

V18_035_12 Endzustand - Vorzustand		
Statistics	all	selected
Max distance [mm]	+6.43	???
Min distance [mm]	-11.55	???
Mean distance [mm]	-0.20	???
Distance std deviation [mm]	0.93	???
Area of valid distance [mm ²]	97294.80	0.00
Integrated distance [mm ³]	-11444.81	+0.00
Integrated abs distance [mm ³]	25863.68	0.00



LANGZEITSTUDIE ZU PHYSIKALISCHEN VERÄNDERUNGEN VON WASSERLAGERTEM ARCHÄOLOGISCHEN NASSHOLZ

Auswertungen für die Jahre 2013-2019

Seminararbeit in der Nassholzkonservierung

Cornelia Meyer, 2633565

Lehrveranstaltung: Wissenschaftliche Befundauswertung

Dozent: Prof. Dr. Markus Egg

Thema: Langzeitstudie zu physikalischen Veränderungen von wassergelagertem archäologischem Nassholz

Fachsemester: 6

INHALTSVERZEICHNIS

1	<i>Einleitung</i>	1
2	<i>Ziel der Studie</i>	3
2.1	Projektbeschreibung	3
2.2	Probenbeschreibung	3
3	<i>Der Rohstoff Holz und seine Eigenschaften</i>	7
3.1	Holzaufbau und Holzfeuchte	7
3.2	Holzabbau und archäologisches Nassholz	11
4	<i>Messgrößen und Messverfahren</i>	14
4.1	Masse	14
4.2	Volumen	19
4.3	Schrumpfmaße	21
5	<i>Ergebnisse</i>	23
5.1	Gewichtsänderungen	23
5.2	Schrumpfverhalten	29
5.3	Volumenänderungen	35
6	<i>Zusammenfassung</i>	III
7	<i>Literaturverzeichnis</i>	III
8	<i>Anhang</i>	V
8.1	Abbildungsverzeichnis	V
8.2	Diagramme	VI
8.3	Rohdaten	VI

1 EINLEITUNG

Monitoring, insbesondere Langzeitbeobachtung, ist ein wichtiges Instrument in der Konservierung, um Veränderungen an Kulturgütern frühzeitig erkennen und geeignete Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Dies betrifft sowohl bereits restaurierte und konservierte Objekte als auch fundfrische, welche – häufig bedingt durch zeitliche, personelle oder räumliche Engpässe – nicht unmittelbar einer Behandlung unterzogen werden können. Da die Austrocknung von archäologischem Nassholz mit hohem Informationsverlust und nicht selten mit der Zerstörung des Objektes einhergeht, hat sich die Wasserlagerung als probates Mittel bis zur Durchführung konservierender Maßnahmen etabliert. Die Vorteile gegenüber der Alternative, der Austrocknung und dadurch bedingten Zerstörung des Objektes, liegen auf der Hand. Evidente Studien, insbesondere Langzeitstudien, fehlen jedoch, auch sicherlich in Ermangelung alternativer Zwischenlösungen. Im Fokus bisheriger Studien steht primär der mikrobielle Zersetzungsprozess und Möglichkeiten der Prävention und Eindämmung¹

Die hier vorgestellten Ergebnisse basieren auf der dritten vollständigen Messreihe einer im Jahr 2009 begonnenen Studie zur Erfassung von Dimensions- und Gewichtsveränderung archäologischer Nasshölzer.² Die Fortsetzung der Studie unter Erhebung von Zeitreihendaten bietet auf lange Sicht die Chance, neben der Ermittlung des Umfangs der Zersetzung auch eine Zersetzungsrate abzuleiten. Erkenntnisse hierzu könnten genutzt werden, um Entscheidungshilfen für Restaurator*innen und Konservator*innen bei der zeitlichen Planung von Konservierungsmaßnahmen abzuleiten und bestehende Risiken für betreffende Kulturgüter genauer abschätzen zu können. Um die Vergleichbarkeit mit den bisherigen Ergebnissen zu gewährleisten, wird der gleiche methodische Ansatz gewählt in Bezug auf Erhebung und Auswertung gewählt. Erläuterungen und Beschreibungen werden soweit ausgeführt, wie es für das Verständnis der hier vorgestellten Ergebnisse notwendig ist. Projektdetail zu vorausgegangenen Studien sind in den jeweiligen Veröffentlichungen zu finden.

¹ Gelbrich/Poelmans 2013.

² Kaiser 2014.

2 ZIEL DER STUDIE

2.1 PROJEKTBEschREIBUNG

Es handelt sich um die Fortsetzung eines bereits im Jahr 2009 gestarteten Projekts zu physikalisch messbaren Veränderungen von in deionisiertem Wasser gelagerten archäologischen Nasshölzern.³ Das methodische Konzept sattelt auf dem des KUR-Projekts zu Massenfunden in archäologischen Sammlungen, einem von der Initiative der Kulturstiftung des Bundes und der Kulturstiftung der Länder im Rahmen des KUR – Programms zur Konservierung und Restaurierung von mobilem Kulturgut geförderten Projekts. Als Projektträger agierte die Archäologische Staatssammlung in München. Das Römisch-Germanische Zentralmuseum in Mainz (RGZM) beteiligte sich als Kooperationspartner.⁴ Informationen zur Konzeption sowie zur Probenauswahl und -beschaffenheit sind in einer Datenbank unter dem Link <https://www.rgzm.de/kur/> öffentlich einsehbar.

2.2 PROBENBEschREIBUNG

Die Studie umfasst insgesamt 45 Proben aus 14 originären Hölzern. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Art und den Umfang der verwendeten Nasshölzer.

Versuchsreihe	Menge	Holzart	Ordnung	Probenform	Alter
V 07	5	Buche	Laubholz	Einstieliges Ganzholz	unbekannt
V 29	2	Buche	Laubholz	Spaltbohlen, Stämme einer bronzezeitlichen Wegbefestigung	Bronzezeitlich
V 05	5	Eiche	Laubholz	Wasserleitung (u-förmig)	unbekannt
V 14	5	Eiche	Laubholz	Balken, Konstruktionsholz einer Salzgewinnungsanlage aus Sole	Römisch
V 19	1	Eiche	Laubholz	Großvolumiger Balken, Konstruktionsholz einer Salzgewinnungsanlage aus Sole	Römisch
V 20	5	Eiche	Laubholz	Schalbretter (Dielen) eines römischen Brunnens	Römisch
V 27	5	Eiche	Laubholz	Äste	Römisch
V 27 A	1	Eiche	Laubholz	Äste	Römisch
V 06	1	Erle	Laubholz	Wasserleitung/Trog	unbekannt
V 24	5	Erle	Laubholz	Staketen einer Uferbefestigung eines Emsprielis	Römisch
V 18	3	Fichte/ Lärche	Nadelholz	Stamm mit Wurzelstock	Neuzeitlich
V 23	3	Fichte/	Nadelholz	Kanthölzer einer Wandverschlung (Spundwand)	Römisch

³ ebd.

⁴ Mazzola u. a. 2009.

		Lärche			
V 03	3	Kiefer	Nadelholz	Wasserleitung (u-förmig)	unbekannt
V 25	1	Tanne	Nadelholz	Balken (Ganzholz - einstielig)	Römisch

Vertreten sind mit Buche, Eiche und Erle sowie Tanne, Kiefer und Lärche/ Fichte⁵ jeweils 3 Laub- und Nadelholzarten, wobei der jeweilige Anteil auf den Gesamtprobenumfang stark variiert. Etwa die Hälfte der 45 Proben stammt von der Eiche, Tanne ist mit einer Probe am geringsten vertreten. Der überwiegende Teil der Proben datiert in die Römerzeit. Für etwa ein Drittel der Proben liegt keine Altersbestimmung vor. Die genauen Anteile sind in Abb. 1 aufgeschlüsselt.

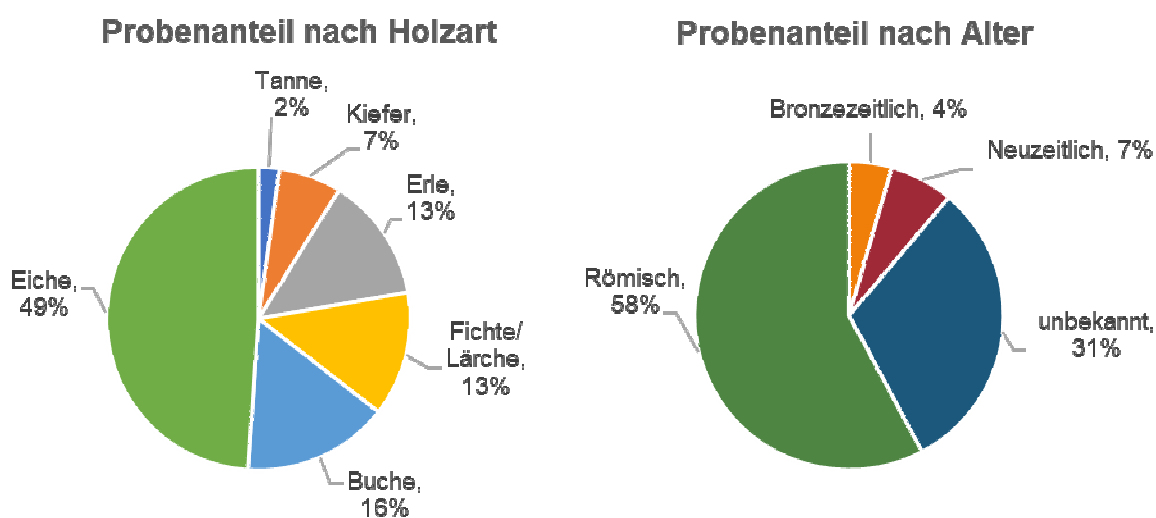


Abb. 1: Probenanteil aufgeschlüsselt nach Holzart und Alter.

Eigene Darstellung.

Es wurden alle in der Studie bisher untersuchten Proben auch in dieser Folgestudie 2019, soweit möglich, berücksichtigt. Die Probe 26 der Versuchsreihe 23 (Fichte/ Lärche) teilte sich während der Wasserlagerung längs zur Holzfaser in zwei annähernd gleich große Hälften. Abbildung Abb. 2 zeigt die beiden 3D-Modelle aus 2009 und 2019 im Vergleich. Er-sichtlich ist hierbei, dass die Probe bereits zu Beginn der Studie 2009 von zwei Seiten entlang der jetzigen Bruchstelle eingerissen war. Die Pfeile markieren jeweils den Riss. Da sich die Hälften per Augenmaß passgenau zusammensetzen ließen, wurden alle Untersuchungen inkl. des 3D-Scans wie vorgesehen durchgeführt. Auch wenn nur von einem minimalen Versatz

⁵ Fichte und Lärche weisen sehr ähnliche anatomische Merkmale auf, die sich nicht in jedem Fall eindeutig unterscheiden lassen. Vgl.

auszugehen ist, sollten jedoch insbesondere die aus dem 3D-Scan abgeleiteten Werte mit Zurückhaltung betrachtet werden.

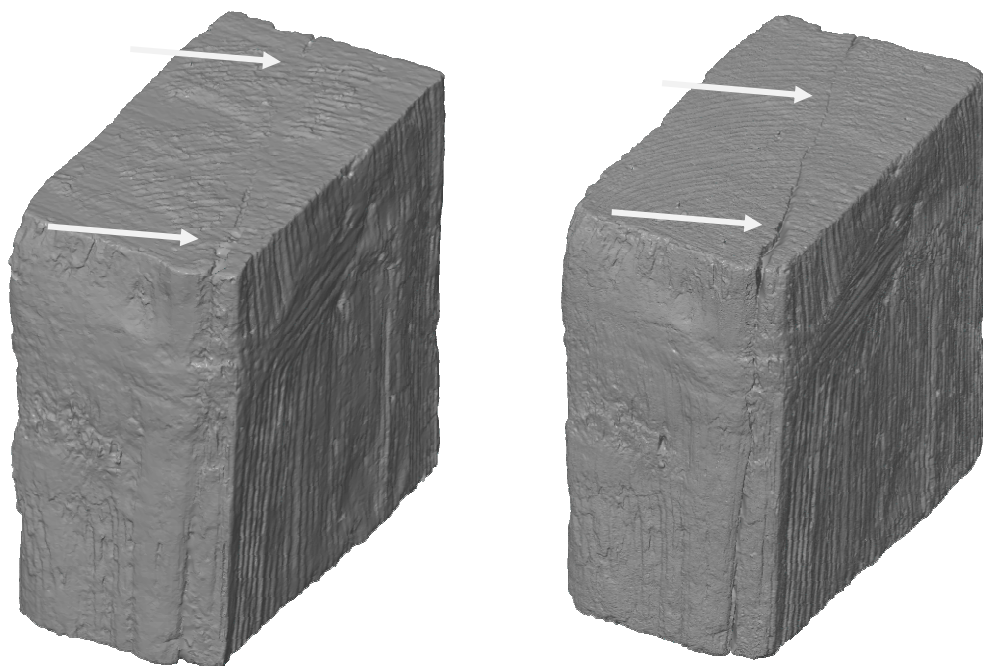


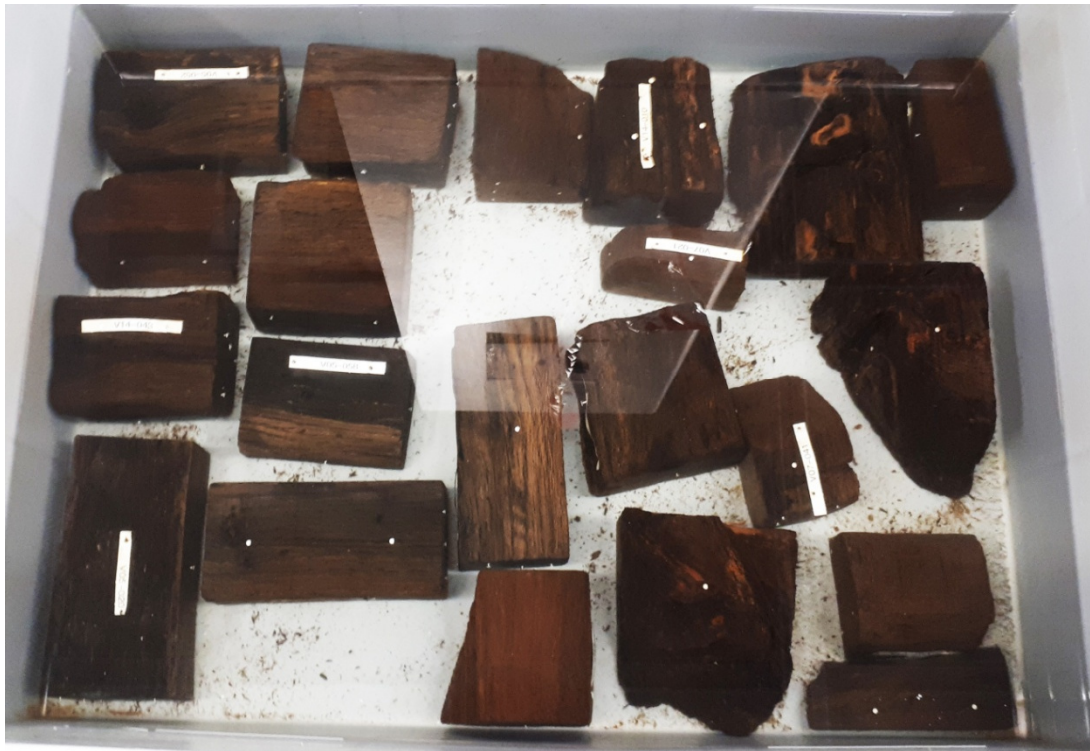
Abb. 2: Probe 26 der Versuchsreihe 23 im 3D-Modell 2009 (links) und 2019 (rechts) mit erkennbarer Rissbildung.

A. Cramer, RGZM 2019

Bei Probe 10 der Versuchsreihe 19 (Eiche) handelt es sich um einen voluminösen Probenkörper mit stark zerfurchter Oberfläche. Bereits in 2009 konnte für diese Probe kein geschlossenes Oberflächenmodell aus den 3D-Messungen generiert werden. Ein Scan wurde daher in 2019 nicht durchgeführt.

Die Proben lagern seit 2009 in mit demineralisiertem Wasser gefüllten Kunststoffwannen in einem Hochregal im Museum für Antike Schifffahrt (MufAS) in Mainz. Die Behältnisse sind zum Schutz vor Lichteinfall, Staubablagerung und Verdunstung mit Folie, die bündig auf der Wasseroberfläche liegt, abgedeckt und zusätzlich mit einem Deckel fest verschlossen. Der Wasseraustausch erfolgt mindestens einmal jährlich durch den Restaurator/ Holzkonservator des MufAS, wobei auch die Wannen gründlich mit einem basischen Reinigungsmittel gesäu-

bert werden. Hierzu müssen die Proben händisch in ein Wasserreservoir umgesetzt und zwischengelagert werden. Die Lagerungsbedingungen werden durch Monitoring geprüft. Zusätzliche Parameter wie Temperatur und pH-Wert werden nicht gemessen. Dem Wasser werden zudem keine Bakterizide oder Fungizide zugesetzt, um eine äußere Einflussnahme auf die Holzsubstanz auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Durch die Verwendung von demineralisiertem Wasser werden zudem Einflüsse durch regionale Besonderheiten in der Wasserzusammensetzung vermieden und eine möglichst allgemeingültige Aussage aus den Messwerten ableiten zu können. In Abb. 3 zeigt die Lagerungsbedingung der Proben im Wasser.



*Abb. 3: Mit demineralisiertem Wasser gefülltes Wannenbehältnis mit eingelagerten Probekörpern.
(C. Meyer, 2019)*

3 DER ROHSTOFF HOLZ UND SEINE EIGENSCHAFTEN

Um zu verstehen, welche Prozesse bei der Erhaltung von archäologischem Holz eine Rolle spielen, sind Kenntnisse zu Anatomie des Holzes erforderlich. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen werden nachfolgend die Aspekte angeführt, die für das Verständnis der durchgeführten Studie erforderlich sind. Für eine tiefergehende Betrachtung sei auf die einschlägige Literatur zur Holz-anatomie verwiesen.

3.1 HOLZAUFBAU UND HOLZFEUCHTE

Bereits makroskopisch lässt Holz charakteristische Merkmale erkennen, die sich auch auf die Holzeigenschaften auswirken. Im Querschnitt weist Holz von innen nach außen betrachtet unterschiedliche Zonen auf. Das Kernholz ist von hoher Dichte, trocken, schwer und fest. Es besteht aus leblosen Zellen, welche somit keine Versorgungs- sondern eine Stabilitätsfunktion ausüben. An das Kernholz schließt sich das zur Versorgung des Baumes mit Wasser und Nährstoffen dienende Splintholz an. Es ist porig und von geringerer Dichte als das Kernholz. Nach außen wird das Holz durch die Rinde vor äußeren Einflüssen und Schädlingen geschützt. Sie wird in die noch lebende Innenrinde (Bast) und die leblose Außenrinde (Borke) unterteilt. Der Holzzuwachs macht sich im Querschnitt an Jahrringen bemerkbar, die durch jahreszeitlich bedingte Früh- und Spätholzphasen entstehen.⁶ Ein vollständig erhaltener Querschnitt vom Kern- bis zum Rindenbereich ermöglicht bei rezenten Bäumen eine Altersbestimmung durch Zählung der Ringe. Bei archäologischen Hölzern ist es möglich, durch lückenlos dokumentierte Wachstumsmuster der Jahrringe (im sogenannten Überbrückungsverfahren) mittels Abgleichs eine Altersbestimmung vorzunehmen. Die Vergleichsreihen sind arten- und standortspezifisch, so dass die Datierungsmöglichkeiten nach Region und Holzart schwanken. Für die mitteleuropäische Eiche ist es beispielsweise möglich, Datierungen bis etwa 8000 v. Chr. vorzunehmen.⁷

⁶ Kühnen/Wagenführ 2002, 26–29.

⁷ ebd., 97.

Bei mikroskopischer Betrachtung zeigen sich in den Schnittebenen der drei holzanatomischen Richtungen Merkmalskombinationen und Ausprägungen, die in der Regel eine artenspezifische Holzbestimmung zulassen. Nachfolgende Abbildung skizziert die makroskopischen Merkmale sowie die drei Schnittebenen: A – Querschnitt (quer zum Stamm verlaufend), B – Tangentialschnitt (tangential zu den Jahrringen), C – Radialschnitt (senkrecht zu den Jahrringen).

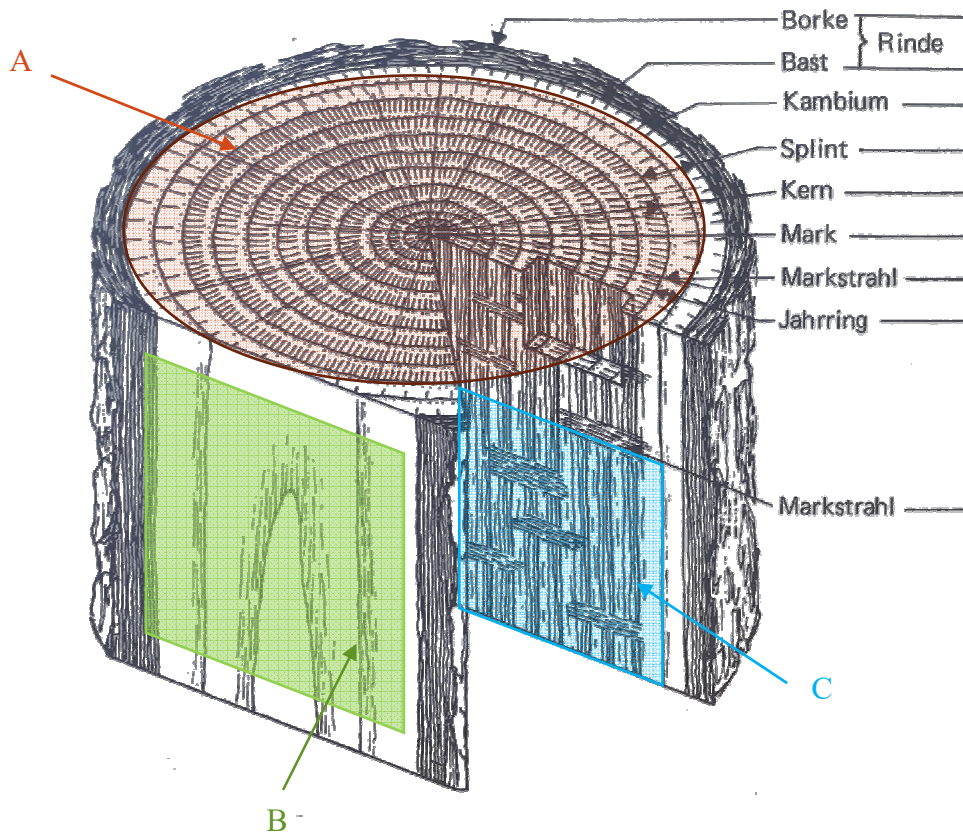


Abb. 4: Makroskopische Merkmale von Holz.

(Nach Schweingruber 1978, 13 mit eigenen Ergänzungen.)

Die holzanatomischen Richtungen verlaufen analog dazu longitudinal, d.h. in Faserrichtung, radial in Richtung der Markstrahlen sowie tangential in Richtung der Jahrringe.

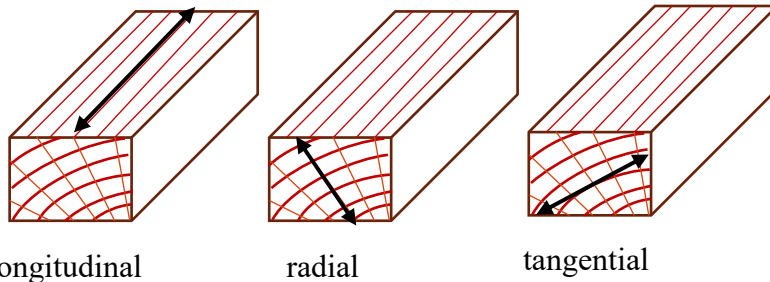


Abb. 5: Holzanatomische Richtungen.

(Eigene Darstellung)

Holz zeigt im rezenten Zustand eine enorme Widerstandsfähigkeit – hierzu zählen insbesondere Druck-, Biege-, Scherf-, Spalt- und Torsionsfestigkeit sowie Schlagzähigkeit und Härte.⁸ Die Holzeigenschaften lassen sich sowohl auf die Zell- und Gewebestruktur als auch auf die Holzfeuchte zurückzuführen. Die Zellwände bestehen – bezogen auf ihre Trockenmasse – zu etwa 50% aus dem Polysaccharid Cellulose, zu 30% aus dem aromatischen Polymer Lignin sowie zu 20% aus verschiedenen weiteren Polysacchariden, die zusammenfassend als Hemicellulosen bezeichnet werden.⁹ Alle drei Bausteine bilden einen engen Verbund. Das Zusammenspiel der Zellwandbestandteile wird in einem von Bertinetti u.a. entwickelten 3D-Modell anschaulich dargestellt (Abb. 6).

⁸ ebd., 75–79.

⁹ Bertinetti u. a. 2016, 2.

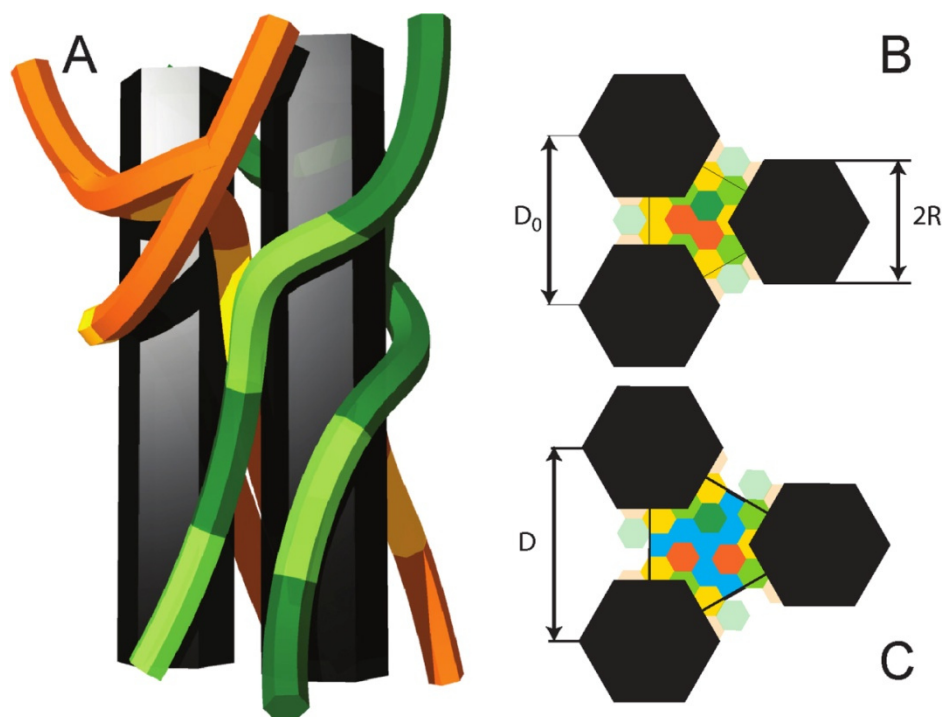


Abb. 6: 3D-Modell der Faserbestandteile in der Zellwand von Holz. Schwarz dargestellt sind die parallel angeordneten Cellulosefasern, die von Lignin (orange) und Hemicellulosen (grün) umschlungen und dadurch voneinander separiert sind. Im Querschnitt (B, C) ist der Quellprozess durch Wassereinlagerung dargestellt. (Bertinetti u. a. 2016, 3 Abb. 1)

New Journal of Physics 2016 / MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung.

Die zu langen Fibrillen gebündelten, im Modell schwarz dargestellten Cellulosefasern fungieren als Gerüst, um das sich Lignin (orange) und Hemicellulosen (grün) winden. Sie gehen eine feste Verbindung mit der Cellulose ein, verdeutlicht durch aufgehellte Farbbereiche. Lignin bindet chemisch zusammen mit der Hemicellulose in die Zellwand eindringendes Wasser, wobei die längs verlaufenden Cellulosefaserbündel auseinander gedrückt werden.¹⁰ Bei Wasseradsorption kommt es entsprechend zur Quellung, beim umgekehrten Prozess der Wasserdesorption zur Schwindung. Holz reagiert als hygroskopischer Stoff auf den Wassergehalt in seiner Umgebung. Das Mikrosystem gleicht insbesondere Feuchtigkeitsveränderungen der Luft aus, während das Makrosystem bestehend aus Gefäßen und Gewebestrukturen auf Wasser in seiner flüssigen Form reagiert.¹¹ Holz kann drei Grenzzustände hinsichtlich des Wassergehaltes einneh-

¹⁰ ebd., 4.

¹¹ Kühnen/Wagenführ 2002, 57.

men. Ein absolut trockenes Holz wird darrtrocken genannt. Es enthält absolut kein Wasser mehr, was lediglich durch künstliche Trocknung in einem Trockenofen erreicht wird (sogenannte Atrotrocknung). Im fasergesättigten Zustand, dies ist bei 100% relative Luftfeuchte der Fall, ist die maximale Wasserbindungsfähigkeit (sogenanntes chemosorbiertes Wasser) und somit die maximale Quellung erreicht. Als Mittelwert gilt eine Holzfeuchte von 30%. Als wassergesättigt wird ein Holz bezeichnet, in welchem sich zusätzlich ungebundenes Wasser in Hohlräumen einlagert hat. Dies hat keine Volumenänderung zur Folge.¹² Quell- und Schwindungsprozesse wirken sich im Holz nicht gleichmäßig aus. Vielmehr kommt es durch anatomische Unterschiede innerhalb des Holzes zu Verzerrungen, die im Querschnitt sichtbar werden. Abbildung Abb. 7 skizziert für verschiedene Holzbereiche, wie sich Quell- und Schwindungsrichtungen auswirken. Die höchste prozentuale Verzerrung ergibt sich in tangentialer Richtung, die geringste in radiale Richtung.¹³

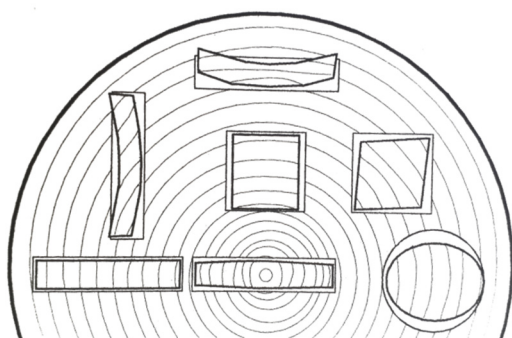


Abb. 7: Verformungsmuster in verschiedenen Bereichen des Holzes.
(aus (Kühnen/Wagenführ 2002, 61))

3.2 HOLZABBAU UND ARCHÄOLOGISCHES NASSHOLZ

Die Ausbildung verschiedener Gewebe innerhalb des Holzes sorgt neben der makromolekularen Grundstruktur für die hohe Widerstandskraft von rezentem Holz. Die langen Cellulosefaserbündel verleihen Längszugfestigkeit, das Lignin Druckfestigkeit¹⁴ und eine gewisse Steifigkeit. Bei Austrocknung verklebt Lig-

¹² ebd., 58.

¹³ ebd., 61.

¹⁴ ebd., 21.

nin regelrecht mit der Cellulose und lässt sich von dieser nur durch Einsatz konzentrierter alkalischer Lösungen lösen. Trocknungsrisse entstehen ausgehend vom Holzkern oder von der Rinde her.¹⁵ Feuchtigkeit ist somit ein wesentlicher Faktor bei der Erhaltung der Elastizität und Formstabilität.

In der Holzkonservierung spielt ein weiterer Aspekt eine wesentliche Rolle. Trotz augenscheinlich guter Formerhaltung fehlt es archäologischem Nassholz an Festigkeit und Härte. Neben chemischen Faktoren (Salze, pH-Wert) sind Zersetzungsprozesse durch Schädlinge und Mikroorganismen als Ursache zu benennen. Vor allem ein gemeinsames Auftreten von Bakterien und Pilzen führt zu großer Schädigung.¹⁶ Holz bietet mit seinem hohen Vielfachzuckeranteil (Cellulose, Hemicellulose) eine gute Nahrungsbasis. Das Stütz-molekül Lignin eignet sich als aromatisches Polymer dagegen weniger als Energielieferant und bleibt vom Abbauprozess in großen Teilen verschont, wie Colombini u.a. der Universitäten zu Pisa und Mailand in einer Studie 2009 zum Grad der Zersetzung von Lignin in Proben von archäologischen Nasshölzern zeigen.¹⁷ Das Lagern fundfrischer Nasshölzer in Wasser dient vorrangig dazu, ein Kollabieren der durch Polysaccharid-Abbau destabilisierten Holzzellen zu verhindern. Das Wasser wirkt in den Zellen als stützendes Medium, weshalb der Trocknungsprozess nicht vor dem Austausch des Wassers gegen ein Ersatzmedium einsetzen darf. Währenddessen wird der Zersetzungsprozess nicht aufgehalten. Werden bei der Wasserlagerung zusätzlich Bedingungen geschaffen, die sich hemmend auf das Wachstum von Mikroorganismen auswirken, lassen sich die Abbauprozesse jedoch stark verlangsamen.¹⁸ Bereits der Sauerstoffgehalt spielt eine entscheidende Rolle. Zwar finden auch unter sauerstoffreduzierten oder anaeroben Bedingungen mikrobielle Abbauprozesse statt, unter hoher Sauerstoffpräsenz wird der Abbau jedoch beschleunigt.¹⁹ Mit Möglichkeiten der Erkennung und Charakterisierung von Bakterienbefall von wassergesättigtem archäologischem

¹⁵ Denninger 1968, 68–69.

¹⁶ Kühnen/Wagenführ 2002, 104.

¹⁷ Colombini u. a. 2009.

¹⁸ Gelbrich/Poelmans 2013.

¹⁹ Gelbrich u. a. 2012.

Holz²⁰ befassten sich Palla u.a. (2013) und ergänzten damit den Forschungsstand zum mittlerweile gut untersuchten Bereich der mikrobiellen Zersetzung von wassergesättigten archäologischen Hölzern. Eine tiefergehende Betrachtung erfolgt daher an dieser Stelle nicht und kann in genannten und themenverwandten Studien vertieft werden.

²⁰ Palla u. a. 2013.

4 MESSGRÖßEN UND MESSVERFAHREN

Die inzwischen 10 Jahre dauernde Feuchtlagerung der Probekörper in deionisiertem Wasser bietet die Chance, längerfristige Substanzveränderungen von wassergelagertem Nassholz zu untersuchen. Um dabei möglichst repräsentative Werte und Ergebnisse im Zeitablauf zu erhalten, ist vor allem Vergleichbarkeit im Hinblick auf die Lagerungsbedingungen der Proben, die Messgrößen, die eingesetzten Messmethoden und -verfahren sowie bei der nachgelagerten Datenaufbereitung (z.B. Plausibilisierungsverfahren, Umgang mit Ausreißern, Analyseverfahren) anzustreben. Ein möglichst konstanter Erhebungsrhythmus vereinfacht zudem die Interpretation zeitbezogener Größen.

Die Beurteilung der Veränderungsprozesse erfolgt physikalisch anhand von Gewichtsveränderungen und Schwindungsmaßen. Als Messgrößen werden für jede Probe wie in den Jahren 2009 und 2013 die Masse [in g] als Nassgewicht und Unterwassergewicht durch Wägung bestimmt, die Abstände fixer Punktmarken entlang der drei holzanatomischen Richtungen [in mm] analog mit Hilfe eines Messschiebers gemessen sowie indirekt das Volumen und die Formveränderung mittels 3D-Streifenlichtscans erfasst. Sowohl das Auswertungskonzept als auch zur Anwendung kommenden Analysewerkzeuge entsprechen denen der Studie in 2013, um Vergleichbarkeit zu den veröffentlichten Ergebnissen zu gewährleisten. Nachfolgend werden die relevanten Messgrößen und -verfahren näher beschrieben.

4.1 MASSE

Durch mikrobielle Abbauprozesse wird Holzmasse zersetzt, infolgedessen entstandene Hohlräume während der Wasserlagerung mit Wasser gefüllt werden. Unter der Annahme des Idealfalls – der vollständigen Sättigung mit Wasser – müsste das Gewicht des wassergesättigten Nassholzes bei Substanzverlust aufgrund der geringeren Dichte von Wasser (1 g/cm^3) im Vergleich zu reiner Holzmasse²¹ (Dichte = $1,5 \text{ g/cm}^3$) sinken.

²¹ Die Reindichte von Holz bezieht sich auf die reine Zellmasse und schwankt aufgrund leicht unterschiedlicher Anteile der Pflanzeninhaltsstoffe je nach Holzart zwischen $1,44 \text{ g/cm}^3$ und $1,6$

Das Gewicht des wassergesättigten Probekörper wird als **Nassgewicht m_{nass} [g]** durch Wägung an der Luft ermittelt.²² Insbesondere bei kleinen Probekörpern wirkt sich überschüssiges Oberflächenwasser negativ auf die Messgenauigkeit aus. Durch gründliches Abtropfen und Entfernen von Wasser in Vertiefungen²³ kann dieser Fehler reduziert werden. Als Hilfsgröße wird zusätzlich das **Unterwassergewicht m_{sub} [g]** bestimmt. Die Probekörper werden hierfür in einer am MufAS eigenkonstruierten Körbchenaufhängung (Abb. 8), die bereits für die vorangegangenen Messreihen verwendet wurde, vollständig unter Wasser getaucht und gewogen. Die Waage verfügt über eine Funktion zur Berechnung eines Durchschnittswertes über die letzten Messwerte, die verwendet wurde, um das Nassgewicht zu ermitteln. Dies war erforderlich, da kontinuierlich ungebundenes Wasser an die Umgebungsluft abgegeben wurde.

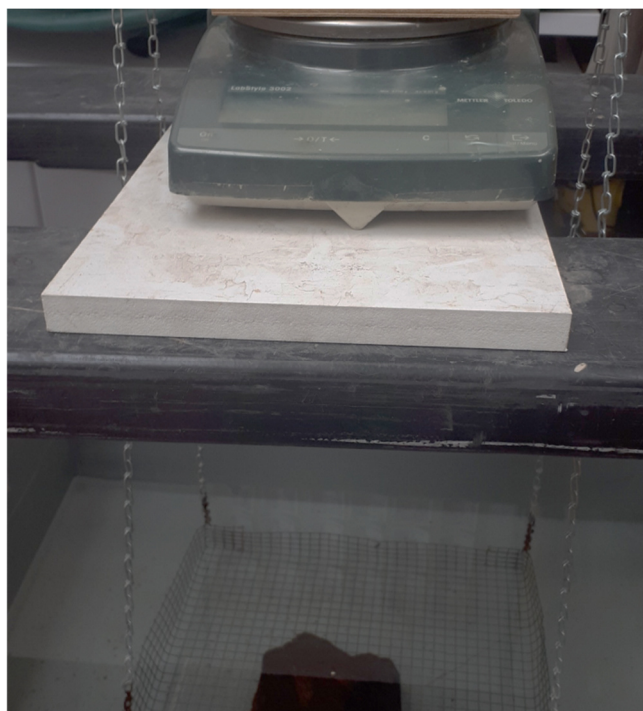


Abb. 8: Körbchenaufhängung zur Unterwasserwägung der Probekörper.

Der Korb hängt an der Vorrichtung, ohne den Boden der Wanne zu berühren. Die Proben müssen während der Wägung zudem vollständig unter Wasser sein. Die Messung erfolgt, nachdem sich die Vorrichtung ausgependelt hat und ruht.

C. Meyer, 2019

g/cm³. Als Holzarten unabhängiger Mittelwert lässt sich eine Reindichte von 1,5 g/cm³ annehmen.

²²

²³ Mit Hilfe der Kapillarwirkung saugfähiger Tücher kann überschüssiges Wasser entfernt werden, ohne die Oberflächenbeschaffenheit der Probe zu verändern.

Anhand beider Massen lassen sich unter Berücksichtigung der Auftriebskraft des Wassers folgende Größen berechnen:

- die **Holzmasse [g]** als dreifaches Unterwassergewicht,
- die vom Holz **aufgenommene Wassermenge [g]** als Differenz aus Holzmasse und Unterwassergewicht,
- das **maximale Wasseraufnahmevermögen U_{\max} [%]** als Verhältnisgröße aus Holzmasse und aufgenommener Wassermenge,
- das **Gewicht des verdrängten Wassers [g]** als Differenz aus Nassgewicht und Unterwassergewicht,
- das **Volumen [cm³]** des Probekörpers als Äquivalent zum Gewicht der verdrängten Wassermenge.

Die Notationen hierzu lauten:

$$(1) \quad \mathbf{Holzmasse [g]} = 3 * \mathbf{Unterwassergewicht [g]}$$

$$(2) \quad \mathbf{aufgenommene Wassermenge [g]} = \mathbf{Nassgewicht [g]} - \mathbf{Holzmasse [g]}$$

$$(3) \quad \mathbf{U_{\max} [%]} = \left(\frac{\mathbf{Nassgewicht [g]} - 3 * \mathbf{Unterwassergewicht [g]}}{3 * \mathbf{Unterwassergewicht [g]}} \right) * 100\% \\ = \left(\frac{\mathbf{Nassgewicht [g]} - \mathbf{Holzmasse [g]}}{\mathbf{Holzmasse [g]}} \right) * 100\%$$

$$(4) \quad \mathbf{Gewicht des verdrängten Wassers [g]} \\ = \mathbf{Volumen des Körpers [cm^3]} \\ = \mathbf{Nassgewicht [g]} - \mathbf{Unterwassergewicht [g]}$$

Das zugrunde liegende Prinzip leitet sich vom Archimedischen Satz ab, demzufolge sich das Gewicht eines in einem physikalischen Medium befindlichen Körpers scheinbar um das Gewicht des von ihm verdrängten Mediums verringert. Verantwortlich hierfür ist der hydrostatische Auftrieb, der durch Druckunterschiede an Ober- und Unterseite des Körpers entsteht und abhängig ist vom

Dichteunterschied beider Stoffe und vom Volumen des Körpers²⁴. Die Dichte von reiner Holzmasse beträgt unabhängig von der Holzart, wie bereits erwähnt, $1,5 \text{ g/cm}^3$. Durch die Auftriebskraft reduziert sich das Nassgewicht von $1,5 \text{ g}$ auf ein Unterwassergewicht von $0,5 \text{ g}$. Die Differenz entspricht nach Archimedes dem Gewicht des verdrängten Wassers, in diesem Fall folglich $1,0 \text{ g}$. Mit einer Dichte von $1,0 \text{ g/cm}^3$ nimmt dieses Gramm Wasser genau einen Kubikzentimeter Raum ein, was genau dem Volumen entspricht, welches das Holz unter Wasser eingenommen hat. Formal lässt sich der Zusammenhang wie folgt ausdrücken:

$$(5) \quad \text{Volumen}_{\text{Probenkörper}} = \frac{m_{\text{nass}} - m_{\text{sub}}}{\text{Dichte}_{\text{Wasser}}} = \frac{1,5 \text{ g} - 0,5 \text{ g}}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = \frac{1 \text{ g}}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 1 \text{ cm}^3$$

Der Zusammenhang zwischen dem Gewicht des verdrängten Wassers und dem Volumen des untergetauchten Körpers ist mit Hilfe einer hydrostatischen Waage in Abb. 9 veranschaulicht.

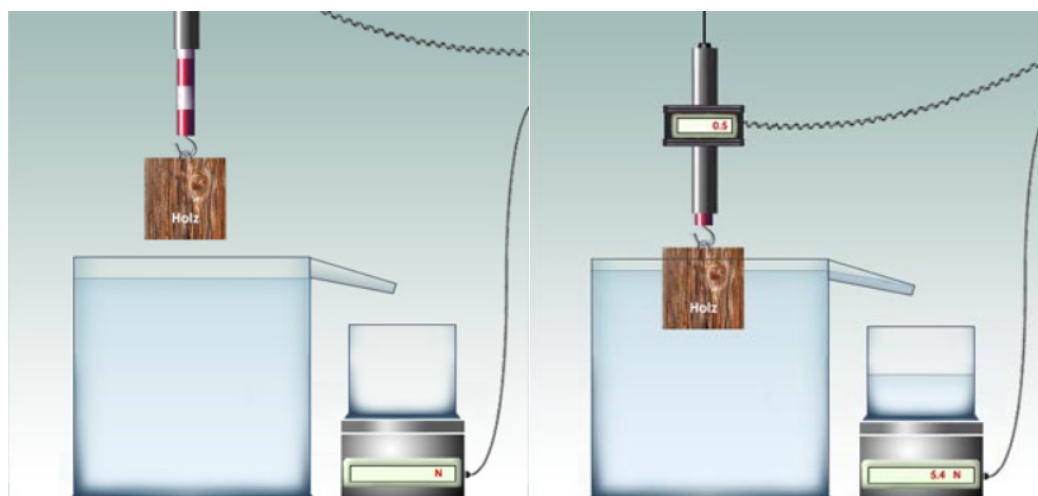


Abb. 9: Archimedisches Prinzip in experimenteller Darstellung.

Das beim Untertauchen eines Körpers verdrängte Wasser wiegt so viel wie die Differenz aus Wägung des Holzes an der Luft und unter Wasser. (SWR 2019, Planet Schule, Das Materiallabor. Archimedisches Prinzip)

Aus genanntem Prinzip und dem Verhältnis von Nassgewicht und Unterwassergewicht lässt sich zudem ableiten, dass die reine Holzmasse dem dreifachen

²⁴ Weise 1969, 103.

Unterwassergewicht entsprechen muss. Das im Holz gebundene Wasser besitzt im selbigen keine spezifische Masse, so dass lediglich die reine Holzmasse bei der Wägung unter Wasser erfasst wird, jedoch bedingt durch den Auftrieb nur mit einem Drittel des eigentlichen Gewichts an der Luft. Durch Multiplizieren mit drei lässt sich das Unterwassergewicht korrekt als wasserfreie Holzmasse an der Luft berechnen. Diese Methode ermöglicht eine zerstörungsfreie Holzmassenbestimmung von archäologischem Nassholz und ist somit eine für die Konservierung unentbehrliche Alternative zur Atrotrocknung.

Verwendet wird diese Größe in der Holzkonservierung zur Ermittlung des maximalen Wasseraufnahmevermögens, indem sie, wie in Formel (3) ersichtlich, ins Verhältnis zur aufgenommenen Wassermenge gesetzt wird. Steigt bei vollständig gesättigtem Nassholz das Verhältnis von Holzmasse zu Wasser, lässt dies auf eine fortgeschrittene Zersetzung schließen. De Jong leitete hieraus eine dreistufige Klassifizierung für den Abbaugrad von wassergesättigtem Holz mit folgender Einteilung ab²⁵:

Abbaugrad 3 für wassergesättigte Hölzer mit einem $U_{\max} < 185 \%$, was einem schwachen Abbau im Splintholz, dem äußeren Randbereich, entspricht.

Abbaugrad 2 für wassergesättigte Hölzer mit einem U_{\max} zwischen **185 – 400 %**, wobei der Abbau deutlich innerhalb des Randbereichs stattgefunden hat, das Kernholz jedoch nicht in Mitleidenschaft gezogen wurde.

Abbaugrad 1 für wassergesättigte Hölzer mit einem U_{\max} über **> 400 %**, der aus einem überwiegend bis vollständigen Abbau des Holzes resultiert.

Anhand nachfolgender Abbildung wird deutlich, dass es sich bei dem maximalen Wasseraufnahmevermögen lediglich um einen Mittelwert handeln kann, da der Abbau von außen nach innen erfolgt und das Wasser im Holz entsprechend heterogen verteilt ist.

²⁵ Jong 1977.

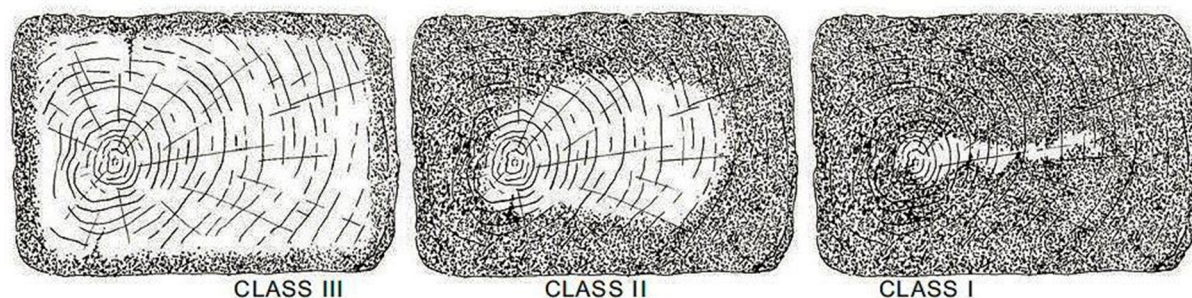


Abb. 10: Grafische Darstellung der Abbaugrade 3 bis 1 nach de Jong am Beispiel der europäischen Eiche.

(McConnachie u. a. 2008, 30 Abb. 1)

Um den tatsächlichen Substanzverlust anhand des Abbaugrades greifbarer interpretieren zu können, ist es hilfreich, das maximale Wasseraufnahmevermögen von archäologischem und rezentem Holz gegenüberzustellen. Ausgehend von den in Kapitel 3.1 Holzaufbau und Holzfeuchte dargestellten Eigenschaften lassen sich unter Berücksichtigung der Reindichte sowie der holzartenspezifischen Rohdichte²⁶ die U_{\max} -Werte über folgende Berechnung für rezente Hölzer ermitteln:

$$(6) \quad U_{\max\text{-rezent}}[\%] = \left(\text{max. Holzfeuchte} + \frac{\text{Reindichte} - \text{Rohdichte}}{\text{Reindichte} \cdot \text{Rohdichte}} \right) * 100\%$$

$$= \left(0,3 + \frac{1,5 - \text{Rohdichte}}{1,5 * \text{Rohdichte}} \right) * 100\%$$

4.2 VOLUMEN

Das Volumen der Probekörper wurde sowohl rechnerisch über die Formel (5) ermittelt sowie digital mit Hilfe von 3D-Streifenprojektionstechnik indirekt erfasst. Verwendet wurde für den 3D-Scan der ATOS III Rev. 02 (Kameraträgerbreite 400mm, Messpunkteabstand 0,10 mm) von der Firma GOM GmbH mit ca. 8.100.000 Messpunkten pro Einzelscan (3296 x 2472 Pixel), welcher dankenswerter Weise am i3mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, Hochschule Mainz für die Aufnahmen genutzt werden konnte

²⁶ Neben der Holzart wirkt sich auch die Holzfeuchte auf die Rohdichte aus. Für eine sinnvolle Interpretation muss daher eine Festlegung auf den Vergleichszustand des rezenten Holzes vorgenommen werden.

(Abb. 11).²⁷ Der Scanner verfügt über einen Projektor, der mittels LED ein Streifenmuster auf dem Messfeld bzw. dem Objekt erzeugt. Dieses Muster wird von zwei flankierenden Kameras stereo erfasst und ermöglicht Flächen- statt Punktmessungen.²⁸ Über Referenzpunkte auf dem Objektdrehteller lassen sich die erfassten Bildpunkte über trigonometrische Funktionen (Punktermittlung über Winkelmessung und bekannten Abstand zweier weiterer Punkte) zu einem präzises Polygonnetz zusammenführen. Damit die Probehölzer von allen Seiten vollständig erfasst werden konnten, wurden sie mindestens 2x, das heißt mindestens ja einmal bauchlinks und rücklings gescannt, da die auf dem Drehteller liegende Seite jeweils verdeckt war. Pro Objektseite wurden 8 Messungen mit Rotationsabständen von 45° durchgeführt. Über Referenzpunkte auf der Objekt-oberfläche konnten die Einzelmessungen anschließend ausgerichtet und übereinandergelegt werden.²⁹



Abb. 11: ATOS III Rev. 02 mit 3D-Triple-Scan Technologie bei der Erfassung eines Probenkörpers am i3mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, Hochschule Mainz. C. Meyer, 2019

²⁷ In 2009 und 2013 wurden die Scans mit einem Vorgängermodell (GOM ATOS III) durchgeführt, welches nicht mehr am i3mainz zur Verfügung steht.

²⁸ Galanulis 2019.

²⁹ Schorsch 2019.

Bevor ein tatsächliches 3D-Modell errechnet werden konnte, waren Zwischenkorrekturen erforderlich. Die nasse und dunkle Oberfläche von archäologischem Nassholz erschwert aufgrund des schwachen Kontrasts und der Reflexionen das Scannen, so dass Bildpunkte fehlen können. Einige Probekörper sind oberflächlich stark durch Risse und Spalten zerfurcht und weisen Hinterschneidungen auf, die vom Streifenlicht nicht immer vollständig ausgeleuchtet werden können. Auf jeder Probe sind zudem Referenzpunkte (eingebrachte Nägel) sowie ein Schild mit der Probenbezeichnung angebracht, wodurch die darunterliegende Oberfläche verdeckt wird. Entsprechend bedingte „Fehlstellen“ mussten nachträglich durch Algorithmen geschlossen werden. Dieser Vorgang erfolgte für kleinste Löcher mit der ATOS Scan-Software, die weitere 3D-Bearbeitung inkl. dem Schließen größerer Fehlstellen wurde mit der Software Geomagic der Firma 3D Systems am i3mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, Hochschule Mainz vorgenommen.³⁰

4.3 SCHRUMPFMAßE

Zur Ermittlung der Volumenveränderungen der Proben wurden die Ausdehnungen in longitudinaler (Faser gerichteter), radialer und tangentialer Richtung anhand im Holz fixierter Marken vermessen. Dies erfolgte händisch mit einem Messschieber mit digitaler Anzeige (Mindestmaß 0,01mm). Die Messpunkte sind durch ins Holz eingebrachte Rundflachkopf-Nägel markiert. Gemessen wurde jeweils der Abstand zwischen den Außenseiten unterhalb des Nagelkopfes der beiden markierenden Nägel. Zur Kennzeichnung der radialen Strecke wurden drei statt zwei Nägel verwendet und die Strecke der äußeren Nägel für die Auswertung erfasst.

³⁰ Das Einweisen in die 3D-Scannung sowie die nachgelagerte Aufbereitung der Rohdaten erfolgte durch Dipl.-Ing. (FH) Anja Cramer, wodurch diese Studie innerhalb des verfügbaren zeitlichen Rahmens erst möglich wurde.

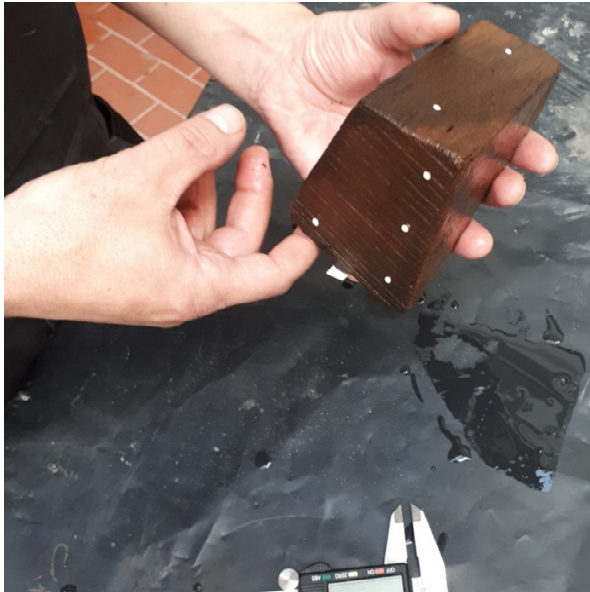


Abb. 12: Probekörper mit Markierungen zur Erfassung der Dimensionsänderung aller drei holzanatomischen Richtungen.

(C. Meyer, 2019)

Dieses Messverfahren birgt eine vergleichsweise hohe Messfehleranfälligkeit. Die Holzproben sind durch den Abbauprozess und den hohen Wasseranteil sehr weich. Bei der Messung an der Außenseite der Nägel besteht die Gefahr, dass die eingebrachten Nägel mit dem Messschieber zusammengedrückt werden und ein nach unten verzerrter Messwert abgenommen wird. Zur Kontrolle werden aus den digitalen 3D-Streiflichtprojektionsdaten Flächenberechnungen von Schnittebenen entlang der drei holzanatomischen Richtungen durchgeführt.

5 ERGEBNISSE

Die Plausibilisierung der Rohdaten erfolgte insbesondere für die analog erfassten Messungen händisch durch Sichtkontrolle mit Unterstützung von Schnellanalyse-Werkzeugen in Standard-Kalkulationssoftware³¹. Die Analyse der Daten wurde nach dem identischem Auswertungskonzept wie im Jahr 2013 durchgeführt. Ein Basisjahr (2009, 2013) wird hierbei einem Vergleichsjahr (2013, 2019) gegenübergestellt. Der Fokus dieser Studie liegt vor allem auf den Veränderungen der letzten 5 Jahre im Vergleich zu den Ergebnissen für den Zeitraum 2009 – 2013, um mögliche Langzeiteffekte aufzeigen zu können. Die Gesamtbeurteilung von 2009–2019 erfolgt lediglich ergänzend, um Tendenzen bzw. Trends abzubilden.

5.1 GEWICHTSÄNDERUNGEN

In Bezug auf das Nassgewicht kann für alle Proben eine Gewichtsabnahme innerhalb der letzten 5 Jahre festgestellt werden. Bei mehr als der Hälfte der Proben reduzierte sich das Nassgewicht um mindestens 4%. Schließt man Veränderungen bis mindestens 2 % Gewichtsverlust ein, erhöht sich die Anzahl der Proben auf 85%. Das noch in 2013 beobachtete Phänomen, bei dem 10 Proben eine Nassgewichtszunahme erfuhren, trat nach weiteren 5 Jahren der Wasserlagerung nicht mehr auf. Hier bestätigt sich die Vermutung, dass zu Beginn der Studie 2009 nicht alle Probekörper vollständig wassergesättigt waren und Luft in den Hohlräumen für ein geringeres Ausgangsgewicht sorgte. In den Abbildungen Abb. 13 und Abb. 14 ist zum Vergleich die Verteilung der Proben auf unterschiedlich hohe Gewichtsveränderungen für die Zeiträume 2009 – 2013 sowie 2013 – 2019 grafisch dargestellt.³²

³¹ Microsoft Excel Office 365 Pro Plus

³²

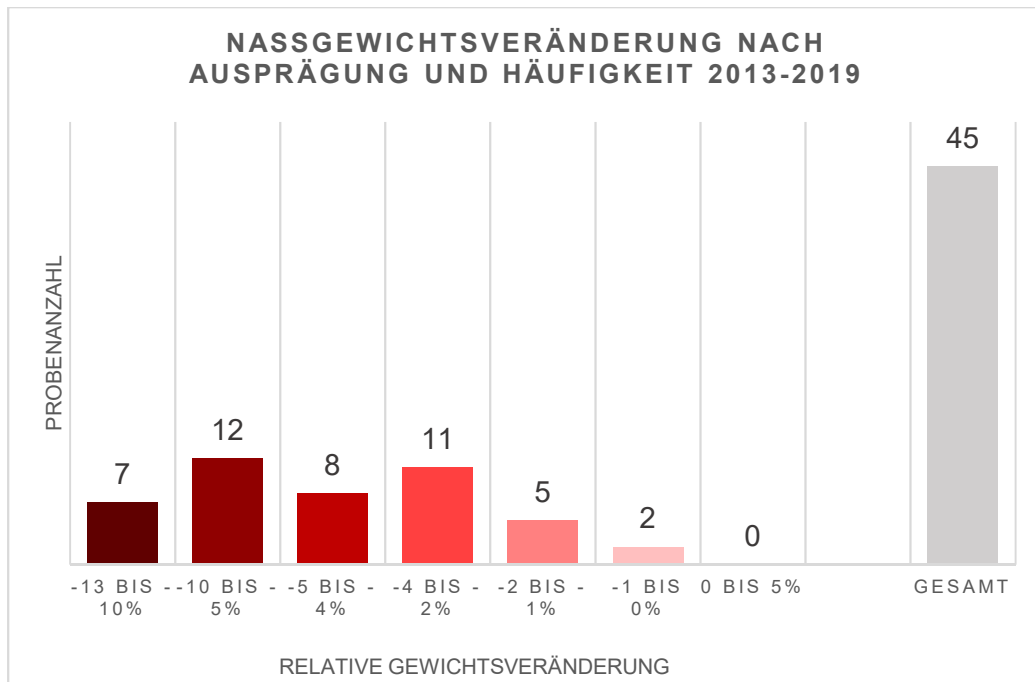


Abb. 13: Veränderung des Nassgewichts nach Ausprägung und Häufigkeit zwischen 2013-2019. (Eigene Darstellung).

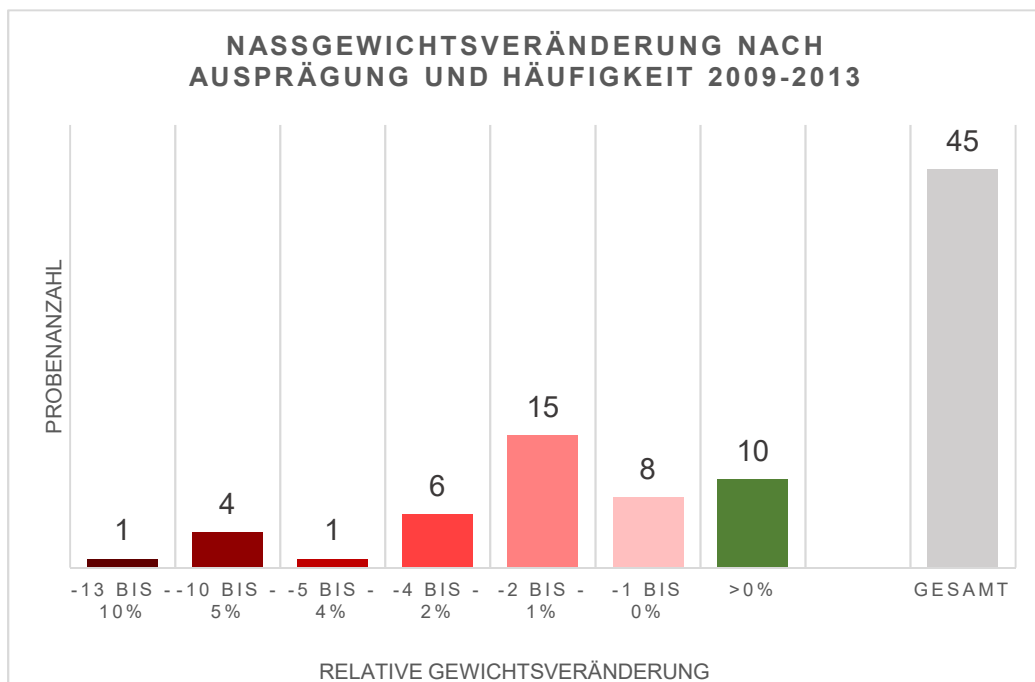


Abb. 14: Veränderung des Nassgewichtes nach Ausprägung und Häufigkeit zwischen 2009-2013.

(Eigene Darstellung)

Bei Differenzierung nach dem Abbaugrad zeigt sich, dass der Nassgewichtsrückgang unverändert in allen drei Abbaugraden stattfindet. Das mag auf den ersten Blick verwirren (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), korrigiert man jedoch die durch Lufteinschluss zu leicht gewogenen Proben (solche mit Gewichtszunahme), verteilen sich die Proben in 2013 und 2019 gleichermaßen auf die Abbaugrade. Es kann daraus zumindest geschlossen werden, dass ein Abbau unabhängig vom Verhältnis des in dem Probenholz enthaltenem Wasser und seiner Holzmasse stattfindet.

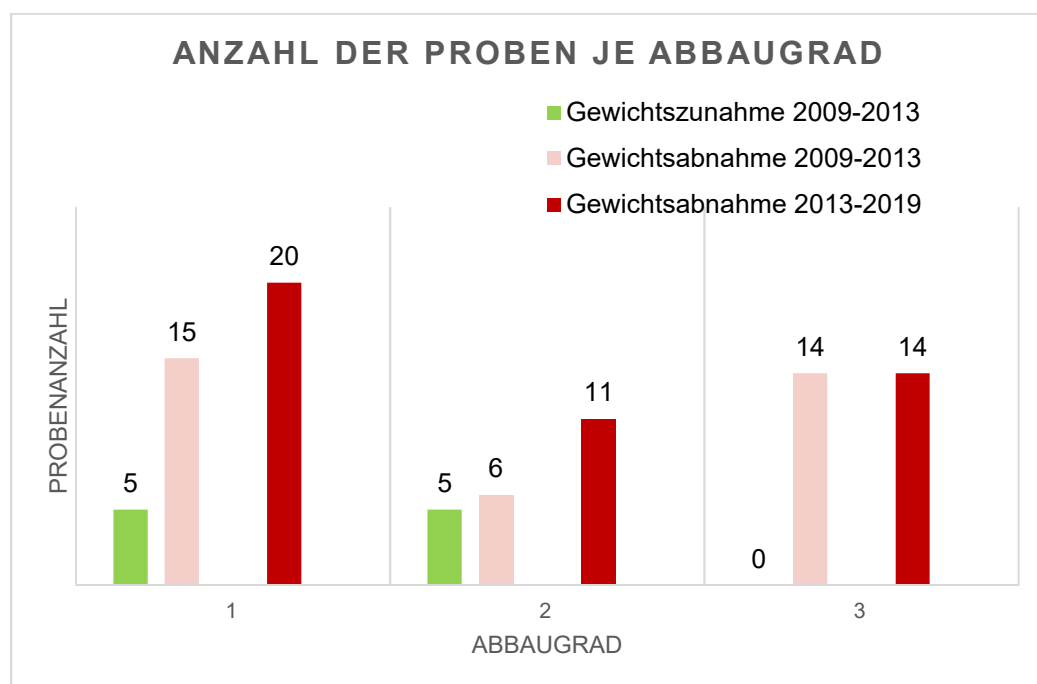


Abb. 15: Gewichtsveränderungen innerhalb der Abbaugrade im Vergleich von 2009-2013 (hellgrün / rosa) und 2013-2019 (rot).

(Eigene Darstellung)

Mittelt man nun den prozentualen Nassgewichtsverlust über alle Proben mit gleichem Abbaugrad, zeigt sich, dass Proben mit einem U_{\max} von über 400% einen deutlich höheren mittleren prozentualen Gewichtsverlust erfahren haben (Abb. 16).

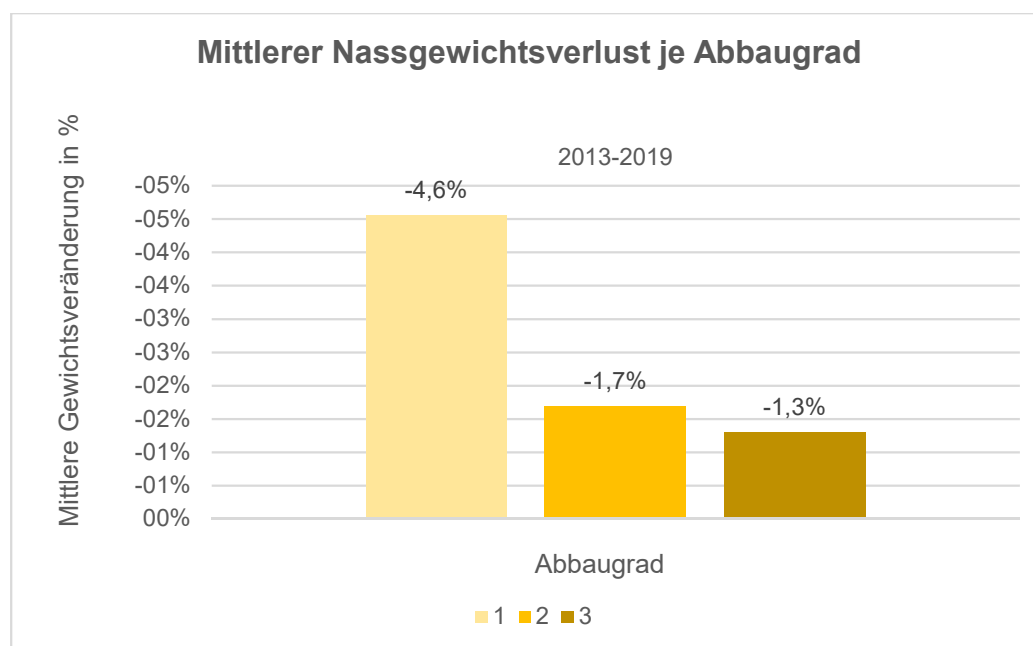


Abb. 16: Mittlere prozentuale Nassgewichtsabnahme je Abbaugrad.

(Eigene Darstellung)

Auch wenn der Gewichtsverlust mit einem höheren Abbaugrad korreliert, lässt sich hieraus kein Kausalzusammenhang ableiten. Zum einen sind die genauen Einflussgrößen nicht bekannt, zum anderen handelt es sich bei den Proben mit einem Abbaugrad von 1 mit weniger als durchschnittlich 400g Ausgangsnassgewicht (2013) im Vergleich zu 1800g (Abbaugrad 2) und 1952g Nassgewicht (Abbaugrad 3) vorrangig um kleine Probekörper, bei denen Substanzverlust in Relation stärker ins Gewicht fällt.

Für die Wägungen unter Wasser (korrespondierend zur Holzmasse, vgl. Formel (1)) lassen sich die gleichen Effekte beobachten. Zwischen 2013 und 2019 gab es lediglich Gewichtsabnahmen, wobei 30 von 45 Proben mindestens 3% bezogen auf ihr Unterwassergewicht verloren haben. Auch hier findet bei Proben mit einem maximalen Wasseraufnahmevermögen von >400% ein prozentual stärkerer Abbau statt bei gleichzeitig geringem Ausgangsgewicht. Eine zeitliche Betrachtung der absoluten und relativen Veränderung in der Holzmasse für verschiedene Probengrößen verdeutlicht den Effekt. Die Diagramme in Abb. 17 und Abb. 18 zeigen zusätzlich, dass die Gewichtsabnahme über alle Probengrößen

ßen hinweg konstant im Zeitablauf erfolgt, mit leichter Tendenz zu stärkerem Abbau in den ersten Jahren.³³

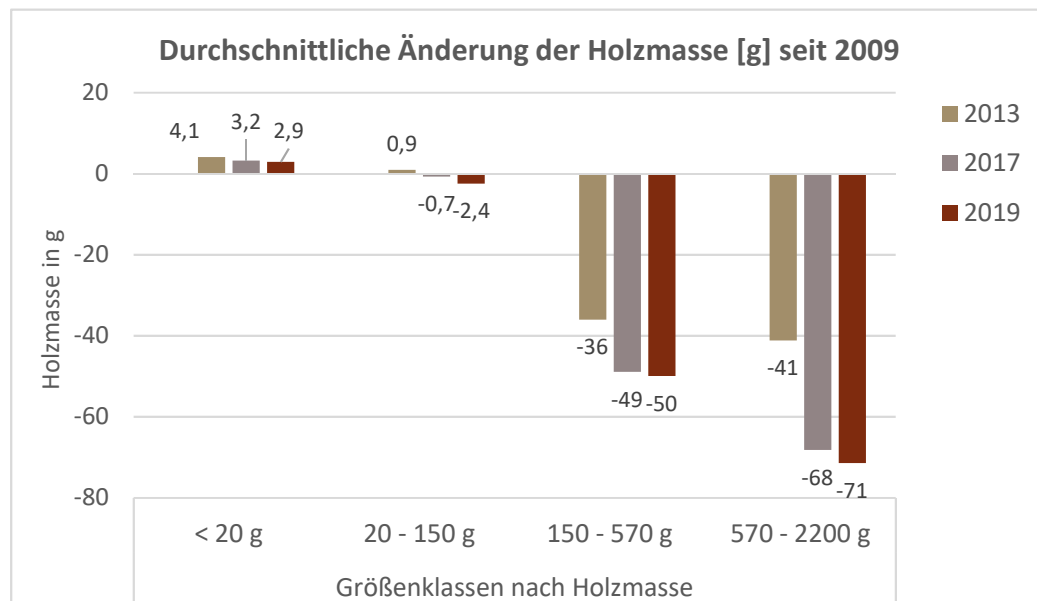


Abb. 17: Absolute Änderung der Holzmasse im Zeitverlauf aufgeschlüsselt nach Größenklassen für unterschiedlich schwere Probenkörper. (Eigene Darstellung)

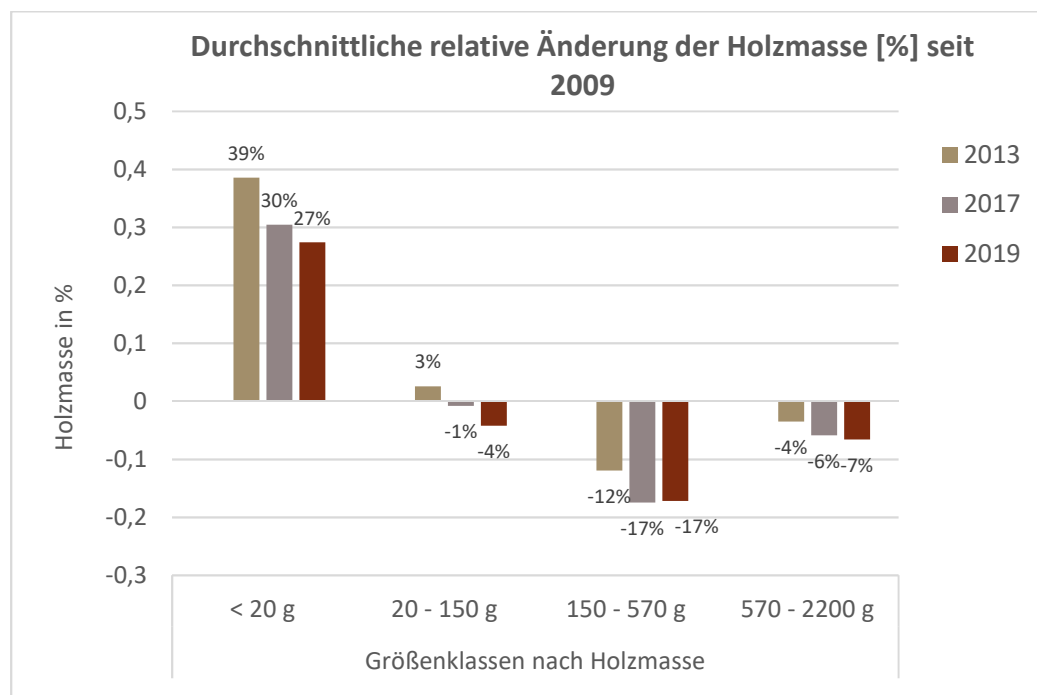


Abb. 18: Absolute Änderung der Holzmasse im Zeitverlauf aufgeschlüsselt nach Größenklassen für unterschiedlich schwere Probenkörper. (Eigene Darstellung)

³³ Für Zeitreihenbetrachtung in Abb. 17 und Abb. 18 wurden Wägungen einbezogen, die in 2017 durchgeführt wurden. Eine 3D-Erfassung erfolgte jedoch nicht, weshalb die Studie sich auf den Vergleich mit 2009 und 2013 fokussiert.

In Bezug auf holzartenspezifische Veränderungen in der Holzmasse lässt sich für Nadelhölzer ein stärkerer Abbau feststellen. Bei den untersuchten Laubhölzern sank die Holzmasse während der 10-jährigen Wasserlagerung um durchschnittlich 6%, bei Nadelhölzern um durchschnittlich 19%. Der größte Schwund geht dabei, wie in Abb. 19 ersichtlich, auf die Kiefer zurück. Die drei untersuchten Kieferproben verlieren allein in den ersten 5 Jahren im Mittel ein Viertel ihrer Holzmasse. Es handelt sich hierbei um Proben aus nur einer Versuchsreihe (V03), dessen Unterwassergewicht zudem bei der ersten Wägung 2009 aufgrund von zu starkem Auftrieb nicht ermittelt werden konnte. Entsprechend vorsichtig sollten diese Werte interpretiert werden, dennoch lässt sich unter Berücksichtigung aller Proben festhalten, dass Nadelholz gegenüber Laubholz tendenziell mehr Substanzverlust während der Wasserlagerung erleidet.

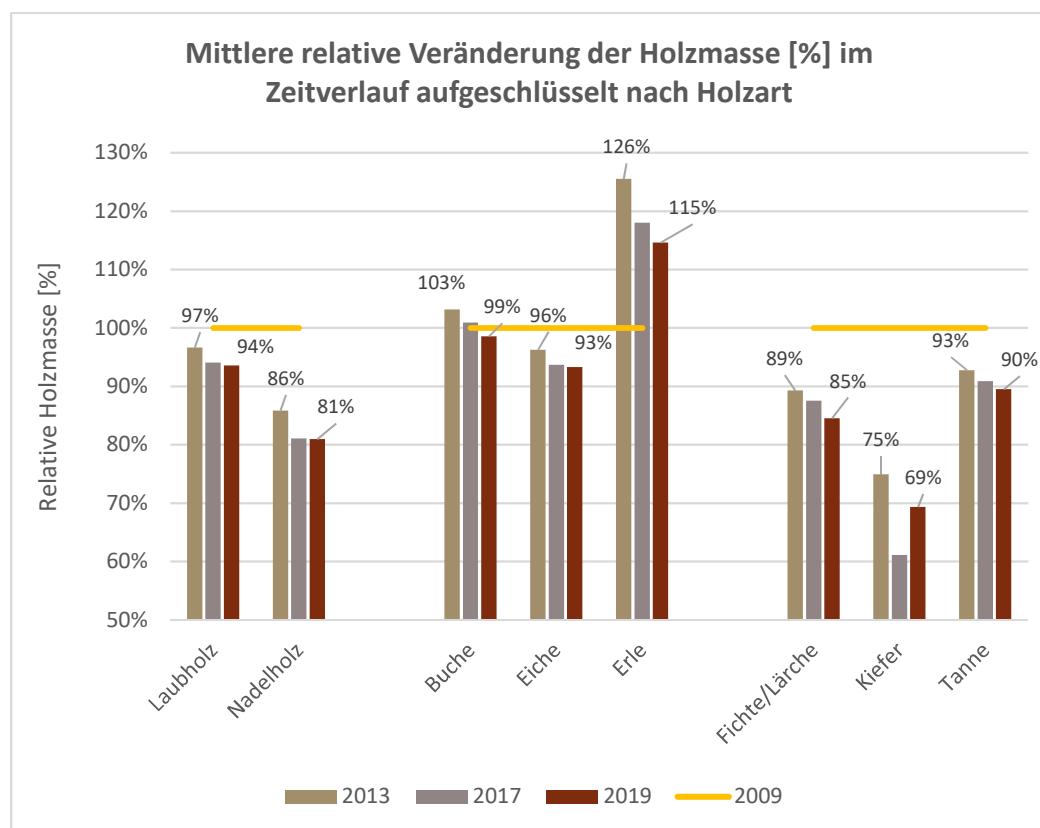


Abb. 19: Relativer Substanzverlust aufgeschlüsselt nach Holzarten und Messzeitpunkt. Als gelbe Horizontallinien ist zur Orientierung der Basiswert (100%) im Jahr 2009 angegeben.

(Eigene Darstellung)

5.2 SCHRUMPFVERHALTEN

5.2.1 Longitudinaler Schwund

Im Vergleich der analogen Messung mit dem 3D-Scan offenbart sich wie auch schon in der vorherigen Studie die hohe Fehleranfälligkeit der händischen Messung. Innerhalb der letzten fünf Jahre hätten es den analogen Messwerten zu Folge bei der Hälfte der Proben eine Längenzunahme bzw. eine Längenabnahme gegeben (Abb. 20).

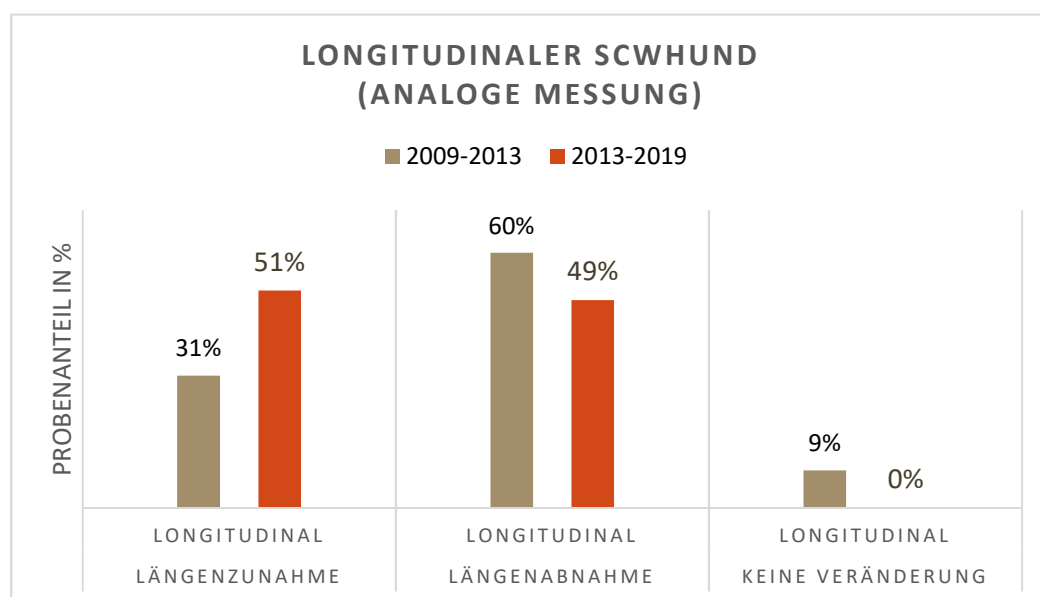


Abb. 20: Anteil der Proben mit longitudinalen Veränderungen bei analoger Messung.

(Eigene Darstellung)

Erwartungsgemäßer fallen dagegen die digitalen Messwerte aus. Demnach ist sowohl in den ersten 5 Jahren als auch in den nachfolgenden 5 Jahren bei jeweils 86% der Hölzer eine Längenabnahme eingetreten, über den Gesamtzeitraum betrachtet liegt der Anteil bei insgesamt 90% (Abb. 21).

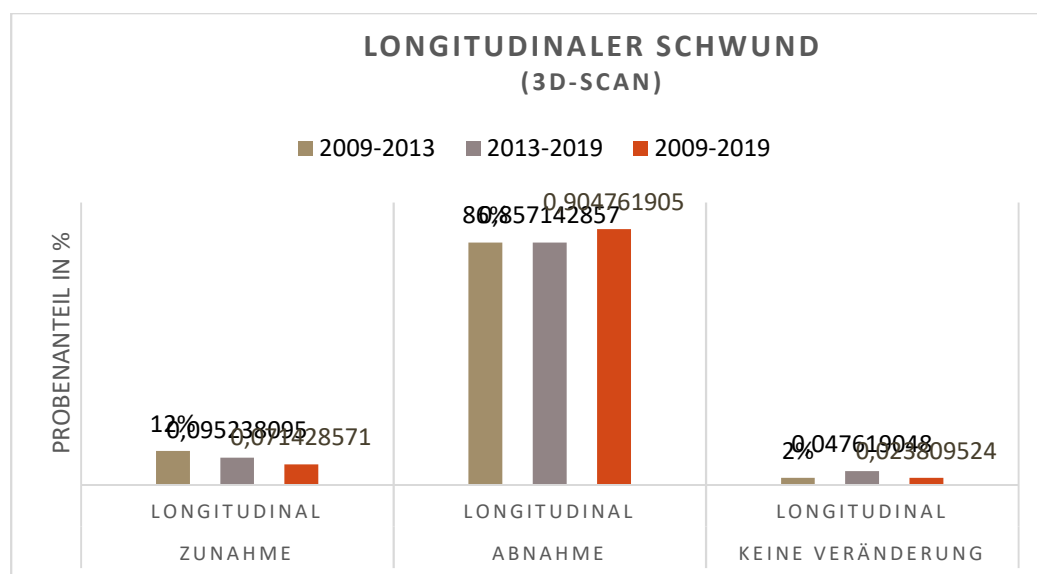


Abb. 21: Probenanteil mit longitudinalen Veränderungen bei 3D-Scan.
(Eigene Darstellung)

Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse werden nachfolgend ausschließlich die 3D-erzeugten Schwindungsmaße betrachtet. Im Vergleich für unterschiedliche Zeiträume zeigt sich, dass bei den meisten Proben ein longitudinaler Schwund von 0 und 0,5% einsetzte. Dies gilt insbesondere bei separater Betrachtung der Werte bis 2013 und für Werte zwischen 2013-2019. Über den gesamten Zeitraum betrachtet relativiert sich die Häufung. Longitudinaler Schwund tritt in unterschiedlichem Ausmaß relativ gleichverteilt auf (Abb. 22)

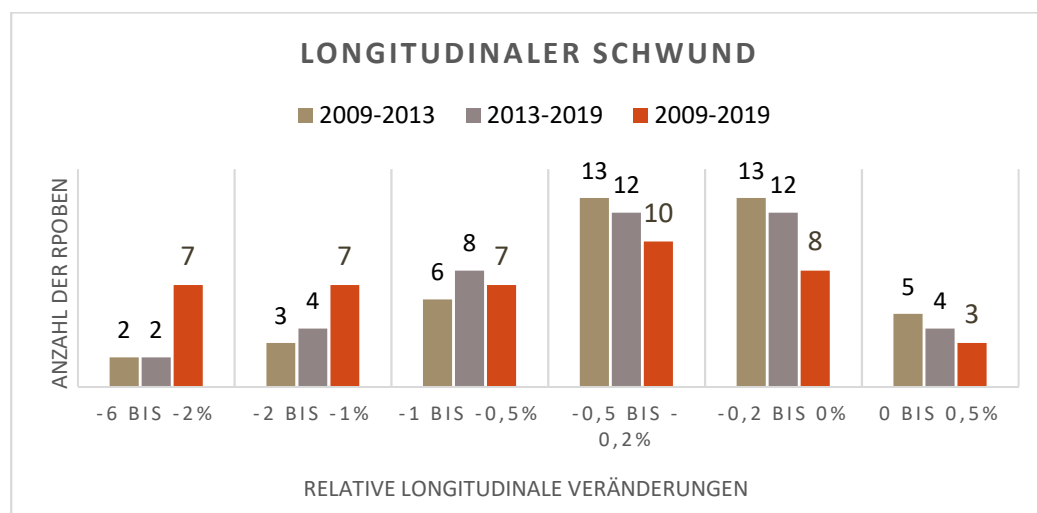


Abb. 22: Relativer Longitudinaler Schwund und Häufigkeit für verschiedene Betrachtungszeiträume. (Eigene Darstellung)

Bezogen auf den Abbaugrad lässt sich für die letzten 5 Jahre festhalten, dass alle Proben mit einem Abbaugrad von 1, also dem stärksten Abbaugrad, longitudinalen Schwund zeigen. Unter den Proben mit dem Abbaugrad 2 wurde für jede 5. Probe eine Längenzunahme ermittelt. Unter den Proben mit einem Abbaugrad zeigen 30% keine Veränderung oder einen Längenzuwachs (Abb. 23).

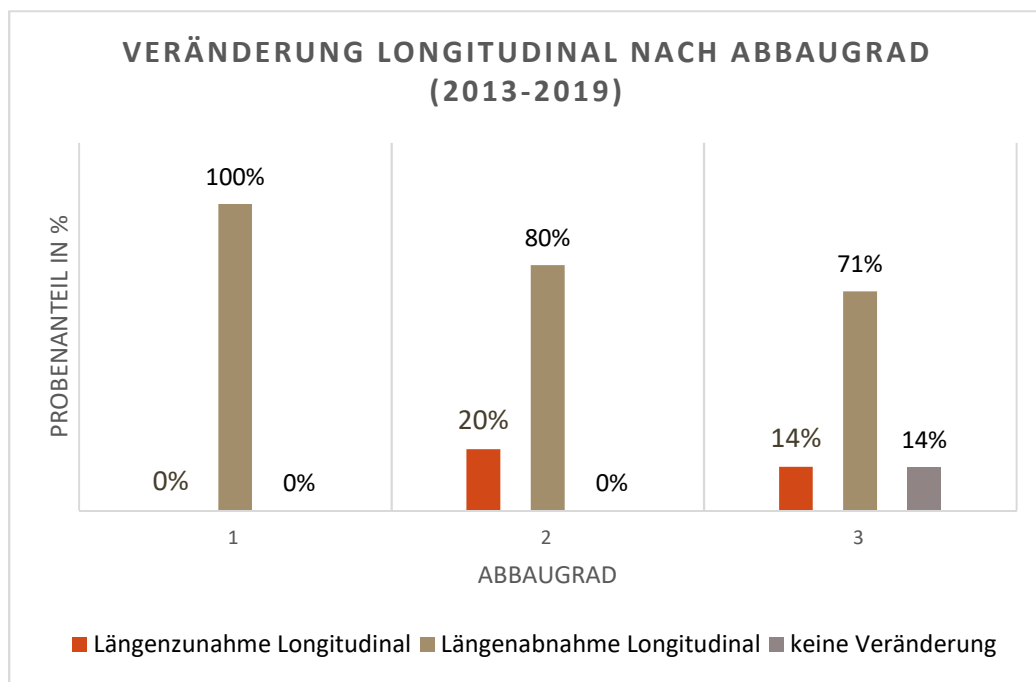


Abb. 23: Longitudinale Veränderungen innerhalb der Abbaugrade.

(Eigene Darstellung)

5.2.2 Radialer Schwund

Sowohl bei der Ermittlung der radialen als auch der tangentialen Veränderung mussten Probenwerte von je 3 Proben unberücksichtigt bleiben. Für diese zeigten sich Abweichungen zu 2013, die sich nicht aus den Rohdaten ableiten ließen und vermutlich auf ein Berechnungsproblem in der Software zurückgehen.

Der radiale Schwund bewegt sich für den Zeitraum 2013-2019 (grau) zwischen 0 bis 7%, wobei sich Häufungen um Abnahmen von 0 bis -0,2% und -2 bis -5% zeigen (Abb. 24). Auch in radialer Richtung wurden zwischen 2013-2019 Zunahmen gemessen. Bei den betreffenden 6 Proben beträgt diese bis zu 0,5%.

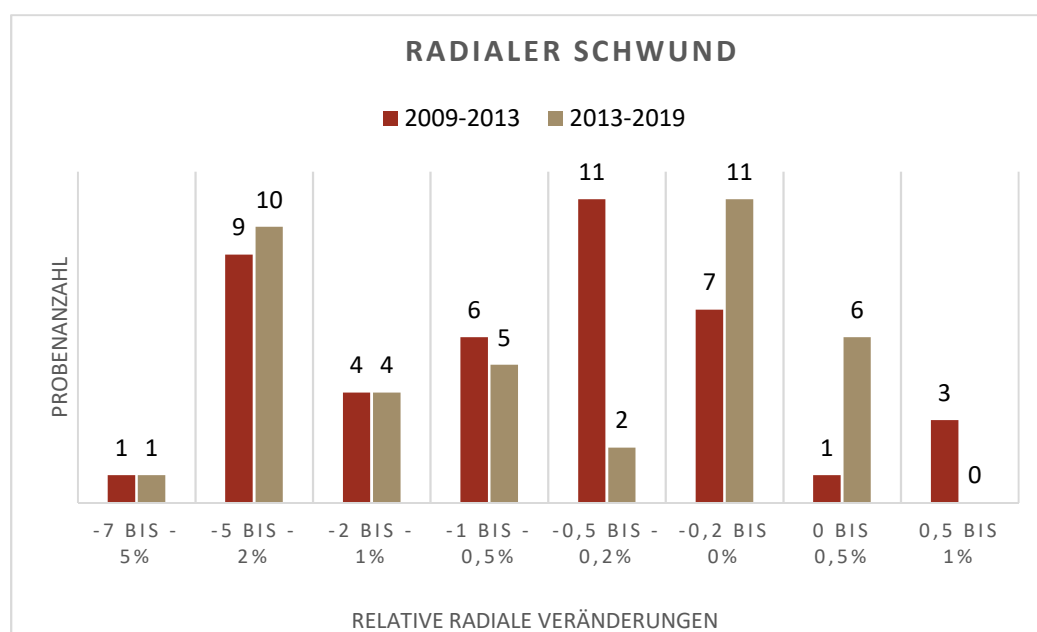


Abb. 24: Relativer radialer Schwund und Häufigkeit für verschiedene Betrachtungszeiträume.
(Eigene Darstellung)

Für den überwiegenden Teil der Proben mit radialer Längenzunahme liegt ein mittlerer bis schwacher Abbaugrad vor. Dies betrifft jeweils jede 4. Probe. (Abb. 25).

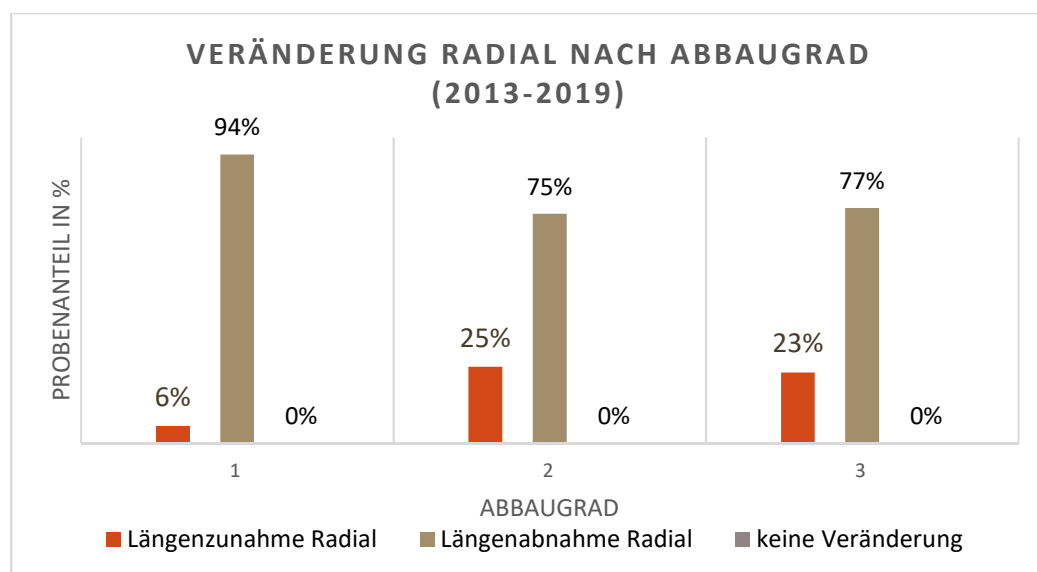


Abb. 25: Radiale Veränderungen innerhalb der Abbaugrade.

5.2.3 Tangentialer Schwund

Die tangentialen Veränderungen sind auch nach 5 weiteren Jahren der Wasserlagerung ähnlich gelagert wie bis 2013. Mehr als Dreiviertel der Proben sind wie auch in den ersten 5 Jahren von Schwund betroffen. (Abb. 26). Wie bereits erwähnt, konnten auch in diese Auswertung nur 39 der 42 Proben aufgrund der Berechnungsprobleme einfließen.

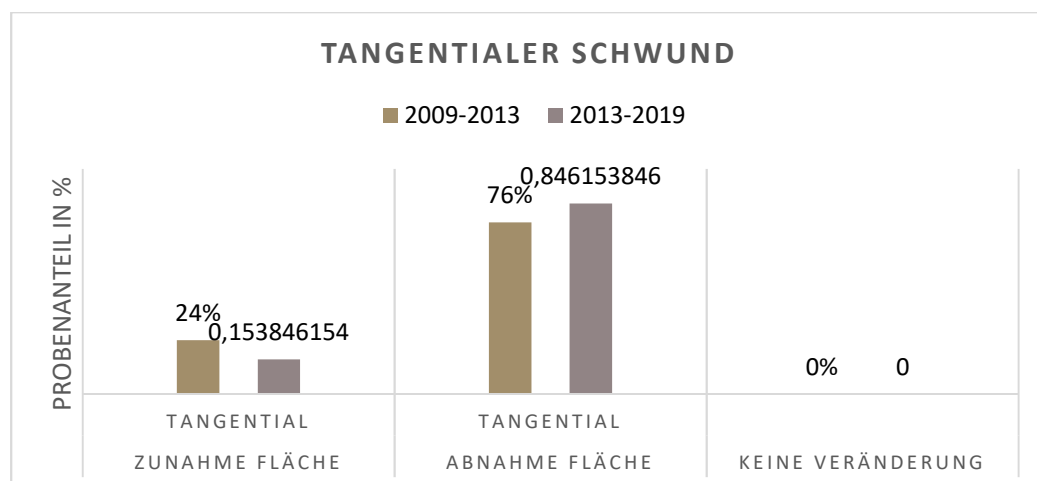


Abb. 26: Probenanteil mit longitudinalen Veränderungen für verschiedene Betrachtungszeiträume. (Eigene Darstellung).

Betrachtet man den Umfang der tangentialen Veränderung, nimmt der Schwund im Mittel im Betrachtungszeitraum 2013-2019 im Vergleich zu 2009-2013 zu. 15 von 42 Proben, das entspricht immerhin einem Anteil von 35%, weisen eine tangentiale Veränderung zwischen -1% und -5% auf (Schwund) (Abb. 27).

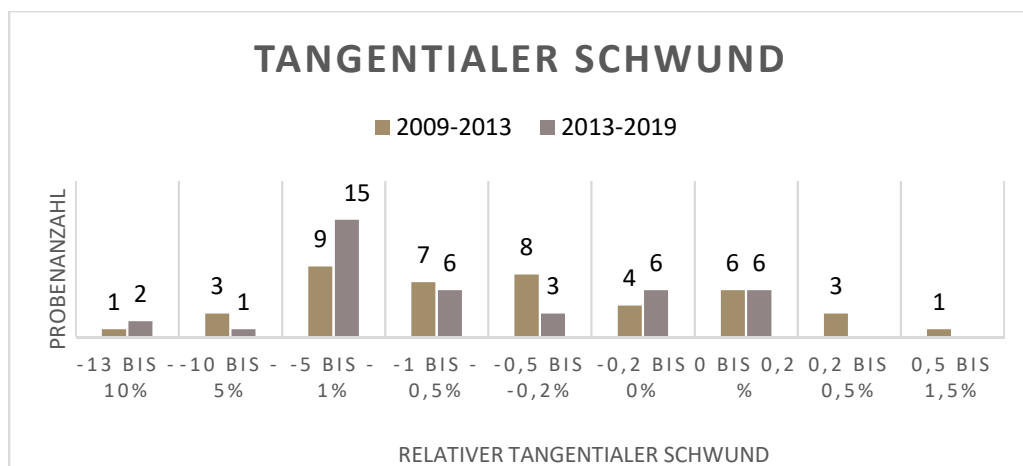


Abb. 27: Relativer tangentialer Schwund und Häufigkeit für verschiedene Betrachtungszeiträume. (Eigene Darstellung)

Bei diesem Schwundmaß sind alle Proben mit einem hohen Abbaugrad (1) vom Schwund betroffen, während unter den Nasshölzern mit geringerem Abbaugrad für jeweils mindestens jeden 5. Probenkörper eine tangentiale Längenzunahme ermittelt wurde (Abb. 28).

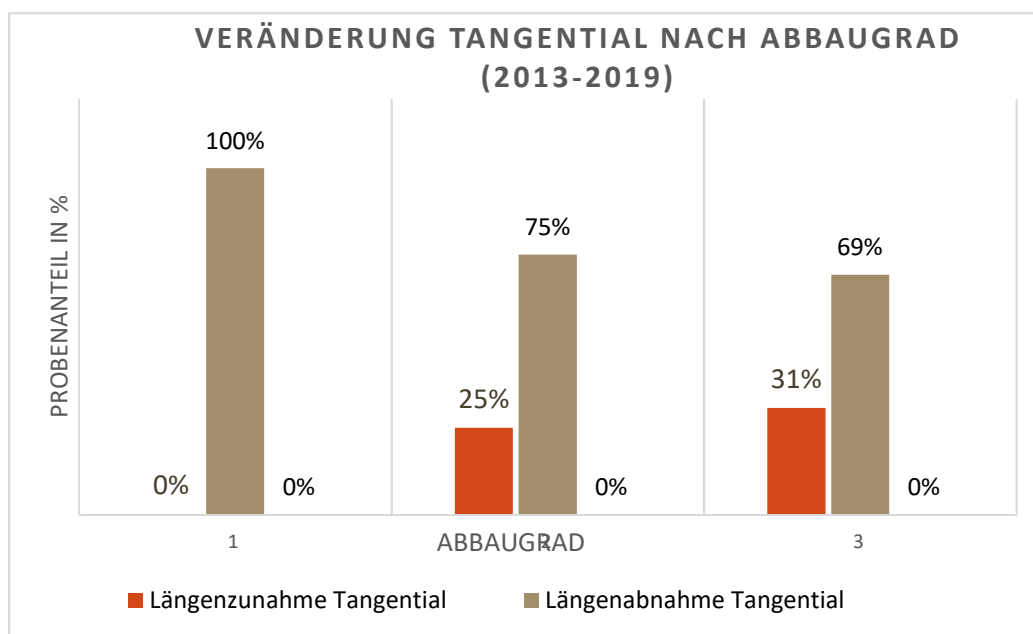


Abb. 28: Tangentiale Veränderungen innerhalb der Abbaugrade.

5.3 VOLUMENÄNDERUNGEN

Der Vergleich über die Betrachtungszeiträume 2009-2013 sowie 2013-2019 zeigt konstante Volumenänderungen, wobei wie bereits nach den ersten 5 Jahren der Wasserlagerung auch nach 10 Jahren noch bei 2 Proben (V20_022 und V23_026) eine Volumenzunahme ermittelt wurde. Es handelt sich um Proben mit einem mittleren bis schwachen Abbaugrad, wie aus dem Diagramm in Abb. 30 entnommen werden kann. Bei den meisten Hölzern liegt die Volumenveränderung wie in 2013 bei -1 bis -5% und ist damit erwähnenswert hoch. Bei immerhin noch 12 Proben. Der 2. größte Anteil (12 Proben) entfällt auf Veränderungen um nur wenige Zehntelprozent und sind damit sehr gering.

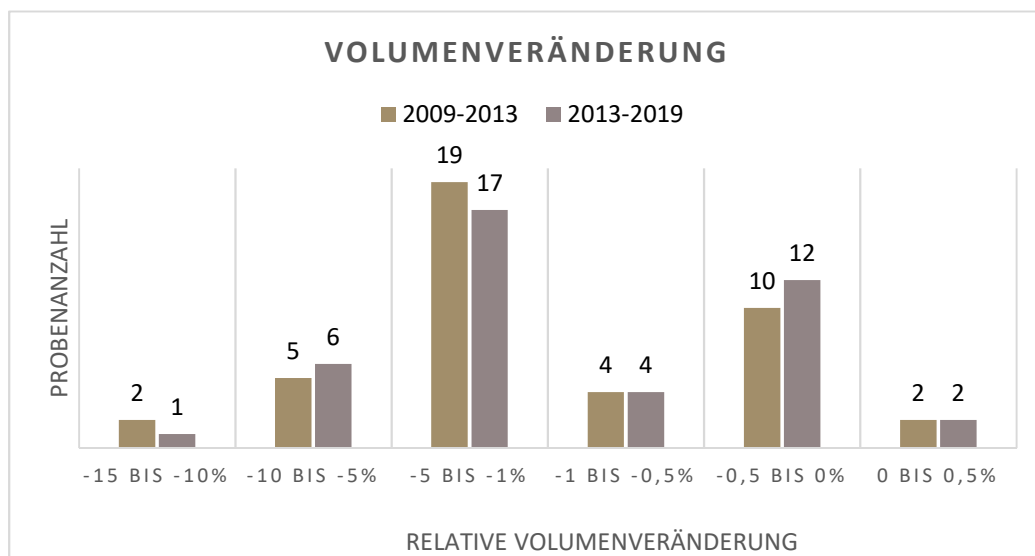


Abb. 29: Häufigkeiten für relative Volumenänderungen. (Eigene Darstellung)

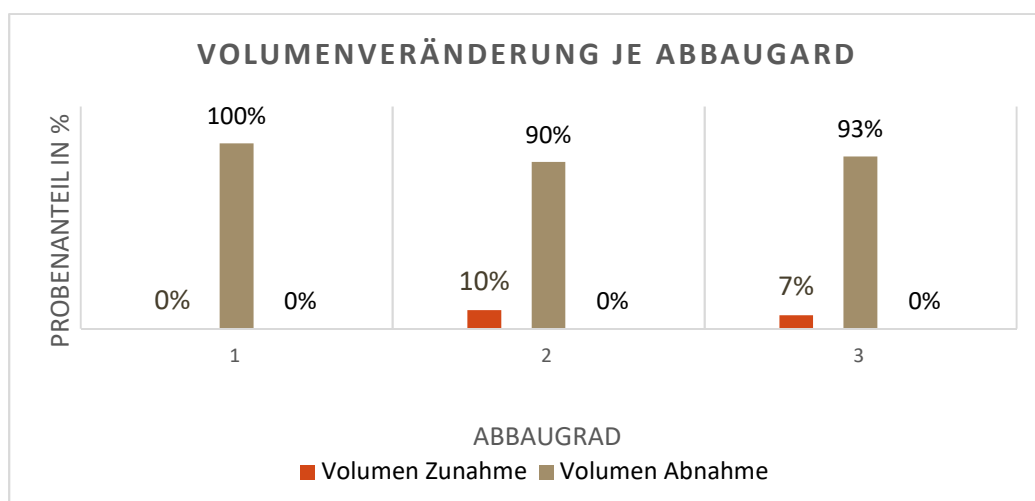


Abb. 30: Volumenveränderungen bezogen auf den Abbaugrad der Proben. (Eigene Darstellung).

6 ZUSAMMENFASSUNG

Die Studie zeigt, dass auch nach 5 bis 10 Jahren noch Abbauprozesse stattfinden. Sie sind vergleichbar hoch wie zu Beginn der Einlagerung der Proben mit leichter Tendenz zur Verstärkung. Aufgrund einer über verschiedene Betrachtungszeiträume hinweg ähnlichen Verteilung der Proben hinsichtlich der Veränderungsraten ist anzunehmen, dass auch probenspezifische Aspekte eine Rolle bei dem Grad der Zersetzung spielen, die in dieser Studie nicht untersucht werden können. Grundsätzlich kann diese Studie nicht leisten, Gründe für physikalisch messbare Veränderungen zu identifizieren, sondern sie lediglich in ihrem Umfang aufzeigen. Vergleichbarkeit der Messreihen wird durch Einsatz möglichst gleicher Bedingungen (Proben, Lagerung, Messprinzip und -verfahren, Erhebungsrhythmus) angestrebt, allein durch wechselnde durchführende Personen ergeben sich bereits leichte Abweichungen, die nicht isoliert erfasst und betrachtet werden können. Auch Messfehler und unentdeckte Auswertungsfehler können zu Verzerrungen und Fehlinterpretationen führen.

Angesichts der unter kontrollierten Bedingungen unter Wasser verlangsamt ablaufenden Abbauprozesse erscheint ein 5-Jahresrhythmus für diese Studie angemessen, um einsetzende physikalische und über Mess- und Erhebungsfehler hinausgehende Veränderungen mit den zur Verfügung stehenden physikalischen Messverfahren erfassen und sinnvoll auswerten zu können. Kürzere Erhebungsabstände schaffen grundsätzlich eine größere Datenbasis, führen aber bei Nassholproben zu Verzerrungen der Messgrößen, da die Hölzer aufgrund ihrer druckempfindlichen Oberfläche durch die Messprozedur Substanz verlieren. Dadurch würde durch häufige direkte äußere Einflussnahme gerade die Größe im Zeitverlauf wesentlich beeinflusst werden, die Untersuchungsgegenstand ist.

Der Zustand der Proben nach 10-jähriger Wasserlagerung unterscheidet sich bereits deutlich vom Zustand im Jahr 2009. Beim Übereinanderlegen der 3D-Modelle zum Abgleich von Kantenveränderungen musste häufig manuell gearbeitet werden, da die Software bereits Schwierigkeiten hatte, aufgrund zu starker Kantenabnutzung Vergleichspunkte zu finden. Die tiefere Auswertung der Modelle ist daher auch eine noch zu leistende Aufgabe, um die Ergebnisse dieser Studie zu ergänzen. Dies war im verfügbaren Zeitrahmen dieser Arbeit nicht möglich. In Ergänzung an die hier gezeigten Ergebnisse könnten zudem zusätzliche Analysen auf Ebene der Holzarten sowie hinsichtlich des Alters und ihrer Bodenlagerungs-

bedingungen weitere Erkenntnisse zur Eignung von Hölzern für eine längere Wasserlagerung liefern.

7 LITERATURVERZEICHNIS

Bertinetti u. a. 2016

L. Bertinetti/P. Fratzl/T. Zemb, Chemical, colloidal and mechanical contributions to the state of water in wood cell walls. *New J. Phys.* 18, 8, 2016, 1–15.

Colombini u. a. 2009

M. Colombini/J. Lucejko/F. Modugno u. a., A multi-analytical study of degradation of lignin in archaeological waterlogged wood. *Talanta* 80, 2009, 61–70.

Denninger 1968

E. Denninger, Strukturen und Eigenschaften des Holzes. In: Kulturministerium Baden-Württemberg (Hrsg.), *Nachrichtenblatt der Denkmalpflege in Baden-Württemberg. Organ der Staatlichen Ämter für Denkmalpflege* 11 (Freiburg i. Br. 1968) 68–71.

Galanulis 2019

K. Galanulis, ATOS Triple Scan – Industrieller optischer 3D-Digitalisierer.
<<https://www.gom.com/de/messsysteme/atos/atos-triple-scan.html>>.

Gelbrich u. a. 2012

J. Gelbrich/E. Iris Kretschmar/N. Lamersdorf u. a., Laboratory Experiments as Support for Development of In Situ Conservation Methods. *Conservation and Management of Archaeological Sites* 14, 1-4, 2012, 7–15.

Gelbrich/Poelmans 2013

J. Gelbrich/L. Poelmans, Post-excavation storage of large waterlogged wooden objects – pilot project in monitoring of degradation activity. Unveröffentlichter Beitrag zur 12th ICOM-CC Group on Wet Organic Archaeological Material (WOAM) Conference May 13-17, 2013 at Istanbul Turkey (Bremerhaven/Brüssel 2013).

Jong 1977

J. de Jong, Conservation techniques for old waterlogged wood from shipwrecks found in the Netherlands. . In: A. H. Walters (Hrsg.), *Biodeterioration Investigation Techniques* (London 1977) 295–338.

Kaiser 2014

S. Kaiser, Studie über die Folgen der Langzeitlagerung von archäologischem Nassholz in deionisiertem Wasser 7, 2014, 81–91.

Kühnen/Wagenführ 2002

R. Kühnen/R. Wagenführ, Werkstoffkunde Holz für Restauratoren. Bücherei des Restaurators 6 (Leipzig 2002).

Mazzola u. a. 2009

C. Mazzola/W. Muskalla/M. Wittköpper, Das Kur-Projekt "Massenfunde in archäologischen Sammlungen". Restaurierung und Archäologie : Konservierung, Restaurierung, Technologie, Archäometrie 2 (2009), 2009, 133–138.

McConnachie u. a. 2008

G. McConnachie/R. Eaton/M. Jones, A Re-evaluation of the Use of Maximum Moisture Content Data for Assessing the Condition of Waterlogged Archaeological Wood. e-Preservation Science 5, 2008.

Palla u. a. 2013

F. Palla/F. P. Mancuso/N. Billeci, Multiple approaches to identify bacteria in archaeological waterlogged wood. Journal of Cultural Heritage 14, 3, Supplement, 2013, e61-e64.

Schorsch 2019

Schorsch, Triangulation (Messtechnik).

<[https://de.wikipedia.org/wiki/Triangulation_\(Messtechnik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Triangulation_(Messtechnik))>.

Weise 1969

A. Weise, Auftrieb. Hydrostatischer Auftrieb. In: H. Franke (Hrsg.), Lexikon der Physik³ 1 (Stuttgart 1969) 103.

8 ANHANG

8.1 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<i>Abb. 1: Probenanteil aufgeschlüsselt nach Holzart und Alter.</i>	4
<i>Abb. 2: Probe 26 der Versuchsreihe 23 im 3D-Modell 2009 (links) und 2019 (rechts) mit erkennbarer Rissbildung.</i>	5
<i>Abb. 3: Mit demineralisiertem Wasser gefülltes Wannenbehältnis mit eingelagerten Probekörpern.</i>	6
<i>Abb. 4: Makroskopische Merkmale von Holz.</i>	8
<i>Abb. 5: Holzanatomische Richtungen.</i>	9
<i>Abb. 6: 3D-Modell der Faserbestandteile in der Zellwand von Holz.</i>	10
<i>Abb. 7: Verformungsmuster in verschiedenen Bereichen des Holzes.</i>	11
<i>Abb. 8: Körbchenaufhängung zur Unterwasserwägung der Probekörper.</i>	15
<i>Abb. 9: Archimedisches Prinzip in experimenteller Darstellung.</i>	17
<i>Abb. 10: Grafische Darstellung der Abbaugrade 3 bis 1 nach de Jong am Beispiel der europäischen Eiche.</i>	19
<i>Abb. 11: ATOS III Rev. 02 mit 3D-Triple-Scan Technologie bei der Erfassung eines Probekörpers am i3mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, Hochschule Mainz.</i>	20
<i>Abb. 12: Probekörper mit Markierungen zur Erfassung der Dimensionsänderung aller drei holzanatomischen Richtungen.</i>	22
<i>Abb. 13: Veränderung des Nassgewichts nach Ausprägung und Häufigkeit zwischen 2013-2019.</i>	24
<i>Abb. 14: Veränderung des Nassgewichtes nach Ausprägung und Häufigkeit zwischen 2009-2013.</i>	24
<i>Abb. 15: Gewichtsveränderungen innerhalb der Abbaugrade im Vergleich von 2009-2013 (hellgrün / rosa) und 2013-2019 (rot).</i>	25
<i>Abb. 16: Mittlere prozentuale Nassgewichtsabnahme je Abbaugrad.</i>	26
<i>Abb. 17: Absolute Änderung der Holzmasse im Zeitverlauf aufgeschlüsselt nach Größenklassen für unterschiedlich schwere Probekörper. (Eigene Darstellung)</i>	27
<i>Abb. 18: Absolute Änderung der Holzmasse im Zeitverlauf aufgeschlüsselt nach Größenklassen für unterschiedlich schwere Probekörper. (Eigene Darstellung)</i>	27
<i>Abb. 19: Relativer Substanzverlust aufgeschlüsselt nach Holzarten und Messzeitpunkt. Als gelbe Horizontallinien ist zur Orientierung der Basiswert (100%) im Jahr 2009 angegeben.</i>	28
<i>Abb. 20: Anteil der Proben mit longitudinalen Veränderungen bei analoger Messung.</i>	29
<i>Abb. 21: Probenanteil mit longitudinalen Veränderungen bei 3D-Scan.</i>	30

<i>Abb. 22: Relativer Longitudinaler Schwund und Häufigkeit für verschiedene Betrachtungszeiträume. (Eigene Darstellung)</i>	30
<i>Abb. 23: Longitudinale Veränderungen innerhalb der Abbaugrade.</i>	31
<i>Abb. 24: Relativer radialer Schwund und Häufigkeit für verschiedene Betrachtungszeiträume.</i>	32
<i>Abb. 25: Radiale Veränderungen innerhalb der Abbaugrade.</i>	33
<i>Abb. 26: Probenanteil mit longitudinalen Veränderungen für verschiedene Betrachtungszeiträume. (Eigene Darstellung).</i>	33
<i>Abb. 27: Relativer tangentialer Schwund und Häufigkeit für verschiedene Betrachtungszeiträume. (Eigene Darstellung)</i>	34
<i>Abb. 28: Tangentiale Veränderungen innerhalb der Abbaugrade.</i>	34
<i>Abb. 29: Häufigkeiten für relative Volumenänderungen. (Eigene Darstellung)</i>	35
<i>Abb. 30: Volumenveränderungen bezogen auf den Abbaugrad der Proben. (Eigene Darstellung).</i>	35

8.2 DIAGRAMME

siehe USB-Stick

8.3 ROHDATEN

siehe USB-Stick