



Seminararbeit:

Studie zur Quellung archäologischen Nassholzes mit Trocknungsschäden

Verfasser: Karina Länger

Mainz 2015

Veranstaltung: Seminar "Wissenschaftliche Befundauswertung"

Semester: 5. Semester

Dozent: Prof. Dr. Markus Egg

Karina Länger Sömmerringstraße 23 55118 Mainz laenger@rgzm.de

Inhaltsverzeichnis

| 1. Einleitung | 3 |
|---|----|
| 2. Proben | 3 |
| 2.1 KUR-Projekt | 4 |
| 3.Trocknungsschäden | 5 |
| 4. Studien zur Quellung von Hölzern | 6 |
| 4.1 Ethylendiamin | 8 |
| 5. Quellversuch | 8 |
| 5.2 Vorbereitende Dokumentation | 10 |
| 5.1.1 Wägung und Bestimmung des Abbaugrades | 10 |
| 5.1.2 Nagelmaße | 13 |
| 5.1.3 Scannen | 14 |
| 5.1.4 Mikroskopische Untersuchungen | 17 |
| 5.1.5 atro-Trocknung | 17 |
| 5.2 Ansetzen der Quelllösung und Einlegen der Probehölzer | 18 |
| 5.3 Beobachtungen und tägliche Messungen | 20 |
| 6. Zwischenresultate nach 3 Wochen | 22 |
| 6.1 "Nassgewicht" und "Unterwassergewicht" | 24 |
| 6.2 U _{max} | 26 |
| 6.3 Volumenzuwachs | 27 |
| 6.4 Holzmasseverlust | 29 |
| 7. Fazit | 31 |
| 8. Ausblick | 32 |

1. Einleitung

Thema der vorliegenden Seminararbeit ist eine Studie zur Quellung von archäologischem Nassholz mit Trocknungsschäden.

Archäologische Nassholzfunde können während der Ausgrabung bzw. in der Zeit bis zur Konservierung Trocknungsschäden erleiden. Dies äußert sich in Schwund, Rissbildung und Deformation, bedingt durch den in der Holzstruktur auftretenden Zellkollaps.

Einmal kollabiertes Holz kann durch erneutes Einlegen in Wasserbäder nicht gequollen werden, sodass der Schaden als irreversibel gilt und Oberflächeninformationen und Form des Objekts im schlimmsten Fall für immer verloren sind.

Studien zur Holzquellung archäologischen Nassholzes, das völlig unkontrolliert getrocknet ist zeigen jedoch, dass durch den Einsatz von Ethylendiamin eine Quellwirkung erzeugt und das kollabierte Holz rekonstruiert werden kann.

Im Rahmen der Seminararbeit im "Seminar zur wissenschaftlichen Befundauswertung" konnte im Museum für Antike Schifffahrt in Zusammenarbeit mit Herrn Markus Wittköpper eine Studie zur Quellung von archäologischem Nassholz mit Trocknungsschäden realisiert werden. Das zur Verfügung gestellte Probematerial ist eine nicht verwendete Probereihe des KUR-Projektes, die aufgrund ihrer nicht ausreichenden Probenzahl keine Verwendung fand. Im Folgenden wird die durchgeführte Studie vorgestellt und die als Zwischenstand geltenden Ergebnisse ausgewertet. Durch die begrenzte Bearbeitungszeit konnte die Versuchsreihe nicht über die gesamte Projektdauer von mir betreut werden, sodass nach 3 Wochen eine Zwischenauswertung erfolgte.

2. Proben

Die hier verwendeten Probehölzer sind im Rahmen des KUR-Projektes in das Museum für Antike Schiffahrt gekommen, konnten jedoch aufgrund der zu geringen Probenanzahl nicht für das Projekt verwendet werden. Es handelt sich um einen römischen Eichenpfahl aus Bad Nauheim (s. Abb.1), dieser war Teil einer Pfahl-Konstruktion einer Salzgewinnungsanlage (Bef.-Nr.: 580/7).



Abbildung 1: römischer Eichenholzpfahl aus Bad Nauheim im Einlieferungszustand (Foto: W. Muskalla)

Als Versuchsreihe "V09" wurde das Holz vom Landesamt für Denkmalpflege Hessen, Schloss Wiesbaden-Biebrich, zur Verfügung gestellt. Radiale Risse (s. Abb. 1) belegen Trocknungsschäden, die vermutlich während der Grabung entstanden, noch bevor er seitens der LfD Wiesbaden sachgerecht in Wasser gelagert wurde. Der Eichenholzpfahl, Durchmesser ca. 12cm, wurde 2008 in 18 Probestücke von ca. 10 cm Länge zersägt. Während der Lagerung in deionisertem Wasser, bei jährlichem Wasserwechsel, kam es zu keiner erkennbaren Quellung. Die radialen Risse blieben unverändert (s. Abb. 2) Durch die sichtbaren Trocknungsschäden an den Probestücken, ist die Versuchsreihe V09 für diese Studie sehr gut geeignet. Zudem stellt römisches Eichenholz eine sehr häufige Fundgattung im Bereich archäologischen Nassholzes dar.



Abbildung 2: Probenreihe V09

2.1 KUR-Projekt

Das Projekt "Massenfunde in archäologischen Sammlungen" fand im Rahmen des "Programms zur Konservierung und Restaurierung von mobilem Kulturgut" (KUR), finanziert durch die Kulturstiftung des Bundes statt. Das Projekt umschließt zwei Teilbereiche, zum einen den Projektbereich Eisen, der durch die Archäologische Staatssammlung München. Der Projektbereich Nassholz wurde durch das RGZM koordiniert.

Für die Konservierung von archäologischem Nassholz existieren bereits einige bewährte Methoden, welche im Rahmen dieses Projektes objektiv verglichen und ausgewertet wurden. Angestrebt wurden Erkenntnisse über die Anwendbarkeit, Praktikabilität und den Kosten-

sowie Folgekosteneinsatz der Konservierungsmethoden, vor allem im Bezug auf große Fundmengen.

Das Probenmaterial bietet einen Überblick über die häufigsten archäologischen Holzarten. Durch die Festlegung einer Mindestgröße für die Probestücke, verschiedener Messungen und der Anfertigung von 3D-Scandaten sind die Probereihen vergleichbar. Jede teilnehmende Institution wurde mit vergleichbarem Probenmaterial versorgt, um das von ihnen spezialisierte Verfahren daran durchzuführen. Zurück im RGZM wurden die Ergebnisse zusammengetragen und ausgewertet, sodass die Ergebnisse nach Abschluss aller Konservierungsarbeiten auf einer Onlinedatenbank präsentiert werden können.¹

Das zur Verfügung gestellte Probenmaterial konnte in manchen Fällen die Anforderungen an die zu vergebenden Probereihen nicht erfüllen. Die Probenserie V09 wurde aufgrund der geringen Anzahl an Probestücken nicht für das KUR-Projekt verwendet. Daher wurden die Versuchsreihe 09 2008 nicht komplett dokumentiert, es liegen keine Scandaten von 2008 vor.

Reststücke oder ganze Probereihen stehen für Versuchsreihen und Studien zur Verfügung, so wurde im Jahr 2013 im Rahmen der Jahresarbeit von Frau Sandra Kaiser eine Studie über die Folgen der Langzeitlagerung von archäologischem Nassholz durchgeführt.

Die Versuchsreihe V09 dient nun dem Quellversuch an archäologischem Nassholz mit Trocknungsschäden.

3. Trocknungsschäden

Rezente Hölzer sind in der Lage, je nach Holzart, ca. 28% der Holzmasse an Wasser in den Zellwänden aufzunehmen (gebundenes Wasser). Das Wasser, das zusätzlich in die Zellhohlräume eindringt und diese völlig ausfüllen kann wird als freies Wasser bezeichnet. Das maximale Wasseraufnahmevermögen, der U_{max}-Wert stellt das prozentuale Verhältnis der Holzmasse zum aufgenommenen Wasser dar².

Der durch Abbauprozesse bedingte Verlust an Cellulose im archäologischen Nassholz führt zu einer Übertretung dieses Wasseraufnahme-Wertes für rezente Hölzer und somit zu einem "gesteigerten" Wasseraufnahmevermögen. Auf diese Weise kann über das Verhältnis der Wassermenge zur Holzmasse der Abbaugrad bestimmt werden³.

Durch falsche Lagerung können archäologische Nasshölzer erheblichen Schaden nehmen. Es können Trocknungsschäden entstehen. Dabei verdunstet zunächst das freie Wasser aus den Zellhohlräumen. Das durch die Kapillaren austretende Wasser bedingt einen

_

¹ http://www.rgzm.de/kur/index.cfm?Layout=holz&Content=start (Stand 10.01.2015).

² http://www.rgzm.de/kur/index.cfm?Layout=holz&Content=abbaugrad (Stand 10.01.2015).

³ Wittköpper 2010, 11f.

Unterdruck, der das Gefüge komprimiert. Anschließend entweicht das gebundene Wasser aus den Zellwänden und lässt die bereits geschwächte Zellstruktur endgültig kollabieren.

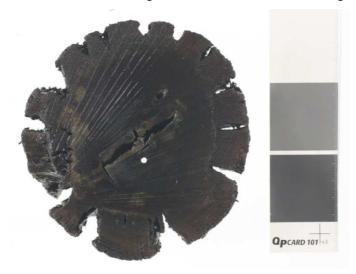


Abbildung 3: Trocknungsschäden an Probeholz V09-010 der Versuchsreihe zur Quellung (Foto M. Wittköpper)

Dies führt zu drastischen Schrumpfungen und Rissbildungen; letztere entstehen besonders in radialer Richtung (s. Abb.3). Kollabierte Bereiche im Holz können durch das Benetzen mit Wasser nicht mehr gequollen werden und gelten als irreversibel zerstört.

4. Studien zur Quellung von Hölzern

Es existieren bereits einige Studien zur Quellung von Holz im Allgemeinen und archäologischem Nassholz im Besonderen. Diese Studien wurden im Rahmen der Diplomarbeit⁴ von Frau Inga Vogel (HTW Berlin) verglichen. Die Diplomarbeit von Frau Vogel beschäftigt sich damit, eine geeignete Quellmethode zu finden, mit welcher sie mehrere Einbaumfragmente zu ihrer ursprünglichen Form und Ausdehnung rekonstruieren kann, welche durch verschiedene unglückliche Umstände komplett ausgetrocknet sind. Ihr Ziel war es, die kollabierten ursprünglichen Nassholzfragmente durch eine Quellung wieder in einen wassergesättigten Zustand zurückzuführen, um eine anschließende Konservierung durchführen und die Fragmente zusammenfügen zu können.

Beim Vergleich der verschiedenen mehr oder weniger erfolgreichen Quellmethoden, bezieht sich Frau Vogel besonders auf die Studie einer Gruppe von chinesischen Wissenschaftlern (im Folgenden JIACHANG et al. ⁵), welche unkontrolliert getrocknetes archäologisches Nassholz mit Hilfe von "aktivem Alkali-Harnstoff", einer Mischung aus Ethylendiamin, Harnstoff, einer oberflächenaktiven Substanz und PEG 200, quellen konnten.

-

⁴ Vogel 2010.

⁵ Jiachang et al. 2009.

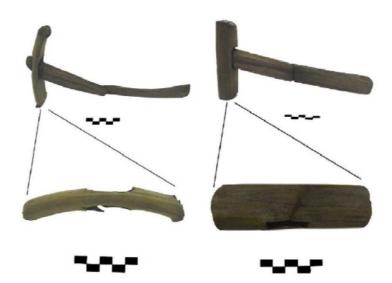


Abbildung 4: Durch die Einwirkung von "aktivem Alkali-Harnstoff" gequollener Hammer (Jiachang et al. 2009, 6)

JIACHANG et al. weisen die einzige Methode vor, die angibt, Kollapsschäden völlig rekonstruieren zu können und gleichzeitig Deformationen zu beheben (s. Abb. 4). Es heißt, ein konservierbarer, wassergesättigter Zustand des Objekts soll mit dieser Methode erreichbar sein ⁶. VOGEL testet JIACHANG et al.'s Quelllösung in unterschiedlichen Varianten an künstlich getrockneten Prüfkörpern von archäologischem Nassholz. Unter Wärmeeinwirkung bei 40°C bzw. 80°C testet sie unterschiedlich konzentrierte Ethylendiaminlösungen (EDA-Lösungen) und unterschiedlichen Einwirkzeiten, um die bestmögliche Quellwirkung zu ermitteln. Sie erzielt dabei sehr gute Ergebnisse; Risse sind nach der EDA-Behandlung geschlossen und Deformationen rekonstruiert. Jedoch beobachtet sie auch, dass das Holz weicher wird und sich während der Badlagerung dunkel verfärbt.

Nach dem Austausch der Quelllösung gegen Wasser (unter Überwachung des pH-Wertes), ist die Verfärbung jedoch wieder aus der Holzoberfläche ausgewaschen. Weiter kann keine drastische Überschreitung der Quellung über die Ursprungsdimensionen festgestellt werden. Jedoch ist durch die EDA-Behandlung eine Substanzschädigung am Holz zu verzeichnen. Dabei gilt, je höher die EDA-Lösung konzentriert ist und je länger diese einwirkt, desto stärker sind die Substanzschäden zu verzeichnen. Ein weiteres Fazit ihrer Versuchsreihe ist, dass die von JIACHANG et al. angegebenen Zuschlagstoffe Harnstoff und PEG 200 keine

-

⁶ Jiachang et al. 2009

signifikante Wirkung im Bezug auf das Quellverhalten besitzen⁷. VOGEL empfiehlt daher, auf den Einsatz dieser Zuschlagstoffe zu verzichten⁸.

4.1 Ethylendiamin

Ethylendiamin, kurz EDA, ist eine farblose Flüssigkeit und gehört zu den mittelstarken, zweiwertigen Basen. Die Summenformel lautet $C_2H_8N_2$, der Schmelzpunkt liegt bei 8°C und der Siedepunkt bei 116°C.

EDA besitzt einen sehr geringen Dampfdruck von 12hPa bei 20°C, wodurch bei Kontakt mit dem Kohlendioxid der Luft Etylendiamincarbonat gebildet wird. Das Ethylendiamincarbonat tritt als weißlicher Nebel auf. EDA ist bei 20°C in Wasser löslich, es weist eine Dichte von 0,9 g/m³ auf⁹.

Die Cellulose des Holzes wird durch Einwirkung von EDA gequellt, dabei wird das Kristallgitter der Cellulose durch eine Wechselwirkung mit den aliphatischen Diaminen des EDA geweitet. Bedingt durch diese Wechselwirkung entstehen Wasserstoffbrücken, die den Austausch gegen höhermolekulare Medien erschweren¹⁰.

Die starken basischen Eigenschaften des EDA führen jedoch gleichzeitig zu einem Abbau und einer Auswaschung von Lignin, Polysacchariden und deren Abbauprodukten. Es kommt zu einem Masseverlust¹¹.

5. Quellversuch

Anlehnend an die Studie von Frau Vogel, wird der Quellversuch an der Probenreihe V09 mit dem Quellmittel Ehytlendiamin durchgeführt. Die Unterschiede sind, dass bei der hier vorliegenden Studie kein getrocknetes Holz gequollen wird, sondern die Quellwirkung an Nassholz mit Trocknungsschäden erprobt wird, sodass die Studie dies bezogen neue Erkenntnisse bringen soll. Weiter wird auf eine Baderwärmung aus praktischen und wirtschaftlichen Gründen verzichtet. Der Empfehlung, die Zusatzstoffe Harnstoff und PEG 200 nicht zuzusetzen wird entsprochen.

8

⁷ Vogel 2010 42ff.

⁸Sie wählt zur Behandlung der Einbaumfragmente eine niedrige EDA-Konzentration bei einer Temperatureinwirkung von 40°C. Bei diesen Parametern sei der dadurch entstehende Masseyerlust.

Temperatureinwirkung von 40°C. Bei diesen Parametern sei der dadurch entstehende Masseverlust noch vertretbar.

⁹ http://www.chemie.de/lexikon/Ethylendiamin.html (Stand 14.01.2015).

¹⁰ Vogel 2010, 43.

¹¹ Vogel 2010, 44.

Die Probenreihe V09 besteht aus 18 Probekörpern vergleichbarer Ausmaße und 2 Probekörpern, die in ihren Ausmaßen stark abweichen, da es sich hier um einen verjüngenden Bereich der Pfahlspitze handelt.

Aus diesen 20 Probekörpern werden zunächst 3 Referenzproben ausgesucht. Eine Probe (V09-018) verbleibt als Vergleichsprobe für die anschließend angestrebte Konservierung im deionisierten Wasser. Eine Probe (V09-Exp.02) wird atro-getrocknet¹², um das Verhältnis zur absoluten Holzmasse zu ermitteln.

Eine weitere Probe (V09-007) wird zusammen mit den restlichen Probekörpern mit der EDA-Lösung behandelt, jedoch täglich auf optische Veränderungen und Gewichtsschwankungen hin untersucht. Vor der EDA-Behandlung wird an dieser Probe eine mikroskopische Untersuchung des Radialschnitts vorgenommen.

Vor dem Einlegen der Proben in die Badlösung, werden die Probehölzer sowohl an der Luft, als auch unter Wasser gewogen. Für den Quellversuch wurden in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung Nägel in die Hölzer eingebracht und vermessen, um Aufschluss über Dimensionsveränderungen erlangen zu können. Gleichzeitig dienen diese Nägel als Referenzpunkte für den 3D-Streifenlicht-Scan. Die Probereihe V09 wurde bereits standardmäßig während des Eingangs zum KUR-Projekt gescannt, sodass diese Daten ebenso wie eine ausführliche Fotodokumentation bereits vorliegen.

Die Hölzer werden für den Quellversuch in ein 25%iges EDA-Bad eingelegt. Wie bereits erwähnt, wird auf eine Wärmeeinwirkung verzichtet. Tägliche Messungen des pH-Wertes und der Leitfähigkeit sollen Aufschluss über die in der Quelllösung stattfindenden Veränderungen geben. Zusätzlich wird zu Analysezwecken täglich eine Probe der Lösung entnommen.

Nach 3 Wochen soll eine ausführliche Auswertung eines Zwischenzustandes durchgeführt werden, um die bis zu diesem Zeitpunkt aufgetretenen Veränderungen zu dokumentieren. Anhand dieser Zwischenergebnisse soll die Beurteilung zum weiteren Verlauf der Studie gegeben werden.

Ziel der Studie ist es, die Quellwirkung der EDA-Lösung mit den angewendeten Parametern zu erfassen und zu beurteilen. Es soll weiter geklärt werden, ob eine Quellwirkung über die Ursprungsdimensionen erreicht wird und wie gut sich die EDA-Lösung wieder aus den Probekörpern heraus waschen lässt. Anschließend soll erprobt werden, ob eine Konservierung der gequollenen Proben möglich ist.

-

¹² siehe 5.1.5

5.2 Vorbereitende Messungen

Um eine umfassende Beurteilung des Quellversuchs durchführen zu können wird eine ausführliche Dokumentation des Vorzustands der Probehölzer angefertigt. Durch Wägung der Proben an der Luft und Unterwasser wird der Abbaugrad bestimmt und das anfängliche Wassergehalt-Holzmasse-Verhältnis festgehalten. Durch Aufnahme der Nadelmaße und der Anfertigung von 3-D-Scans können Dimensionsveränderungen erfasst werden. Eine ausführliche Fotodokumentation hält zusätzlich die optischen Veränderungen durch die Quellung fest, indem die Probehölzer vor und nach der Behandlung von allen Seiten fotografiert werden. Eine mikroskopische Untersuchung von Radialschnitten an einer Referenzprobe soll gegebenenfalls den Abbauprozess des EDA in der Holzstruktur aufzeigen.

Im Folgenden werden die einzelnen vorbereitenden Messungen und Dokumentationsarbeiten noch einmal eingehender erläutert.

5.1.1 Wägung und Bestimmung des Abbaugrades

Zur Ermittlung des Gewichts, des Abbaugrades und des Volumens der Proben werden diese gewogen. Durch Wägung des Holzes an der Luft und unter Wasser kann der Wassergehalt der Holzprobe und die noch vorhandene Holzmasse, sowie das Volumen des Holzes berechnet werden. Es ist gleichzeitig eine zerstörungsfreie Methode um den Abbaugrad des Holzes zu bestimmen.

Zur Wägung der Proben an der Luft wird das Holz aus dem Wasserbad genommen und trocken getupft, um das Messergebnis nicht durch das zusätzliche Wasser zu verfälschen. Das Gewicht der Holzprobe wird dann mit einer digitalen Waage ermittelt. Es gibt das Gesamtgewicht des Probekörpers an, das heißt Holzmasse plus Wassers, welches sich im Holz befindet.

Zur Wägung der Proben unter Wasser wird eine Wäge-Vorrichtung zu Hilfe genommen. Dazu wird die digitale Waage mit einem Drahtkorb verbunden, der in einem Wasserbehälter hängt. In diesen können die Holzproben eingelegt werden, wobei die digitale Waage das Gewicht der Probe bestimmt (s. Abb. 5).



Abbildung 5: Wägevorrichtung zur Ermittlung des Unterwassergewichts (Foto: W. Muskalla)

Durch die bekannten Dichten des Wassers (1g/cm³) und des Holzes (1,5g/cm³) kann anhand der beiden Wägungen das Volumen des Holzes und dessen Holzmasse berechnet werden. Dabei gilt 1cm³ Holz kann 1g Wasser verdrängen, sodass das Gewicht des verdrängten Wassers dem Volumen des Holzes entspricht¹³.

Das Volumen des Holzes wird wie folgt berechnet:

Volumen = Nassgewicht (g) - Unterwassergewicht (g) = g Wasser = cm^3 Holz

Am Beispiel des Probekörpers V09-001 bedeutet das:

V = 1365,8 g (Nassgewicht) - 164,2 g (Unterwassergewicht) = 1201,6 g = 1201,6 cm³ Der Probekörper V09-001 besitzt also ein Volumen von 1201,6 cm³.

Die Bestimmung des Abbaugrades erfolgt über die Berechnung des Wertes für das maximale Wasseraufnahmevermögen des wassergesättigten Holzes, dem U_{max} -Wert.

Der U_{Max}-Wert kann mit Hilfe des Trockengewichts der Probe ermittelt werden, dabei muss die Probe jedoch im Ofen komplett getrocknet werden und wird dadurch zerstört.

Eine andere Herangehensweise ist die Berechnung über das Unterwassergewicht, welche eine zerstörungsfreie Methode darstellt. Wird das Unterwassergewicht mit 3 multipliziert, stellt dieser Wert das Gewicht der Holzmasse dar und entspricht somit dem Trockengewicht der Probe.

-

¹³ Wittköpper 2010, 29.

Das maximale Wasseraufnahmevermögen (U_{max}), also das Verhältnis des Wassergehaltes zur Holzmasse, kann dadurch mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$Umax~in~\% = \frac{Nassgewicht - 3*Unterwassergewicht}{3*Unterwassergewicht}*100$$

Am Beispiel des Probekörpers V09-001 bedeutet das:

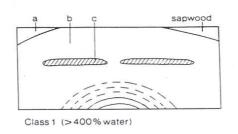
$$U_{\text{max}} = \frac{1365,8g-3*164,2g}{3*164,2g} *100 = 177,3 \%$$

Das maximale Wasseraufnahmevermögen des Probekörpers beträgt also 177,3% im Bezug zur erhaltenen Holzmasse. Dabei gilt, je mehr Holzmasse in der Holzstruktur abgebaut ist, desto mehr Wasser kann in den beschädigten Zellen aufgenommen werden, sodass der U_{max} bei steigendem Holzmasseverlust steigt.

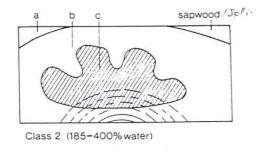
Dieses Verhältnis wird in drei Abbaugrade klassifiziert:

Abbaugrad nach de Jong:14

(a = Splintholzbereich, b = abgebautes Holz, c = rezente Bereiche, "sapwood"=Splintholz)



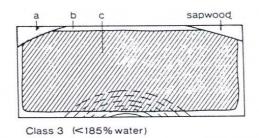
Gruppe 1: U_{max} > 400 % Stark bis komplett abgebaut



Gruppe 2: 185 – 400 % Randbereich abgebaut, Kern noch erhalten

-

¹⁴ Wittköpper 2010, 28.



Gruppe 3: < 185 % Schwach (nur Randbereich) abgebaut

Das Probeholz V09-001 mit einem U_{max} von 177,3% kann also vor der Behandlung mit der EDA-Quelllösung dem Abbaugrad 3 zugeordnet werden. Nach der EDA-Behandlung sollen diese Werte erneut ermittelt werden um die Veränderungen erfassen zu können.

5.1.2 Nagelmaße

Holz besitzt ein Quell- sowie Schwindverhalten in drei unterschiedliche Richtungen, die radiale, die tangentiale und die longitudinale Richtung. Um eine mögliche Dimensionsveränderung während der Quellung in alle Richtungen einzeln dokumentieren zu können, werden diese Richtungen vermessen.



Abbildung 6: Vermessung der Nagelmaße

Im Rahmen des KUR-Projektes wurden alle Holzprobekörper mit kleinen Edelstahlnägeln versehen, welche Strecken in die verschiedenen Richtungen abmessen lassen. So konnten die Maße von Nagel zu Nagel mit Hilfe eines digitalen Messschiebers in mm (auf 2 Stellen hinter dem Komma genau) genommen werden, um diese nach einer Behandlung mit den erneut gemessenen Werten vergleichen zu können (s. Abb. 6). Bei dieser Werteermittlung kann es jedoch zu Messungenauigkeiten kommen, da die Nägel im z.T. weichen Holz durch den Druck, der vom Messschieber ausgeübt wird, in ihrer Position abweichen können.

5.1.3 Scannen

Im Rahmen des KUR-Projektes kam es zu einer Kooperation zwischen dem RGZM und dem Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik der Hochschule Mainz (i3mainz), um ein modernes Verfahren der Dokumentationstechnik an den antiken Nasshölzern zu erproben.

Der 3D-Scan stellt im Vergleich zur Messung der Nagelabstände mittels Messschieber eine wesentlich genauere Methode dar. Es wird nicht nur berührungslos die Formveränderung des Holzes in radialer tangentialer und longitudinaler Richtung als Kenngrößen aufgenommen, es kann zudem jede kleinste Oberflächenveränderung erfasst werden. So wird zum einen der Vorzustand dokumentiert und zum anderen ein virtuelles dreidimensionales Modell erstellt, an dem mit einem Computerprogramm jede beliebige Strecke gemessen werden kann.

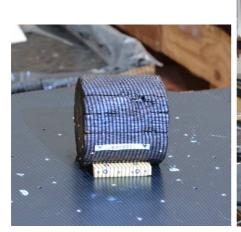




Abbildung 7: links Streifenlicht auf einem Probeholz; rechts Streifenlichtscanner Atos III während des Scanvorgangs

Für den Scanvorgang werden die Holzproben auf einem mit Referenzpunkten versehenen Drehtisch positioniert und mit einem Streifenlichtprojektor (Atos III der Firma GOM) aufgenommen (s. Abb. 7). Drehtisch und Projektor sind dabei durch eine Kalibrierung im Bezug auf Kamerawinkel und Messvolumen aufeinander eingestellt. Die beiden Kameras des Streifenlichtprojektors erzeugen ein Streifenmuster auf der Objektoberfläche, diese werden als 3D-Oberflächenpunkte mit einem Punktabstand von 0,25mm an das Verarbeitungssystem des Scanners übertragen¹⁵.

_

¹⁵ Cramer 2014.

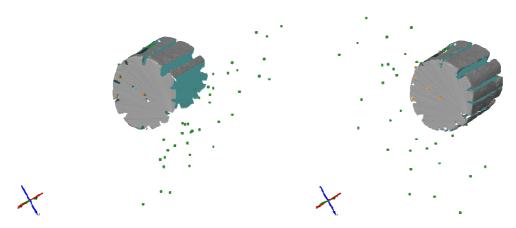


Abbildung 8: Messprojekt 1 und 2 des Probeholzes; grüne Punkte stellen die Referenzpunkte des Drehtisches und orange Punkte die Referenzpunkte des Holzes dar (Abbildungen A. Cramer)

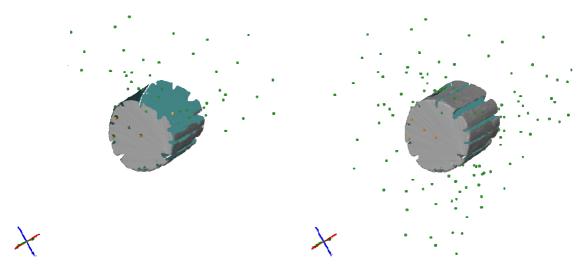


Abbildung 9: links Messprojekt 3; rechts Transformation der drei Messprojekte zu einem vollständigen Modell (Abbildungen A.Cramer)

Die Hölzer des Quellversuchs wurden in 3 Messprojekten mit jeweils 6-8 Messungen aufgenommen. Für jedes Messprojekt wurde das Probeholz auf dem Drehtisch in eine andere Position gebracht, um die Spalten und Risse des Holzes möglichst präzise erfassen zu können. Die in die Holzproben eingeschlagenen Messnägel dienen dabei als Referenzpunkte. Anhand der Referenzpunkte des Drehtisches und der Hölzer können die aufgenommenen Messprojekte im System übereinander gelegt, sprich transformiert, werden (s. Abbildungen 8 und 9)¹⁶.

.

¹⁶ Cramer 2014

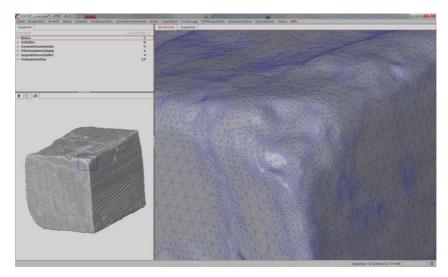


Abbildung 10: Dreiecksvermaschung (Polygonisierung) der Oberfläche dargestellt in der Systemsoftware von ATOS (Abbildung A. Cramer)

Für die Darstellung der Objektoberfläche polygonisiert die Auswertesoftware von ATOS die aufgenommenen Punkte zu Dreiecken die durch Vermaschung der Dreiecke ein Oberflächennetz abbildet (s. Abb. 10). Dabei gilt, je kleiner der Punkteabstand und somit die Dreiecksgröße des Netzes, desto genauer kann die Oberfläche des Objektes dargestellt werden.

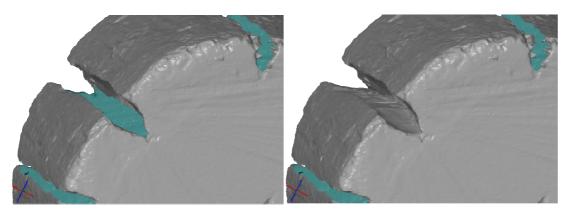


Abbildung 11: links Oberflächeninformationen der Spalten unvollständig; rechts automatisierte und damit verfälschte Oberflächeninformation (Abbildungen A. Cramer)

Die Oberflächenbereiche der, durch Trocknungsschäden entstandenen tiefen Risse und Spalten der Probehölzer konnten vom Streifenlichtscanner nicht völlig erfasst werden.

Eine vom System automatisierte Schließung der Bereiche würde zu enormen Verfälschungen der Oberflächendaten bzw. -informationen führen. Darüber hinaus würden die geschlossenen Löcher des Oberflächennetzes dabei nicht von den originalen Bereichen zu unterscheiden sein (s. Abb. 11).

Aus diesem Grund wurde auf eine automatische Schließung der Bereiche verzichtet, um eine realistische Oberflächendarstellung zu gewährleisten¹⁷.

.

¹⁷ Cramer 2014

5.1.4 Mikroskopische Untersuchungen

Durch die Studien von JIACHANG et al. und VOGEL ist bekannt, das Ethylendiamin einen Abbauprozess der Holzsubstanz bewirkt. Um die Veränderungen der Zellsubstanz dokumentieren zu können wird von der Referenzprobe V09-007 eine mikroskopische Untersuchung des Radialschnitts im Bereich eines Risses vor und nach der Behandlung durchgeführt. Um die Veränderung vergleichbar zu machen wurde diese Stelle markiert an der die Probe genommen wurde. Es folgt eine Erläuterung der Probenherstellung:

Zur Anfertigung der Radialschnitte wird eine scharfe Rasierklinge verwendet. Die Schnitte sollten möglichst dünn hergestellt werden, da eine Überlagerung mehrerer Zellschichten die Bestimmung unter dem Durchlichtmikroskop deutlich erschwert. Darüber hinaus sollte an archäologischen Nassholzobjekten der Substanzverlust durch die Probenerzeugung so gering wie möglich gehalten werden.

Die angefertigten Proben werden zur Analyse auf einem mit Wassertropfen benetzten Probenträger platziert und mit Deckgläsern versehen. Unter dem Durchlichtmikroskop können die Proben anschließend mit unterschiedlichen Vergrößerungen analysiert werden.

5.1.5 atro-Trocknung

Zur Überprüfung des Wassergehalts der Hölzer wird ein Probekörper als Referenzprobe atro- (absolut trocken) oder auch Darr-getrocknet. Ein Holz ist atro-trocken oder Darrtrocken wenn es absolut keine Holzfeuchte mehr besitzt. Das darrtrockene Holz stellt somit die reine Holzmasse dar¹⁸.

Um jegliche Feuchtigkeit aus dem Holz auszutreiben wird das Holz bei 105°C im Wärmeschrank getrocknet, damit auch das gebundene Wasser aus den Zellwänden verdampfen kann.

Beim Probeholz V09-Exp.02 wurde das Holz vor der Wärmeschrankbehandlung zunächst an der Luft trocknen gelassen. Dieser Trocknungsprozess wurde durch Fotoaufnahmen in einem Intervall von 15 Minuten festgehalten (s. Abb. 12).

Im Anschluss wurde das Holz etwa 24 Stunden im Wärmeschrank bei 105°C atro-getrocknet.

_

¹⁸ Wittköpper 2010, 12.



Abbildung 12: Luftgetrocknete Referenzprobe V09-Exp.02, schwarzer Umriss zeigt den wassergesättigten Zustand an

Die Referenzprobe V09-Exp.02 besaß vor der Trocknung ein Nassgewicht von 484,8g, ein Unterwassergewicht von 46,8g und einen U_{max} von 245,3%.

Berechnet man nun Holzmasse und Wasseranteil der Probe ergeben sich folgende Werte:

 $3 \times 46,8g = 140,4g \text{ (Holzmasse)}$

Nassgewicht - Holzmasse = 484,8g - 140,4g = 344,4g (Wasseranteil)

Vergleicht man nun den berechneten Wert der Holzmasse von 140,4g mit dem Ergebnis der Wägung des atro-getrockneten Holzes von 141,3g, lässt sich feststellen, dass die Werte fast übereinstimmen. Berechnet man nun im Umkehrschluss die Holzfeuchte des Holzes im wassergesättigten Zustand anhand des Trockengewichts, sollte dieser Wert sich dem U_{max} ebenso annähern.

Holzfeuchte u in % =
$$\frac{\text{Nassgewicht-Trockengewicht}}{\text{Trockengewicht}} * 100 = \frac{484,8-141,3}{141,3} * 100 = 243,01$$

Auch bei dieser Überprüfung bestätigen die Werte der Berechnung nach der Trocknung die vor der Trocknung ermittelten Werte.

5.2 Ansetzen der Quelllösung und Einlegen der Probehölzer

Zur Quellung der Hölzer wurden 40L einer 25%igen Ethylendiamin-Lösung angesetzt. Dazu wurden 10L 100%iges Ethylendiamin mit 30L deionisiertem Wasser in einer Plastikwanne gemischt.

Beim Öffnen des Ethylendiamin-Behälters entwich sofort ein weißer Nebel aus Ethylendiamincarbonat und ein stechender Ammoniakgeruch breitete sich aus. Daher wurde

die Quelllösung im Außenbereich zusammengemischt. Zunächst wurden 30L Wasser in die Plastikwanne gegeben und anschließend mittels Saugheber 10L Ethylendiamin abgemessen und dem Wasser beigemischt.



Abbildung 13: Einlegen der Probehölzer in die Quelllösung, Bildung von weißem Ethylendiamincarbonat-Nebel

Da Ethylendiamin eine sehr starke Lauge ist, sollte im Umgang hiermit Wert auf geeignete Schutzkleidung gelegt werden ¹⁹. Die Ethylendiamin-Wasser-Lösung zeigte neben der Nebelbidung auch eine starke Hitzeentwicklung; die Temperatur stieg auf 50°C an.

Um eine Veränderung des Quellbades dokumentieren zu können, wurden die Dichte, der pH-Wert und der Leitwert des Bades gemessen.

Die Dichte konnte mit dem vorhandenen Aerometer (Dichtemessgerät) nicht ermittelt werden, da dieses den Dichtebereich der Lösung nicht abdeckt (unter 1). Daher musste die Dichte rechnerisch ermittelt werden.

Die Dichte von Ethylendiamin ist bekannt und beträgt 0,9g/ml, die Dichte von Wasser 1,0g/ml sodass sich bei einer Mischung von 1 Teil Ethylendiamin und 3 Teilen Wasser, für die Lösung eine Dichte von 0,975g/ml ergibt.

Der mit einem Leitwertmessgerät festgestellte Leitwert lag bei 610µS und der gemessene pH-Wert bei 12,3.

Nach den erfolgten Messungen wurden die Hölzer der Versuchsreihe V09 in das Ethylendiamin-Wasser-Bad eingelegt (s. Abb. 13). Um einen Schmutzeintrag in das Bad und ein Verdunsten der Lösung zu verhindern wurde diese mit einer PE-Folie und einem zusätzlichen Deckel abgedeckt.

¹⁹ siehe auch Sicherheitsdatenblatt Ethylendiamin im Anhang

5.3 Beobachtungen und tägliche Messungen

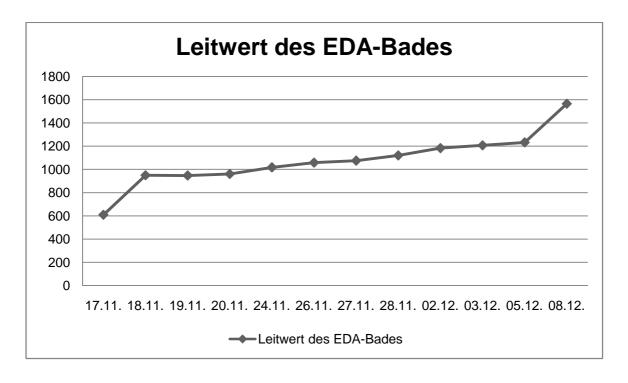
Es erfolgte eine Überwachung des Quellversuchs, indem das Bad täglich auf den Leitwert und den pH Wert hin überprüft wurden, sowie täglich eine Wägung der Referenzprobe V09-007 vorgenommen wurde. Um die Messungen des pH-Wertes und des Leitwertes vergleichbar zu machen, wurde immer an derselben Stelle gemessen.

Schon nach 24 Stunden hatte sich das Bad von einer farblosen, in eine dunkelbraun bis schwarze Flüssigkeit verwandelt. Dies lässt darauf schließen, dass ein Auswaschungsprozess des Holzes stattgefunden haben muss, der eine Färbung des Bades bedingt hat. Durch die Messungen der Werte wird diese These unterstützt.

Ein Leitwert gibt die elektrische Leitfähigkeit eines Stoffes an. Diese Leitfähigkeit ist abhängig von der Zahl darin enthaltener beweglicher Ionen. Die tägliche Messung des Leitwerts soll somit einen Aufschluss darüber geben, ob durch Auswaschungsprozesse Ionen aus dem Holz in das EDA-Bad gelangen und in welchem Ausmaß.

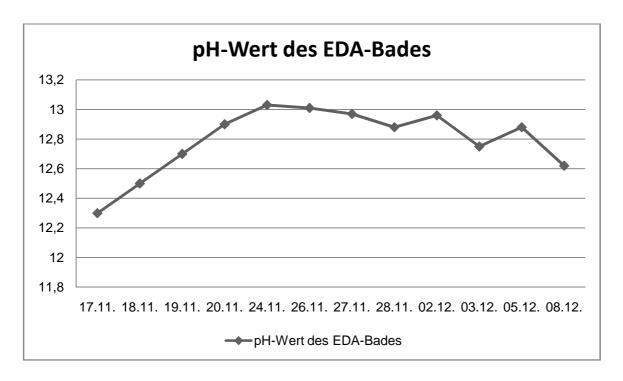
Der Leitwert stieg innerhalb von 24 Stunden bereits von 610µS auf 950µS an, sodass die These einer Auswaschung damit belegt werden konnte.

Innerhalb von 3 Wochen stieg der Leitwert auf 1566µS an und hat sich somit in dieser Zeit deutlich mehr als verdoppelt (s. Diagramm "Leitwert des EDA-Bades").

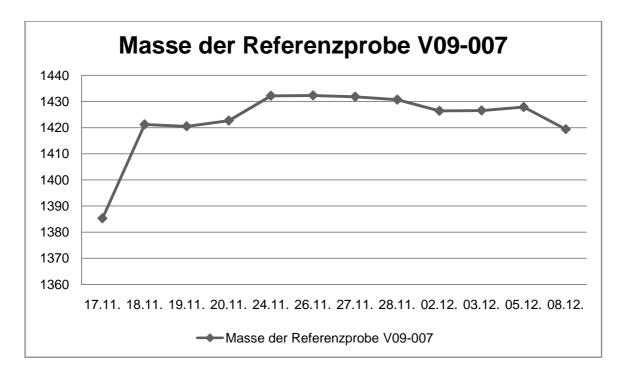


Die tägliche Messung des pH-Werts des EDA-Bades ergab zunächst einen leichten Anstieg von 12,3 auf 13,0 und sank dann wieder auf einen pH von 12,6 ab (s. Diagramm "pH-Wert des EDA-Bades"). Nimmt man an, dass das Wasser aus dem Holz sich mit der EDA-Lösung

vermischt, sollte der pH-Wert der Lösung sinken. Das EDA bringt in der Holzsubstanz jedoch Abbauprozesse in Gang, die den pH-Wert zunächst ansteigen lassen, das heißt der Anstieg ist durch die Hydrolyse der Polysaccharide bedingt²⁰.



Am erstaunlichsten war der enorme Anstieg der gewogenen Masse des Probekörpers. Vor der EDA-Behandlung wog die Referenzprobe V09-007 1385,3g, nach 24 Stunden im EDA-Bad wog es bereits 1421,2g, was einen Anstieg von fast 36g bedeutet.



²⁰ Fengel / Wegener 2003, 296ff.

_

Beachtet man, dass durch das Eindringen der EDA-Lösung mit einer Dichte von 0,975g/ml das Holz im Austausch gegen das Wasser mit einer Dichte von 1g/ml, eigentlich leichter werden müsste, ist dieser Anstieg doch überraschend.

Der Anstieg kann nur dadurch erklärt werden, dass kollabierte Zellbereiche des Holzes durch eine Quellung mit EDA regeneriert und mit der Badlösung gefüllt wurden.

Innerhalb von 3 Wochen stieg der Wert der gewogenen Masse zunächst auf 1431g an und nahm dann wieder etwas ab, sodass er zum Schluss einen Wert von 1420g besaß (s. Diagramm "Masse der Referenzprobe V09-007").

Neben der Wägung war auch eine optische und eine haptische Veränderung der Referenzprobe zu verzeichnen. Die Oberfläche des Holzes färbte sich analog zum Bad in ein sehr dunkles Braun. Zudem wurde das Holz über den Zeitraum der 3 Wochen hinweg immer weicher und druckempfindlicher.

6. Zwischenresultate nach 3 Wochen

Nach 3 Wochen in der EDA-Lösung werden die Hölzer für ein Zwischenresultat erneut gemessen, gewogen, fotografiert, mikroskopiert und gescannt.

Die ermittelten Nagelmaße weichen bei der Messung kaum von den Anfangswerten ab. Dabei ist eine genaue Messung jedoch beeinträchtigt, da die Nägel durch die stark erweichte Holzsubstanz instabil im Holz sitzen.

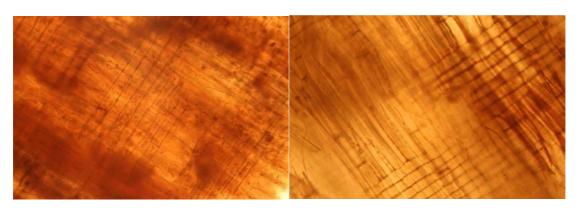


Abbildung 14: links: Radialschnitt vor der EDA-Behandlung; rechts: Radialschnitt nach 3 Wochen in der Quelllösung

Der Vergleich der mikroskopischen Aufnahmen des Radialschnitts an der Referenzprobe V09-007 vor und nach der EDA-Behandlung lässt keine nennenswerten Veränderungen der Zellstruktur erkennen (s. Abb. 14). Die Aufnahme nach der Quellung macht einen leicht ausgewaschenen bzw. verschwommenen Eindruck, dies könnte auf die Auswirkungen der

starken Lauge zurückzuführen sein. Jedoch kann dieser Effekt auch durch eine unterschiedlich dicke Probenpräparation oder durch unterschiedliche Einstellungen des Durchlichtmikroskops bedingt sein.

Bei der Auswertung der Scandaten war eine deutlichere Veränderung zu verzeichnen, legt man die beiden Scans übereinander wird eine starke Quellung in radialer und tangentialer Richtung sichtbar (s. Abb. 15 und 16).

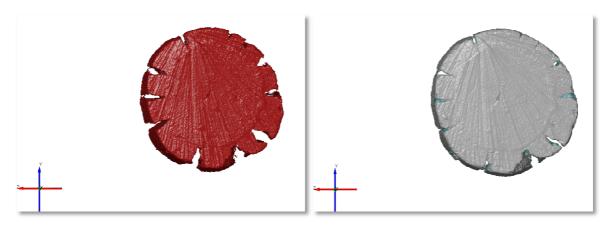


Abbildung 15: V09-010 links: Scan vor der EDA-Behandlung; rechts: Scan nach der EDA-Behandlung



Abbildung 16: V09-010 Beide Scans übereinander gelegt, deutlich sichtbar die gequellten grauen Bereiche im Randbereich

Fertigt man einen virtuellen Schnitt durch die übereinanderliegenden Scans an und markiert die Veränderungen mit einer Farbskala, so werden die Dimensionsveränderungen in den Randbereichen des Holzes noch einmal deutlicher (s. Abb. 17).

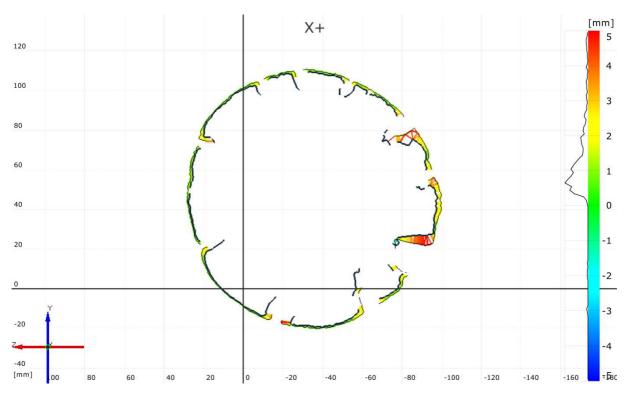


Abbildung 17: V09-010 Schnitt durch die Probe; Dimensionsveränderungen farblich skaliert

Die Ergebnisse der neuen Wägungen zeigten ebenso deutliche Veränderungen. Es ist jedoch auch festzuhalten, dass die Wägung unter Wasser mit einem enormen Substanzverlust einherging, dadurch dass die stark geschädigten Oberflächenfasern der Probekörper im Wasser extrem abschwemmten.

6.1 "Nassgewicht" und "Unterwassergewicht"

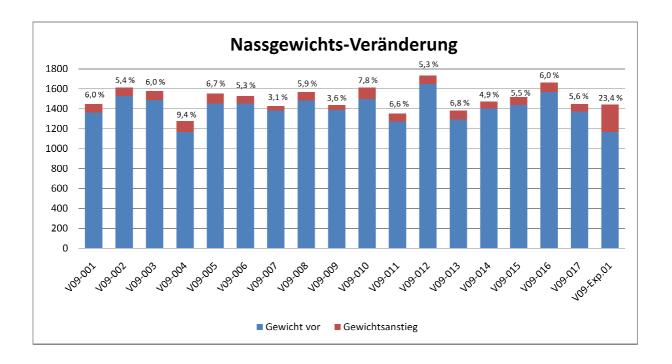
Wägung an der Luft:

Wie schon während der 3 Wochen an der Referenzprobe eine Masseveränderung bei der Wägung an der Luft zu beobachten war, stellt sich diese Veränderung auch für die restlichen Proben heraus. Wie bereits erwähnt, sollte durch den Austausch des Wassers gegen die leichtere Badlösung in der Holzstruktur, eine negative Gewichtsveränderung zu verzeichnen sein. Durch die Quellung und dadurch bedingte Erschließung kollabierter Bereiche konnte mehr Lösung in die Holzzellen eindringen, sodass es zu einem Gewichtsanstieg kommen konnte (vgl. Diagramm "Nassgewichts-Veränderung").

Der stärkste Massezuwachs beträgt 273g, gemessen an der Probe V09-Exp.01., dies bedeutet einen Massezuwachs von 23,4% bezogen auf die Anfangsmasse. Die Probe V09-Exp.01 weicht in ihren Ausmaßen stark von den übrigen Probekörpern ab, sodass ein direkter Vergleich nicht gezogen werden kann.

Der stärkste Massezuwachs innerhalb der vergleichbaren Probekörper beträgt 117,5g, gemessen an der Probe V09-010. Der stärkste Zuwachs in % bezogen auf die Anfangsmasse stellt das Wägeergebnis von Probe V09-004 dar, dieser beträgt 9,4%.

Im Mittel ist bei der Wägung der Proben an der Luft eine Masseveränderung von 93,7g zu verzeichnen, wenn man die Probe V09-Exp.01 in die Berechnung mit einbezieht. Ohne die Probe V09-Exp.01 liegt der durchschnittliche Massezuwachs bei 83,1g.



Wägung unter Wasser:

Das dreifache "Unterwassergewicht" entspricht der reinen Holzmasse. Die reine Holzmasse sollte sich auch durch aufquellen kollabierter Bereiche nicht verändern, sondern stellt eine Konstante dar. Durch Wägung der Proben unter Wasser ist jedoch eine negative Veränderung der Masse zu verzeichnen. Dies kann nur mit einem Verlust an Holzmasse zu erklären sein, da die Masse der Quelllösung für die Wägung irrelevant ist.

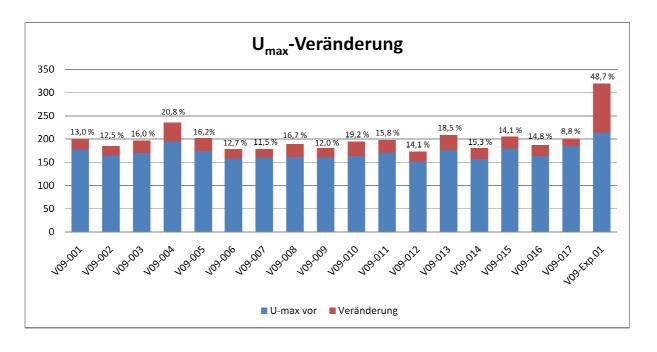
Es ist aus den Publikationen von JIACHANG et al. und VOGEL bekannt, dass EDA einen Substanzverlust im Holz bedingt. Dies kann auch für die in diesem Quellversuch untersuchten Proben bestätigt werden. Im unten abgebildeten Diagramm ist die Veränderung der gewogenen Masse aufgeführt und die prozentuale Veränderung im Bezug auf die Anfangsmasse unter Wasser (vgl. Diagramm "Unterwassergewichtveränderung").

Die stärkste Masseabnahme verzeichnete der Probekörper V09-016 mit einer Abnahme von 10,4g, in Prozent im Bezug auf die anfängliche Wägung stellt dies eine Veränderung von 5,1% dar. Betrachtet man alle Proben bedeutet dies im Mittel eine negative Veränderung von 6g was in Prozent ausgedrückt den Wert 3,5% ergibt.



6.2 U_{max}

Der U_{max} gibt das maximale Wasseraufnahmevermögen des Holzes an. Durch das Erschließen kollabierter Bereiche, kann vom Holz nun mehr Wasser bzw. Lösung aufgenommen werden; der U_{max} steigt dementsprechend (vgl. Diagramm " U_{max} -Veränderung"). Das Verhältnis des Wassergehaltes zur Holzmasse hat sich verändert (vgl. Berechnungen Seite 12). In einigen Fällen hat dies auch zur negativen Veränderung des Abbaugrades von 3 auf 2 geführt.



Der stärkste U_{max} -Anstieg innerhalb der vergleichbaren Proben wurde für die Probe V09-004 berechnet und liegt bei 40,6, was einen prozentualen Anstieg von 20,8% im Bezug auf den Anfangswert bedeutet.

Die Probe V09-Exp.01, die in ihren Ausmaßen stark von den übrigen Proben abweicht, erreicht sogar einen Anstieg von 104,7, was 48,7% zum Ausgangswert beträgt.

Im Durchschnitt ist innerhalb der vergleichbaren Proben ein Anstieg von 25,1 zu verzeichnen, was in Prozent eine Veränderung von 14,8 bedeutet.

6.3 Volumenzuwachs

Anhand der Betrachtung der Scandaten und der Vor- und Zwischenzustandsfotos wird eine Quellung und ein damit einhergehender Volumenzuwachs deutlich. Nun stellen diese jedoch keine greifbaren Daten und Zahlen dar, die man miteinander vergleichen könnte. Die Scandaten erlauben hierbei keinen Vergleich des Volumens, da sie keine geschlossene Oberflächen-Vermaschung (s. Abb. 11) besitzen.

Der Volumenzuwachs kann jedoch auch durch Berechnungen der ermittelten Werte in Zahlen ausgedrückt werden. Den Berechnungen liegt die Überlegung zugrunde, dass die reine Holzmasse der Proben als Konstante betrachtet werden kann und der Vergleich des Volumens über den Wassergehalt erfolgt.

Dazu werden zunächst die Wasser- und Lösungsgehalte der Proben vor und nach der EDA-Behandlung aus den Wägungen berechnet. Anhand des Anfangsgehaltes der Probe kann daraufhin berechnet werden, welche Menge EDA-Lösung (ohne Berücksichtigung der Quellung) in das Holz eindringen könnte.

Zunächst die Berechnung des Wassergehalts der Proben vor der EDA-Quellung. Durch die folgende Formel kann der prozentuale Wasseranteil in der Wägung an der Luft ermittelt werden:

$$\frac{\textit{Umax}}{(100+\textit{Umax})} * 100\% = \text{Prozent an Wasser vom Nassgewicht}$$

Am Beispiel der Probe V09-001 bedeutet das einen Wassergehalt von 63,94%:

$$\frac{177,3}{(100+177,3)} * 100\% = 63,94\%$$

Mit diesem Wert kann nun die Masse und somit auch das Volumen des aufgenommenen Wassers berechnet werden. Er beträgt im Beispiel der Probe V09-001 873,3 g bzw cm³: 63,94% * 1365,8g (*Nassgewicht*) = 873,29g (*Wassergehalt*)= 873,3cm³

Beachtet man nun, dass die EDA-Lösung eine geringere Dichte besitzt als Wasser stellt sich die Frage, wie viel EDA könnte die Probe (ohne Quellung) aufnehmen? Dazu wird das ermittelte Anfangsvolumen des Wassers mit der Dichte der EDA-Lösung multipliziert und man erhält die Menge an EDA-Lösung die das Holz im Vorzustand aufnehmen kann. Das bedeutet für die Probe V09-001 eine Lösungsmenge von 851,5g.

$$873,29 \text{ cm}^3 * 0,975\text{g/cm}^3 = 851,46\text{g}$$

Führt man nun die Berechnungen mit den Werten der Wägung nach der EDA-Behandlung durch wird schnell klar, dass durch die Quellung kollabierter Bereiche der zuvor ermittelte Wert von dem nun berechneten Wert abweicht:

$$\frac{200,4}{(100+200,4)}$$
 * $100\% = 66,71\%$
 $66,71\%$ * $1448g$ (*Nassgewicht*) = $965,96g$ (*Lösungsgehalt*)

Anstatt der berechneten 851,46g, stellt der ermittelte Gehalt an EDA-Lösung nun einen Wert von 966g dar.

Berechnet man nun die Differenz aus den beiden Werten, erhält man den Wert des Massezuwachs durch Quellung mit der EDA-Lösung:

$$965,96g - 851,46g = 114,5g$$

Um den Volumenzuwachs zu ermitteln, muss nun noch die berechnete Masse durch die Dichte der EDA-Lösung geteilt werden:

$$\frac{114,5g}{0,975g/cm^3} = 117,44cm^3 \text{ Volumenzuwachs}$$

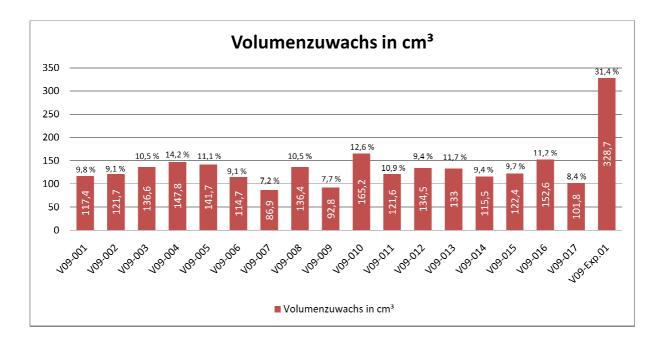
Die Quellung durch die EDA-Lösung hat also im Beispiel der Probe V09-001 einen Volumenzuwachs von 117,4cm³ erreicht.

Im Bezug auf das Anfangsvolumen bedeutet dass einen Zuwachs von 9,77%:

$$V_{\text{Holz vor}} = 1365,8g \text{ - } 164,2g = 1201,6g = 1201,6cm^3$$

$$\frac{117,44cm^3}{1201,6cm^3}*100\% = 9,77\% \text{ Volumenzuwachs}$$

Im folgenden Diagramm "Volumenzuwachs in cm³" sind die so berechneten Werte für den Volumenzuwachs für jede einzelne Probe aufgetragen und um den Wert des prozentualen Volumenzuwachses ergänzt. Im Durchschnitt ergab der Volumenzuwachs einen Wert von 137,3 cm³ und einen prozentualen Zuwachs von 11,3%.

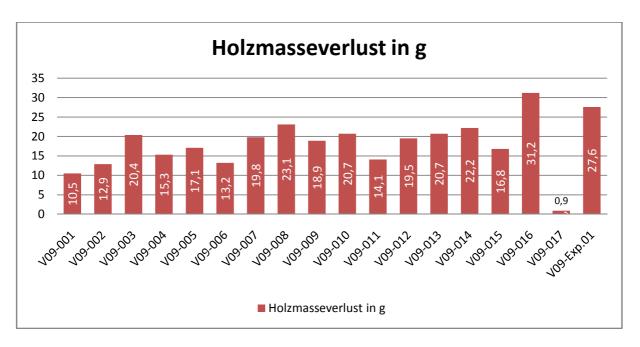


6.4 Holzmasseverlust

Wie bereits durch die vergleichende Wägung der Probemasse unter Wasser festzustellen war, unterscheiden sich die ermittelten Werte vor und nach der EDA-Behandlung.

Aus den Werten der Unterwasserwägung können durch das Multiplizieren mit dem Faktor 3, die Werte für die reine Holmasse berechnet werden.

Im Beispiel der Probe V09-001 kann dabei für die Holzmasse vor der EDA-Behandlung ein Wert von 492,6g (3x164,2) und nach der Behandlung ein Wert von 482,1g (3x160,7g) bestimmt werden. Die Differenz der beiden Werte beschreibt somit die Masseabnahme von 10,5g und gibt den Verlust an Holzsubstanz der Probe V09-001 an.



Im vorangehenden Diagramm sind für die einzelnen Proben die ermittelten Werte für den Verlust an Holzmasse in g aufgetragen.

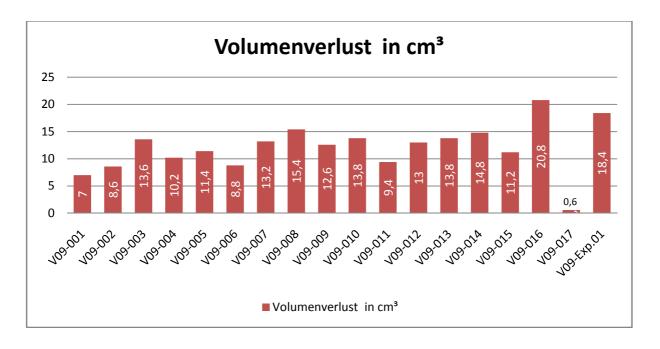
Der Substanzverlust kann darüber hinaus auch als Volumenverlust in cm³ wiedergegeben werden (vgl. Diagramm "Volumenverlust in cm³").

Der Holzmasse-Verlust der Probe V09-001 beträgt 10,64g, um den Volumen-Verlust zu berechnen wird der Holzmasse-Verlust durch die Holzdichte geteilt:

$$\frac{10,46g}{1,5g/cm^3} = 6,79cm^3$$

Probekörper V09-001 hat während der EDA-Behandlung somit einen Volumenverlust von 6,79cm³ erlitten.

Der Holzmasseverlust ist nicht nur durch Abbauprozesse im Holzinneren zu verzeichnen, sondern schließt auch das Abschwemmen von Holzfasern aus den Randbereichen mit ein. Die hier aufgetragenen Werte der verlorenen Holzmasse und des Verlustes an Volumen bilden die Summe dessen.



7. Fazit

Die Studie zur Quellung von archäologischem Nassholz mit Trocknungsschäden mittels EDA-Lösung hat eine deutliche Quellung der Probenreihe bewiesen.

Betrachtet man den Aufwand der eingesetzten Mittel, sei es Materialaufwand²¹ oder auch der Zeitaufwand zur Betreuung des Quellversuchs, ist dieser doch verhältnismäßig gering²².

Sodass auch die vergleichenden Messungen ohne großen Aufwand realisierbar und somit auch für größere Fundmengen praktikabel wären. Wie diese Studie beweist ist für den gewünschten Quelleffekt keine höhere Konzentration oder eine Temperaturerhöhung nötig.

Die Quellwirkung ist mit den hier zusammengetragenen Zwischenmessungen bereits nach 3 Wochen erwiesen und zeigt zum Teil enorme Resultate.

Dies soll anhand des Beispiels der Probe V09-004 hier noch einmal zusammengefasst werden:

Zunächst der fotografische Vergleich:



Abbildung 18: Probekörper V09-004 vor und nach der EDA-Behandlung

Die Risse sind deutlich geschlossen, es ist eine Quellwirkung in radialer und tangentialer Richtung zu beobachten.

-

²¹ Der Preis für 1L Ethylendiamin beträgt 7 Euro.

²²Ein einfacher chemikalienbeständiger Behälter und zur einfacheren Handhabung eine Saugpumpe sind für die Bereitung des EDA-Bades das einzige benötigte Equipment. Zur Kontrolle und Dokumentation der Behandlung reichen ein pH-Wert Messgerät, ein Leitwert-Messgerät, eine digitale Waage und eine Fotokamera. Eine persönliche Schutzausrüstung (wie beim Umgang mit Gefahrstoffen durch BG vorgeschrieben) sollte außerdem vorhanden sein.

Dieses Ergebnis wird durch die Darstellung der Scandaten noch einmal unterstützt:

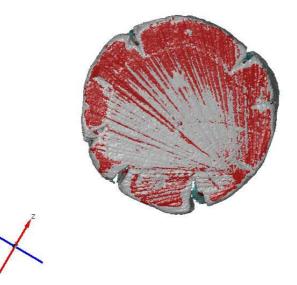


Abbildung 19: Vergleichende Scandaten der Probe V09-004 (rot: vor der Behandlung, grau: nach der Behandlung)

Die Quellung ist auf den Fotos und im Scan deutlich sichtbar und wird durch die folgenden Messdaten belegt und in Zahlen ausgedrückt.

Für das Probeholz V09-004 konnte ein Massezuwachs von 144,1g und ein Volumenzuwachs von 147,8cm³ berechnet werden. Das ergibt einen Volumenzuwachs von 14,2% zum Anfangsvolumen.

Es sollte jedoch auch der Masseverlust respektive Volumenverlust nicht außer Acht gelassen werden, dieser beträgt für das Probestück V09-004 15,3g und 10,2cm³²³.

Die Entscheidung für oder gegen eine Quellung sollte individuell getroffen werden. Der mögliche Masseverlust und die zunehmend druckempfindlicher werdende Oberfläche gegenüber der Regeneration von kollabierter Substanz muss dabei bedacht werden.

8. Ausblick

In der begrenzten Bearbeitungszeit dieser Studie konnten bisher noch nicht alle sich stellenden Fragen geklärt werden.

Die Probehölzer werden zunächst weiter in der Quelllösung belassen um zum einen zu beobachten ob sich die Messwerte des pH-Werts, des Leitwerts und der Wägung auf einen Wert einpendeln. Zum Anderen soll geklärt werden, ob bei der Quellung von archäologischem Nassholz ein Quellen über die Ursprungsdimensionen hinaus auftritt.

_

²³ Der Masse- und Volumenverlust ist im Wert des Masse- und Volumen-Zuwachses bereits mit inbegriffen.

Eine interessante Fragestellung ist, ob die gequollenen Hölzer nach einer Trocknung erneut gequollen werden können, also ob dieser Prozess beliebig wiederholt werden kann.

Weitere Fragen stellen sich im Bezug auf den Austausch der EDA-Lösung gegen Wasser. Wie gut lässt sich die EDA-Lösung aus dem Holz wieder herauswaschen? Kommt es dabei zu einem weiteren Substanzverlust?

Es stellt sich anschließend die Frage der Konservierung! Ist mit EDA-Lösung gequollenes archäologisches Nassholz konservierbar? Welche Methoden lassen sich dafür einsetzen²⁴?

Es soll weiter geklärt werden, ob die täglichen Proben der EDA-Lösung mit chemischen und / oder festkörperspektroskopischen Methoden untersucht werden können. Welche Rückschlüsse können dabei im Bezug auf Auswaschungs- oder Abbauprozesse gezogen werden?

Die Studie stellt ein Zwischenresultat dar, welches jedoch bereits einen bemerkenswerten Effekt erzielen konnte. Es ist Gewiss, dass die Fortführung des Quellversuchs und die darauf folgenden Versuche noch viele interessante Erkenntnisse und Resultate hervorbringen werden.

_

²⁴Es ist vorgesehen, einen Teil der Proben mit der Kauramin-Methode und einen Teil der Proben mit der PEG-Methode zu konservieren.

9. Literaturverzeichnis

Barbour 1981:

J. Barbour, Shrinkage and Collapse waterlogged archaeological wood. in: D. Grattan, Proceedings of the ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Materials Conference, 15.-18.09.1981 Ottawa (Ottawa 1981) 209 – 225.

Cramer 2014:

A. Cramer, Dokumentation der geometrischen Veränderungen während der Konservierung mittels 3D-Scanning. Unpublizierter, zukünftiger Beitrag für die KUR-Homepage des RGZM (Mainz 2014).

Cronyn 1996:

J. M. Cronyn, The Elements of Archaeological Conservation (New York 1996)

Fengel / Wegener 2003:

D. Fengel / G. Wegener, Wood- Chemistry, Ultrastructure, Reactions (Remagen 2003) 296ff.

Jiachang et al. 2009:

C. Jiachang / C. Donglang / Z. Jingen / H. Xia / C. Shenglong, Shape recovery of collapsed archaeological wood ware with active alkali-urea treatment, in: Journal of Archaeological Science 36, 2009, 434 – 440.

Kulturstiftung des Bundes (o. J.):

Kulturstiftung des Bundes, KUR – Programm zur Konservierung und Restaurierung von mobilem Kulturgut (o. J.). URL:

http://www.kulturstiftung-des-

bundes.de/cms/de/programme/restaurierung/archiv/kur__programm_zur_konservierung_und _restaurierung_von_mobilem_kulturgut_3164_96.html (Stand:08.01.2015).

KUR Onlinedatenbank (o. J.):

RGZM, Massenfunde in archäologischen Sammlungen (o. J.). URL:

http://www.rgzm.de/kur/index.cfm?Layout=holz&Content=start (Stand: 10.01.2015).

Mazzola u. a. 2009:

C. Mazzola/W. Muskalla/M. Wittköpper, Das Kur-Projekt »Massenfunde in archäologischen Sammlungen«, Restaurierung und Archäologie 2, 2009, 133-136.

Schweingruber 1990:

F. H. Schweingruber, Mikroskopische Holzanatomie: Formspektren mitteleuropäischer Stamm- und Zweighölzer zur Bestimmung von rezentem und subfossilem Material. (Teusen 1990).

Wittköpper 2010:

M. Wittköpper, Nassholzkonservierung. Allgemeiner Teil des RGZM (Mainz 2010)

Vogel 2010:

I. Vogel, Untersuchungen zur Quellung von Vollholzsegmenten am Beispiel mesolithischer Einbaume. Diplomarbeit im Studiengang Restaurierung / Grabungstechnik an der HTW Berlin (Berlin 2010)

www.chemie.de/lexikon/Ethylendiamin.html (Stand 14.01.2015)

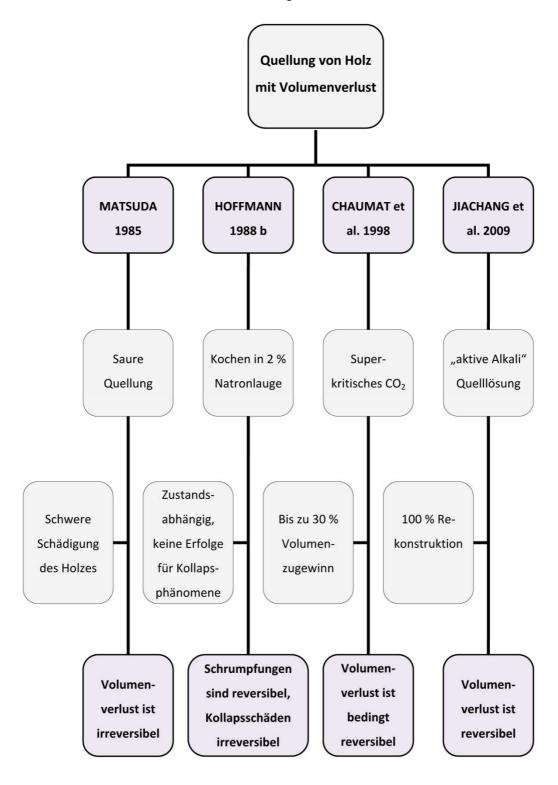
10. Abbildungsverzeichnis

| Abbildung 1: romischer Eichenholzpfahl aus Bad Nauheim im Einlieferungszustand (Foto: W. |
|--|
| Muskalla)3 |
| Abbildung 2: Probenreihe V094 |
| Abbildung 3: Trocknungsschäden an Probeholz V09-010 der Versuchsreihe zur Quellung |
| (Foto M. Wittköpper)6 |
| Abbildung 4: Durch die Einwirkung von "aktivem Alkali-Harnstoff" gequollener Hammer |
| (Jiachang et al. 2009, 6)7 |
| Abbildung 5: Wägevorrichtung zur Ermittlung des Unterwassergewichts (Foto: W. Muskalla) |
| 11 |
| Abbildung 6: Vermessung der Nagelmaße13 |
| Abbildung 7: links Streifenlicht auf einem Probeholz; rechts Streifenlichtscanner Atos III |
| während des Scanvorgangs14 |
| Abbildung 8: Messprojekt 1 und 2 des Probeholzes; grüne Punkte stellen die Referenzpunkte |
| des Drehtisches und orange Punkte die Referenzpunkte des Holzes dar (Abbildungen A. |
| Cramer) 15 |
| Abbildung 9: links Messprojekt 3; rechts Transformation der drei Messprojekte zu einem |
| vollständigen Modell (Abbildungen A.Cramer)15 |

| Abbildung 10: Dreiecksvermaschung (Polygonisierung) der Oberfläche dargestellt in der | |
|---|----|
| Systemsoftware von ATOS (Abbildung A. Cramer) | 16 |
| Abbildung 11: links Oberflächeninformationen der Spalten unvollständig; rechts | |
| automatisierte und damit verfälschte Oberflächeninformation (Abbildungen A. Cramer) | 16 |
| Abbildung 12: Luftgetrocknete Referenzprobe V09-Exp.02, schwarzer Umriss zeigt den | |
| wassergesättigten Zustand an | 18 |
| Abbildung 13: Einlegen der Probehölzer in die Quelllösung, Bildung von weißem | |
| Ethylendiamincarbonat-Nebel | 19 |
| Abbildung 14: links: Radialschnitt vor der EDA-Behandlung; rechts: Radialschnitt nach 3 | |
| Wochen in der Quelllösung | 22 |
| Abbildung 15: V09-010 links: Scan vor der EDA-Behandlung; rechts: Scan nach der EDA- | |
| Behandlung | 23 |
| Abbildung 16: V09-010 Beide Scans übereinander gelegt, deutlich sichtbar die gequellten | |
| grauen Bereiche im Randbereich | 23 |
| Abbildung 17: V09-010 Schnitt durch die Probe; Dimensionsveränderungen farblich skalier | t |
| | 24 |
| Abbildung 18: Probekörper V09-004 vor und nach der EDA-Behandlung | 31 |
| Abbildung 19: Vergleichende Scandaten der Probe V09-004 (rot: vor der Behandlung, grau | I: |
| nach der Behandlung) | 32 |

11. Anhang

Quellmethoden im schematischen Vergleich²⁵:



Sicherheitsdatenblatt von Ethylendiamin:

²⁵ Vogel 2010, 39.