der es unmöglich macht exakte Schnitte durchzuführen, geschweige denn auszuhobeln, sowie an der beschränkten Auswahl des raren Ausgangsmaterials.



Abb. 57: Versuchskörper von V31 - stark abgebaute Buche (U_{max} 887%) - Maße : 33x33x290 mm.

Aus den noch durchzuführenden Messungen erhofft man sich nutzbare Aussagen, die beim Bau eines Stützgestells für größere, konservierte Holzobjekte hilfreich sein könnten, zu treffen.

4.4.8 Untersuchung der Gewichtsveränderung

Um beurteilen zu können wie sich die unterschiedlichen Methoden auf das "Endgewicht" auswirken, d.h. welche Methode die schwersten oder leichtesten Hölzer erzeugt, wurden alle Proben gewogen und eine "Enddichte" bestimmt. Interessant ist auch die Frage, wie genau sich aus den Gewichtsdaten rechnerische Prognosen über das Gewicht nach Aufnahme eines Tränkungsmittels oder nach Verlust des Wassergehaltes, sprich Trocknung, erstellen lassen.

Alle Probekörper wurden vor der Konservierung an normaler Atmosphäre und unter Wasser, nach der Trängung und nach abgeschlossener Trocknung gewogen. Bis 3kg wurde eine Waage der Firma "Mettler Toledo" - Labstyle 3002 (d=0,01g) und bis 30 kg eine Waage der Firma "Rhewa"-942 (d=20g) benutzt. Die Wägungen nach der Trängung wurden von allen Kollegen mit unterschiedlichen Waagen an ihren Instituten durchgeführt.



Abb. 58: Einfache Vorrichtung zur Wägung unter Wasser.

4.4.9 Untersuchung von Ökonomie/Ökologie

Anhand eines fiktiven Auftrages zur Konservierung eines römischen Brunnens sollten alle Projektteilnehmer die hierzu notwendigen Leistungen kalkulieren. Vorgaben waren folgende Informationen:

Stück	Form	Holzart	Länge :	Breite :	Dicke :	Umax :	Volumen:
12	Dielen	Eiche	120cm	30cm	4cm	250%	0,173m ³
4	Balken	Kiefer	200cm	14cm	14cm	380%	0,157m ³
Volumen gesamt :							0,33m ³
Oberfläche gesamt :							14,72m ²
Nassgewicht je Diele ca. 16kg x 12 Stk. = Nassgewicht Eiche gesamt :							192kg
Nassgewicht je Balken ca. 42 kg x 4 Stk. = Nassgewicht Kiefer gesamt :							168kg
Nass-Gewicht gesamt :							360 kg

Um auszuschließen, dass z.B. unterschiedlich angesetzte Lohn- oder Stromkosten oder einmalige Anschaffungskosten für teurere Gerätschaften die Kalkulation verfälschen, wurde der Vergleich nach folgenden Kriterien aufgeteilt:

1. Materialkosten
2. Zeitbedarf
3. Energiebedarf - Strom und Wasserverbrauch
4. Benötigte Ausstattung/Equipment
5. Entsorgung (falls nötig)
6. Gesamtdauer Konservierung
7. Verfahrensbedingte Anwesenheit (notwendige Prozesse zur Überwachung der Konservierung)
8. Lagerung nach Konservierung
9. Arbeitsschutz (Maßnahmen im Umgang mit Gefahrstoffen - falls nötig)

4.5 Datenbank - Webseite/Auswertung

Alle Ergebnisse, Daten, Fotos und Scans, einschließlich ausführlicher Beschreibungen von Konservierungsabläufen und Untersuchungsmethoden, werden in einer Datenbank erfasst und sind über die Webseite des Projektes nachvollzieh- und einsehbar (www.rgzm.de/kur). Die webgerechte Aufarbeitung aller Einzeldaten soll es zudem jedermann ermöglichen eine eigene Auswertung am heimischen PC durchführen zu können.

Der Aufbau der Webseite gliedert sich nach vier übergeordneten Menüpunkten. Unter dem ersten Menü "Konservierungsverfahren" finden sich detaillierte Beschreibungen aller teilgenommenen Konservierungsmethoden.



Abb. 59: Menüansicht "Konservierungsverfahren".

Unter "Versuchsreihen" sind in abgestufter Menüfolge Informationen über die Versuchsreihen, Schwundverhalten unkonservierter Proben im Zeitraffer, die Daten unkonservierter Referenzproben, sowie die Einzeldaten, Scans und Fotomontagen aller Versuchshölzer archiviert.

Der Menüpunkt "Untersuchungen" enthält Beschreibungen über alle durchgeführten Mess- und Untersuchungsmethoden.

Im letzten Menüpunkt "Auswertung/Ergebnisse" soll es dem Anwender möglich sein, alle Daten nach gewünschter Kombination in Grafiken oder Tabellen zusammenstellen zu lassen.

Dass zum jetzigen Zeitpunkt (April 2012) noch keine konkreten Auswertungen vorgenommen werden können, liegt unter anderem an der langen Dauer der Konservierungsprozesse für archäologisches Nassholz, die für ca. 30% der Holzproben noch nicht abgeschlossen ist. Die Rückgabe der letzten Proben ist für Sommer dieses Jahres angekündigt. Nach Dokumentation, Datenbearbeitung und abschließender Auswertung wird sich das Projekt Ende 2012 vollständig im Netz präsentieren können.

4.6 Literaturverzeichnis Holz

Mombächer, R. : *Holz-Lexikon - Band 1 u. 2.*, 3. Auflage. DRW-Verlag. Stuttgart 1988

Wagenführ, R. : *Holzatlas*, 4.Auflage, Carl Hanser Verlag. Leipzig: Fachbuchverl. 1996

Bräker, O.U u. Bill, J : *Zum derzeitigen Stand der Naßholzkonservierung*, Bräker, O.U u. Bill, J(Hrsg.) in : *Zeitschrift für Schweizerische Archäologie und Kunstgeschichte*, Bd.36, S.97-145, Berichtshaus Zürich (Verlag), 1979

Koesling, V. : *Vom Feuerstein zum Bakelit. AdR-Schriftenreihe zur Restaurierung und Grabungstechnik Band 5/6*, AdR (Hrsg.)

Fengel, D. u. Wegener G. : *Wood - Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Walter de Gruyter, Berlin-New York 1989

Smith, C. Wayne : *Archaeological Conservation Using Polymers*. Texas A&M University Anthropology Series No. 6, 2003

Rowell, R. M. u. Barbour, R. J. : *Archaeological Wood - Properties, Chemistry, and Preservation*. Advances in chemical series 225, American Chemical Society, Washington, DC 1990

Unger, A. u. Schniewind, A.P. u. Unger, W. : *Conservation of wood artifacts- a handbook*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2001

Canadian Conservation Institute - www.cci-icc.gc.ca
A Method Of Calculating The Concentration Of PEG For Freeze-Drying Waterlogged Wood
<http://www.cci-icc.gc.ca/tools-outils/pegcon/help-aide/cookgrat-eng.aspx>
(abgerufen am : 18.10.2010, 11:30)

5. Publikationen und Veranstaltungen im Rahmen des Projektes

5.1 Schriftliche Publikationen auf Papier und im Netz

- Mazzola, C. (2009). What to do with "Large Quantity Finds in Archaeological Collections" - A KUR-project. *News in Conservation*, 6 (December).
- Mazzola, C., & Albert, P. (2009). Titration in der Restaurierung - Sammeln im Auftrag der Regierung. *WunderWelt - Science powered by Mettler Toledo*, pp. 366-369.
- Mazzola, C., Muskalla, W., & Wittköpper, M. (2009). Das KUR-Projekt "Massenfunde in archäologischen Sammlungen". (RGZM, Ed.) *Restaurierung und Archäologie* (2), pp. 133-136.
- Mazzola, C., & Albert, P. (2010). The KUR-Projekt "Large Quantity Finds in archaeological Collections". In G. Eggert, & B. Schmutzler (Ed.), *Archaeological Iron Conservation Colloquium 2010 - Extended Abstracts* (pp. 46-48). Stuttgart: Staatliche Akademie der Bildenden Künste.
- Ausstellungsbegleitheft „Schrumpfendes Holz, wachsendes Eisen“. (2012). München: Archäologische Staatssammlung München.
- Projektwebseite:
www.rgzm.de/kur

5.2 Veranstaltungen

- Studio-Ausstellung:
Schrumpfendes Holz, wachsendes Eisen - Eine Restaurierungsausstellung über das KUR-Projekt „Massenfunde in archäologischen Sammlungen“
Archäologische Staatssammlung München: 27. Januar – 06. Mai 2012
Römisch-Germanisches Zentralmuseum Mainz: 13. Juni – 16. September 2012
- Tagung:
Nassholzkonservierung im Vergleich - Untersuchungen der gängigen Verfahren
Eine Tagung der Kulturstiftung des Bundes (KUR) vom 13. bis 14. Juni 2012
Römisch-Germanisches Zentralmuseum