

Abschlussbericht

DBU- Projekt AZ. 34558/01



Standicherheit von frei bewitterten Natursteindenkmalen: Beurteilung des Einflusses der Feuchte auf die Ultraschallgeschwindigkeit

u. a. am Beispiel von national wertvollen, anthropogen geschädigten Objekten aus dem Park Sanssouci

Wolfram Köhler (Labor Köhler), Jeannine Meinhardt (FH Potsdam, Studiengang Konservierung und Restaurierung, Fachrichtung Stein), Roland Will (Stiftung Preußische Schlösser und Gärten), Rolf Snethlage

Die ausgezeichnete Masterarbeit von Sarah-Theresa Becker (2023, Studiengang Konservierung und Restaurierung, Fachrichtung Stein, FH Potsdam) bildet den Abschlussbericht zum DBU-Vorhaben.

März 2023



FACHHOCHSCHULE POTSDAM
FACHBEREICH STADT | BAU | KULTUR
MASTERSTUDIENGANG KONSERVIERUNG UND RESTAURIERUNG
Studienrichtung Stein

**Einfluss der Materialfeuchte auf die zerstörungsfreie Prüfung
mit Ultraschall im Labor und in situ**

Untersuchungen an Cottaer und Ummendorfer Sandstein

Masterthesis

Autorin: Sarah-Theresa Becker

Matrikel-Nr.: 15585

E-Mail: sarah-theresa.becker@posteo.de

Erstprüferin: Prof. Dr. Jeannine Meinhardt, Fachhochschule Potsdam

Zweitprüfer: Roland Will, Leiter der Skulpturenrestaurierung, Stiftung Preußische Schlösser und Gärten

Bearbeitungszeitraum: 4. Oktober 2022 – 8. März 2023

Kurzzusammenfassung

Becker, Sarah-Theresa

Einfluss der Materialfeuchte auf die zerstörungsfreie Prüfung mit Ultraschall im Labor und in situ: Untersuchungen an Cottaer und Ummendorfer Sandstein

Masterthesis, 08. März 2023, 113 Seiten, 36 Abbildungen

Erstprüferin: Prof. Dr. Jeannine Meinhardt (Fachhochschule Potsdam)

Zweitprüfer: Roland Will (Stiftung Preußische Schlösser und Gärten)

Das Ultraschalllaufzeitverfahren ist eine bedeutende Untersuchungsmethode in der Steinrestaurierung, die zerstörungsfreie Beurteilungen des Gefügestands von Objekten in situ ermöglicht. Da im Gesteinsporenraum vorhandene Feuchtigkeit die Ultraschalllaufzeit beeinflusst, kann es jedoch zu Fehlinterpretationen oder eingeschränkter Vergleichbarkeit von Messwerten kommen. In Sandsteinen sind diese Zusammenhänge noch wenig erforscht. Durch die Untersuchung des Einflusses der Materialfeuchte auf die Ultraschalllaufzeit soll eine Grundlage geschaffen werden, um Ultraschallmessungen in Zukunft zu verbessern und damit neue Möglichkeiten des Monitorings von Kunst- und Kulturgütern aus Sandstein zu ermöglichen. Die Erkenntnisse der vorliegenden Masterarbeit beruhen im Wesentlichen auf der Auswertung eines Messprogramms, das über die Dauer von 2,5 Jahren an Skulpturen des Neuen Palais in Potsdam durchgeführt wurde. Ergänzend dazu wurden Laboruntersuchungen durchgeführt und ausgewertet. Es konnte gezeigt werden, dass gesteinspezifische Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeit bei zunehmender Materialfeuchte bestehen, dieser Umstand jedoch in der Praxis bei der Beachtung bestimmter Rahmenbedingungen zu vernachlässigen ist.

Schlagworte: Ultraschallprüfung, zerstörungsfreie Prüfung, Materialfeuchte, Cottaer Sandstein, Ummendorfer Sandstein

Abstract

Becker, Sarah-Theresa

Master thesis, 08.03.2023, 113 pages, 36 illustrations

Supervisor: Prof. Dr. Jeannine Meinhardt (University of Applied Science Potsdam)

Supporting Supervisor: Roland Will (Stiftung Preußische Schlösser und Gärten)

Ultrasonic testing is of great importance in stone restoration in order to examine the structural condition of objects. With this method in hand, it is possible to non-destructively and in situ localize possible defects. Since moisture present in the rock pore space influences the ultrasonic velocity, this might lead to misinterpretations and limits the comparability of measured values. For sandstones, this circumstance is still poorly understood. By investigating the influence of material moisture on the ultrasonic transit time, ultrasonic measurements should be improved and thus create the possibility of monitoring art and cultural objects made of sandstone. The findings are based on the evaluation of a measurement program of a superordinate project that was carried out over a period of 2.5 years on sculptures in the Neues Palais in Potsdam. In addition, laboratory tests were carried out and evaluated. It was shown that there is a stone-specific change in ultrasonic velocity with increasing material moisture. In practice, this circumstance can be neglected as long as certain general conditions are kept under control.

Keywords: ultrasonic measurement, non-destructive testing, moisture, Cottaer sandstone, Ummendorfer sandstone

Danksagung

Zu Beginn möchte ich mich bei allen Menschen herzlich bedanken, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Vielen Dank für die Unterstützung, das Engagement und die fachlichen Ratschläge. Mein Dank gilt: Prof. Jeannine Meinhardt, Roland Will, Wolfram Köhler, Prof. Rolf Snethlage, Dipl.- Rest. (FH) Katja Schmeikal (MA), Dipl.-Ing. (FH) Andreas Schultz (MSc), Lale von Baudissin, Tamara Niedtner, Marlene Boshold, Leon Wilke und allen weiteren Menschen, die am der Arbeit zugrundeliegenden DBU-Projekt mitgewirkt haben.

Für die Freundschaft und die breite Unterstützung danke ich Katrin Langenwalter, Patrick Braun, Dr. Manuel Wohde, Frederic Wendland und Joann Niku Zilm.

Zuletzt gilt ein besonderer Dank Philipp Domhardt, meiner Mutter Lydia Kraus-Becker und meiner Schwester Eva-Maria Becker.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung.....	i
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	3
2 Physikalische Grundlagen.....	5
2.1 Gesteinsgefüge und Feuchtetransport.....	5
2.2 Ultraschalllaufzeit im Natursteingefüge.....	10
3 Forschungsstand zum Ultraschalllaufzeitverfahren an Denkmalgesteinen.....	14
3.1 Einfluss der Materialfeuchte auf die Ultraschalllaufzeit.....	14
3.2 Messgenauigkeit und weitere beeinflussende Faktoren in der Praxis.....	22
3.2.1 Wahl der Messfrequenz.....	23
3.2.2 Länge der Messstrecke.....	24
3.2.3 Ankopplung an die Oberfläche.....	25
3.2.4 Einfluss der Temperatur.....	26
3.3 Empfehlungen für die Messung und Auswertung bewitterter Objekte.....	27
4 Probenmaterial Cottaer und Ummendorfer Sandstein.....	32
4.1 Petrografische Eigenschaften.....	33
4.2 Verwitterungsverhalten.....	36
5 Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse des DBU-Projektes.....	38
5.1 Ultraschallgeschwindigkeit und bisherige Untersuchungen zu dessen Feuchteabhängigkeit.....	39
5.2 Simulation der Feuchteverteilung in Skulpturen aus Cottaer Sandstein.....	42
6 Versuche zur Feuchteabhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeit im Labor und in situ.....	46
6.1 Jahreszeitliche Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeit an Skulpturen des Neuen Palais in Potsdam.....	47
6.1.1 Auswahl von Skulpturen aus Ummendorfer und Cottaer Sandstein am Neuen Palais in Potsdam.....	47
6.1.2 Durchführung der Messungen.....	51
6.1.3 Ergebnisse.....	53
6.2 Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit bei Durchfeuchtung und Trocknung.....	60
6.2.1 Probekörperherstellung und Durchführung.....	61
6.2.2 Ergebnisse.....	66

6.3 Konditionierung von Probekörpern in Exsikkatoren.....	72
6.3.1 Versuchsaufbau und Durchführung.....	73
6.3.2 Ergebnisse.....	76
6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	82
6.5 Fehlerbetrachtung.....	84
6.5.1 Fehlerquellen der in situ Messungen.....	84
6.5.2 Fehlerquellen der Labormessungen.....	87
6.6 Diskussion.....	89
7 Ergänzende Empfehlungen für Ultraschalllaufzeitmessungen frei bewitterter Sandsteinobjekte.....	96
8 Fazit und Ausblick.....	100
Literaturverzeichnis.....	102
Abbildungsverzeichnis.....	108
Tabellenverzeichnis.....	112

Anhang

Anhang A: Petrophysikalische Kennwerte von Cottaer und Ummendorfer Sandstein

A.1 Petrophysikalische Kennwerte aus der Literatur.....	A1
A.2 Messprotokoll: Porenradienbestimmung von Ummendorfer Sandstein.....	A2
A.3 Parameter der WUFI Simulation.....	A5

Anhang B: Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

B.1 Allgemeine Messparameter.....	B1
B.2 Messpunkte der Skulpturenmessungen.....	B4
B.3 Klimatische Rahmenbedingungen der Skulpturenmessungen.....	B20
B.4 Box-Whisker-Diagramme der jahreszeitlichen Skulpturenmessungen	B22
B.5 Ergebnisse der jahreszeitlichen Skulpturenmessungen	B26

Anhang C: Parameter und Ergebnisse der Labormessungen

C.1 Gerätebezeichnung und Versuchsaufbau.....	C1
C.2 Messergebnisse von Durchfeuchtung und Trocknung	C3
C.3 Messergebnisse der Akklimatisierung in Exsikkatoren	C7

1 Einleitung

Diese Arbeit entstand im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projektes¹ zur Beurteilung des Einflusses der Feuchte auf die Ultraschallgeschwindigkeit von Sandsteinen. Geplant und anfangs durchgeführt wurde das Projekt vom Labor Köhler in Kooperation mit der Stiftung preußische Schlösser und Gärten (SPSG) und der Fachhochschule Potsdam.

1.1 Problemstellung

Die vorhandene Materialfeuchte beeinflusst die Ultraschallgeschwindigkeit bei der Prüfung von Naturstein, was bereits in verschiedenen Projekten und Studien gezeigt wurde.² Untersuchungen mit Ultraschall sind ein für die Steinrestaurierung und Denkmalpflege unverzichtbares Werkzeug der zerstörungsfreien Materialprüfung. Mögliche Gefügelockerungen an Bau- oder Bildhauergesteinen können über die Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen lokalisiert werden. Die zerstörungsfreie Prüfung in situ ist von besonderer praktischer Relevanz, da mit ihr der Gefügezustand eines Objektes vor Ort ermittelt werden kann, ohne dass Originalsubstanz beschädigt wird bzw. verloren geht. Die in der Praxis auftretenden Unterschiede der Materialfeuchte von Untersuchungsobjekten und deren Einfluss auf die Ultraschallgeschwindigkeit erschwert die Interpretation und Vergleichbarkeit von Messwerten. Besonders wichtig ist eine zuverlässige Vergleichbarkeit von Messwerten bei der Anwendung als Langzeitmonitoring, um den Erhaltungszustand von Kunst- und Kulturgütern zu überwachen, sowie effektive und nachhaltige Konservierungskonzepte entwickeln zu können.

Im Rahmen eines Projektes³ der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) konnte

1 DBU-Projekt „Standesicherheit von frei bewitterten Natursteindenkmälern: Beurteilung des Einflusses der Feuchte auf die Ultraschallgeschwindigkeit, u. a. am Beispiel von national wertvollen, anthropogen geschädigten Objekten aus dem Park Sanssouci“, Az. 34558/01, Start: 23.08.2018.

2 u.a. Köhler (2014) & Fleischer (2002). Vgl. hierzu Abschnitt 3.1.

3 DBU-Projekt „Erarbeitung eines Bewertungs-Leitfadens für Ultraschallmessungen an umweltgeschädigten Marmorskulpturen am Beispiel u. a. des Parks Potsdam Sanssouci (UNESCO-Weltkulturerbe)“, vgl. Köhler (2015).

von dem Physiker Wolfram Köhler, der die Ultraschallprüfung in der Denkmalpflegepraxis maßgeblich etablierte, eine Korrekturformel für den Einfluss der Materialfeuchte bei Marmor gefunden, sowie ein Leitfaden⁴ zur Messung an Marmorskulpturen erarbeitet werden. Für Objekte aus Sandstein existiert eine solche Korrekturformel oder ein Leitfaden zum Umgang mit der Materialfeuchte bei Ultraschalllaufzeitmessungen bisher noch nicht. Feuchtebedingte Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeit bei Sandsteinen wurden aber im Rahmen verschiedener Studien festgestellt.⁵ Die Materialfeuchte im Sandstein stellt folglich eine große Unbekannte dar, die die Interpretation von Messwerten erheblich beeinflussen kann.

1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit gründet sich im DBU-Projekt AZ. 34558/01. Dieses hatte das Ziel, allgemeine Festlegungen für die Durchführung und Auswertung von Ultraschalllaufzeitmessungen und die sich daraus ergebenden Bewertungen des Erhaltungszustandes von Bau- und Bildhauergesteinen herzuleiten. Die Masterarbeit soll an die Erkenntnisse anknüpfen, die im Rahmen des Projekts gewonnen wurden. Zur Beantwortung der Frage, wie die Ultraschallgeschwindigkeit bei Sandsteinen von im Porenraum vorhandener Feuchtigkeit beeinflusst wird, werden bereits durchgeführte Messungen systematisch ausgewertet und ergänzende Untersuchungen durchgeführt. Einen weiteren Untersuchungsgegenstand stellt die Abhängigkeit der Materialfeuchte von der relativen Feuchte des Umgebungsklimas dar. Ebenso soll auf die Frage eingegangen werden, welche Rolle das Volumen der untersuchten Objekte bei den Feuchteausmachmechanismen spielt und wie dieses bei der Messung der Ultraschalllaufzeit berücksichtigt werden muss. Im Zuge dessen wird auch betrachtet, inwieweit die Messung der Ultraschallgeschwindigkeit bei kurzen Messstrecken an Aussagekraft verliert, da in der Denkmalpflegepraxis häufig auch kleine Probekörpervolumen vorkommen.

4 Köhler, 2014.

5 u. a. Esbert et al., 1991.

Die Untersuchungen im DBU-Projekt und der Masterarbeit konzentrieren sich auf Ummendorfer und Cottaer Sandstein, zwei an historischen Baudenkmalern und Skulpturen häufig anzutreffende Varietäten. Die Gesteine wurden für zahlreiche Skulpturen am Neuen Palais im Park Sanssouci in Potsdam und vielen anderen Objekten der mitteldeutschen Denkmal-Landschaft verwendet.⁶

Zusammenfassend lassen sich die folgenden Forschungsfragen formulieren:

- Wie verändert sich die Ultraschallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von im Gestein vorhandener Feuchtigkeit bei Cottaer und Ummendorfer Sandstein?
- Wie verändert sich die Materialfeuchte bei verschiedenen relativen Luftfeuchten und welchen Einfluss haben diese Änderungen auf die Ultraschallgeschwindigkeit? Können auftretende Unterschiede durch die Beschaffenheit des Porenraums erklärt werden?
- Welchen Einfluss haben Volumen und Messstrecke der untersuchten Objekte auf die Ultraschalllaufzeitmessung in Hinblick auf die zuvor genannten Fragen?

Die Resultate der Untersuchungen sollen neben ihren absoluten Ergebnissen vor allem vor dem Hintergrund ihrer Relevanz für die Denkmalpflegepraxis bewertet werden. Die Arbeit unterstützt damit das Ziel des DBU-Projektes, die Messung der Ultraschalllaufzeit unter Beachtung der jeweiligen Materialfeuchte zu optimieren um die Zuverlässigkeit des Verfahrens und damit die Genauigkeit von Rückschlüssen auf den Gefügestand zu verbessern.

1.3 Aufbau der Arbeit

Nach der Darstellung der naturwissenschaftlichen Grundlagen von Ultraschallausbreitung und Feuchtetransportmechanismen in Gesteinen wird zunächst auf den Forschungsstand bzgl. des Feuchteinflusses auf die Ultraschalllaufzeit in Naturstein eingegangen. Hier werden auch Erkenntnisse zu anderen, die Messung beeinflussende Faktoren vorgestellt. Deren Verständnis ist

⁶ u.a. Ehling & Siedel, 2011, S. 136f & S. 244.

notwendig, um Messergebnisse richtig bewerten und interpretieren zu können. Die auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft beruhenden Empfehlungen für Ultraschalllaufzeitmessungen an frei bewitterten Natursteinobjekten werden als Grundlage für die weiteren Überlegungen kurz zusammengefasst.

In einem weiteren Abschnitt werden die in der Literatur vorhandenen physikalischen und petrographischen Eigenschaften der beiden Varietäten aufgearbeitet. Diese Eigenschaften werden später relevant, um auftretende Unterschiede von Feuchtetransport und dessen Einfluss auf die Ultraschallgeschwindigkeit erklären zu können. Hier werden auch gesteinspezifische Erkenntnisse aus bisher im Rahmen des DBU-Projektes erfolgten Auswertungen aufgeführt.

Ausgehend von theoretischen Grundlagen und Forschungsstand wird im Hauptteil der Arbeit der Frage nachgegangen, wie groß der Einfluss der Materialfeuchte auf die Ultraschallgeschwindigkeit bei Cottaer und Ummendorfer Sandstein ist. Hierzu werden zunächst die Daten betrachtet, die im Zeitraum von 2019 bis 2022 für das der Arbeit zugrundeliegende DBU-Projekt an Skulpturen des Neuen Palais in Potsdam erhoben wurden. Die Auswertung soll klären, wie relevant die Materialfeuchte für Messungen in der Praxis ist.

Im Rahmen des DBU-Projektes wurden bereits Laborversuche an Bohrkernen gestartet. Diese Messungen wurden durch die Autorin mit Unterstützung verschiedener Studierender fortgesetzt.⁷ Die Auswertung soll den Einfluss von kapillarer Wasseraufnahme und Trocknung sowie den konkreten Einfluss verschiedener Luftfeuchten auf die Materialfeuchte und damit die Ultraschallausbreitung an den untersuchten Denkmalgesteinen zeigen. Anhand der Betrachtung der Ergebnisse, deren Schwankungsbreiten und möglicher Fehlerquellen im Messvorgang wird diskutiert, mit welcher Genauigkeit die Messung der Ultraschallausbreitungsgeschwindigkeit an Sandstein erfolgen kann und welche Bedeutung diese Messwerte in der Praxis haben können.

⁷ Die detaillierte Urheberschaft der Messdaten kann Anhang C.2 & C.3 entnommen werden. Ebenso wird in Abschnitten 6.2 & 6.3 näher auf die Aufteilung der Durchführung der verschiedenen Messungen eingegangen.

2 Physikalische Grundlagen

Im folgenden Abschnitt werden die physikalischen Grundlagen der im Rahmen der Arbeit durchgeführten Versuche kurz dargestellt. Um die Ergebnisse richtig interpretieren zu können, ist das Verständnis der in Gesteinen vorherrschenden Feuchtetransportmechanismen und der Ultraschallausbreitung notwendig.

2.1 Gesteinsgefüge und Feuchtetransport

Der Transport von Wasser im Gesteinsporenraum kann in flüssiger oder gasförmiger Form erfolgen. Je nach zugrundeliegendem physikalisches Prinzip können verschiedene Transportphänomene unterschieden werden. In flüssiger Phase erfolgt der Transport kapillar oder gravitativ. In gasförmigen Zustand erfolgt der Feuchtetransport durch Diffusion. Die jeweiligen Eigenschaften des Feuchtetransports innerhalb eines Gesteins sind durch die Eigenschaften seines Porenraums bestimmt.⁸

Charakteristisches Merkmal des Porenraumes eines Gesteins ist die Porosität. Sie ist definiert als das Volumenverhältnis der Summe der Hohlräume eines Gesteins bezogen auf dessen äußeres Gesamtvolumen (vgl. Abb. 1, rechts).⁹ Die Gesamtporosität setzt sich zusammen aus der offenen bzw. effektiven Porosität und der geschlossenen Porosität. Die offene Porosität steht untereinander und mit der Umgebung in Verbindung. Die geschlossene Porosität ist nach außen hin abgeschlossenen und nicht miteinander verbundenen. Des Weiteren werden primäre und sekundäre Porosität unterschieden. Bei Sandsteinen wird die primäre Porosität, die sich durch den Sedimentationsprozess ergibt, bestimmt durch Korngröße, Kornform, Korngrößenverteilung und der Kornpackung bzw. Sortierung (vgl. Abb. 1, links).¹⁰ Die sekundäre Porosität ergibt sich aus der Verwitterung der Gesteine und nimmt mit der Zeit zu. Die Porosität bruchfrischer

8 Klopfer, 1994, S. 296ff.

9 Ehling, 2009, S. 32.

10 Schön, 2004, S. 19.

Gesteine kann daher erheblich von der verwitterter Gesteine abweichen.^{11, 12} Je nach Varietät und in Abhängigkeit von Zusammensetzung und Genese kann sich die Porosität stark unterscheiden. Bei Sandsteinen kann sie einen Bereich zwischen 10 % und 50 % abdecken.¹³

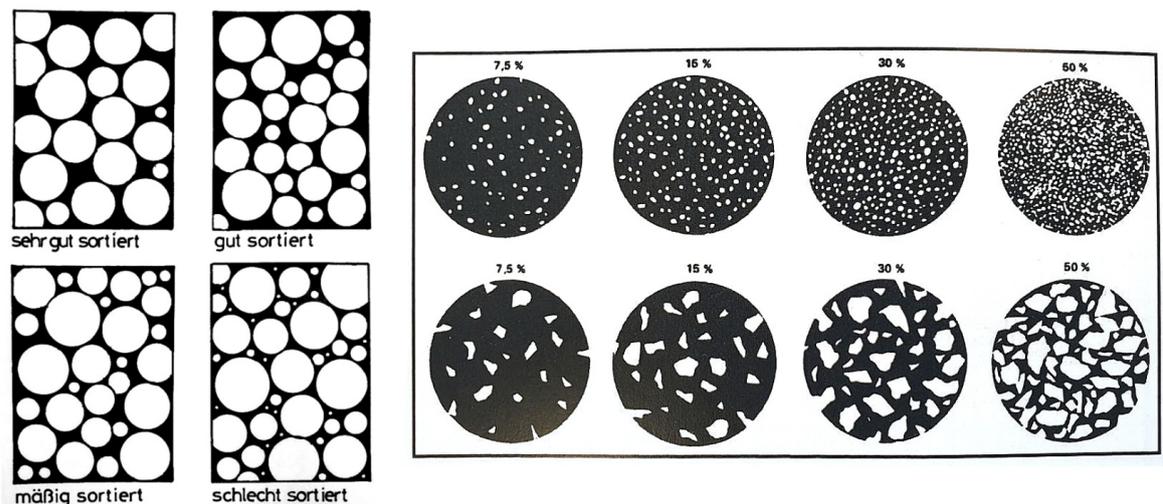


Abb. 1: Links: Porosität in Abhängigkeit von der Kornsortierung. Schlechter sortierte Kornaggregate weisen in der Regel geringere Porositäten auf als besser sortierte. Rechts: Vergleichsbilder unterschiedlicher Porositäten. (Grimm, 2018, S. 28 & S. 36 nach Flügel, 1978, Abb. 34 & Abb. 26).

Der Austausch von Flüssigkeiten und Gasen kann nur im offenen Porenraum erfolgen. Das potenzielle Volumen, in dem Wasser aufgenommen werden kann, ist neben dem Anteil der offenen Porosität auch von der Geometrie der Poren vorgegeben. Sackporen beispielsweise verhindern das Entweichen von Luft und können aufgrund eines sich bildenden Gegendrucks nur bedingt mit Wasser gefüllt werden. Der Porenraum eines Gesteins wird neben dem Anteil an Poren charakterisiert durch deren durchschnittliche Größe und die durchschnittliche Porenöffnung. Detaillierteren Aufschluss über die Eigenschaften des Porenraums und dessen Feuchttransportverhaltens gibt die Porenradienverteilung eines Gesteins. Hierzu wird der Anteil der offenen Poren nach ihrer jeweiligen Größe aufgetragen.^{14, 15}

11 Ehling, 2009, S. 32.

12 Schön, 2004, S. 19.

13 Grimm, 2018, S. 36.

14 Ehling, 2009, S. 33.

15 Schön, 2004, S 17f.

Für die Bezeichnung unterschiedlicher Porengrößen existiert keine einheitliche Nomenklatur.¹⁶ Die vorliegende Arbeit orientiert sich an der Definition von Klopfer (1994). Die Kategorien werden hier entsprechend der beobachtbaren Feuchte-transportvorgänge gebildet.¹⁷ Kapillar leitfähig sind Kapillarporen mit einer Größe von 0,1 μm bis 1 mm. In den Makroporen, oberhalb einer Größe von 1 mm, kann Wasser in flüssiger Phase nur der Gravitation folgend in sogenannten Sickerströmungen transportiert werden. Unterhalb der kapillar leitfähigen Porengrößen $< 0,1 \mu\text{m}$ spricht man von Mikroporen (vgl. Abb. 2).



Abb. 2: Feuchte-transportmechanismen in Abhängigkeit der Porenradien. (Grimm, 2018, S.35; in Anlehnung an Klopfer, 1986, Abb. 3.24).

Der Kapillartransport wird durch den Kapillardruck vorangetrieben, der vom Porenradius, sowie vom Benetzungswinkel und der Oberflächenspannung der eindringenden Flüssigkeit abhängt. Je kleiner der Radius, desto größer ist der Kapillardruck. Der Kapillardruck wirkt der Schwerkraft entgegen, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat und die maximale Steighöhe in der Kapillare erreicht ist.¹⁸ Die kapillar aufgenommene Wassermenge pro Fläche ist direkt proportional zur Wurzel aus der Zeit, die das Gestein zum kapillaren Saugen zur Verfügung

¹⁶ Grimm, 2018, S. 37.

¹⁷ Klopfer, 1994, S. 326.

¹⁸ Willems, 2017, S. 204.

hatte. Der Proportionalitätsfaktor wird als w -Wert bezeichnet und ist ein charakteristischer Kennwert eines Gesteins.¹⁹

Ist ein Gestein einige Zeit der Einwirkung drucklosen Wassers ausgesetzt, stellt sich die sogenannte freie Wassersättigung ein. Sie ist etwas niedriger als die maximale Wassersättigung, die erst nach mehreren Jahren erreicht wird, da in Sackporen eingeschlossene Luft nur langsam als Lösung dem Porenraum entweichen kann.²⁰ Wird im Folgenden über Wassersättigung gesprochen, ist immer der Gehalt der freien Wassersättigung gemeint.

Gasförmiges Wasser wird durch Diffusion transportiert. Diese bestimmt den Feuchtigkeitsaustausch zwischen Gesteinsporenraum und umgebendem Klima. Der Transport folgt entsprechend dem Wasserdampfpartialdruck²¹. Wenn sich bei gleicher Temperatur und gleichem Luftdruck die in der Luft vorhandene Feuchtigkeitsmenge unterscheidet, besteht ein Ungleichgewicht zwischen den Partialdrücken im Gestein und der Umgebung. Die Wasserdampfdiffusion führt zum Ausgleich dieses Konzentrationsgefälles. Es wird ein Gleichgewichtszustand zwischen Materialfeuchte und relativer Umgebungsfeuchte angestrebt. Die Geschwindigkeit der Diffusion ist von der Größe des Konzentrationsgefälles abhängig und wird mit zunehmender Annäherung an den Gleichgewichtszustand zwischen beiden Systemen kleiner.²²

Durch die Adhäsionskraft der Porenoberfläche wird gasförmiges, durch Diffusion aufgenommenes Wasser, flüssig an den Porenwänden angelagert. In Poren kleiner als 1 μm kommt es zu Kapillarkondensation. Die Absorptionskräfte der Kapillaren führen zu Anlagerung von flüssigem Wasser aus der Gasphase oberhalb des Taupunktes. Die Fähigkeit zur Kapillarkondensation bei abnehmender Luftfeuchte steigt mit kleiner werdendem Porenradius.²³

19 Ebd., S. 212f.

20 Willems, 2017, S. 172.

21 Teildruck des Wasserdampfs in der Luft.

22 Willems, 2017, S. 196 ff.

23 Klopfer, 1994, S. 294f.

Den Vorgang der Aufnahme von Wasser bei porösen Materialien und steigender relativer Feuchte bezeichnet man als Adsorption²⁴. Sinkt die relative Feuchte, gibt das Gestein gasförmiges Wasser durch Desorption ab. Nach längerer Lagerung in Luft mit konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit stellt sich in einem porösen Medium ein bestimmter Wassergehalt, die Gleichgewichtsfeuchte, ein. Der Zusammenhang von Gleichgewichtsfeuchte und der relativen Luftfeuchte des Umgebungsklimas kann durch Sorptionsisotherme beschrieben werden. Die Temperaturabhängigkeit der Sorption bei mineralischen Baustoffen ist so gering, dass sie vernachlässigt werden kann.²⁵ Die Sorptionsisotherme von Gestein zeichnen einen leicht s-förmigen Verlauf, da es bei hohen Luftfeuchten zu einem stärkeren Anstieg des Wassergehalts kommt (vgl. Abb. 3). Adsorption und Desorption folgen einem unterschiedlichen Kurvenverlauf, der auch als Hysterese bezeichnet wird. Die Desorption erfordert einen größeren Druckgradienten als die Adsorption, weshalb die Abgabe gegenüber der Aufnahme von Feuchtigkeit verzögert reagiert.²⁶ Die Adsorptions- und Desorptionsfähigkeit eines Gesteins wird bestimmt durch den Widerstand, den die Wasserdampfdiffusion im Gestein überwinden muss. Er ist abhängig vom Aufbau der Porenstruktur und wird durch den Wasserdampfdiffusionswiderstand μ angegeben, der ebenfalls ein charakteristischer Kennwert eines Gesteins ist.²⁷

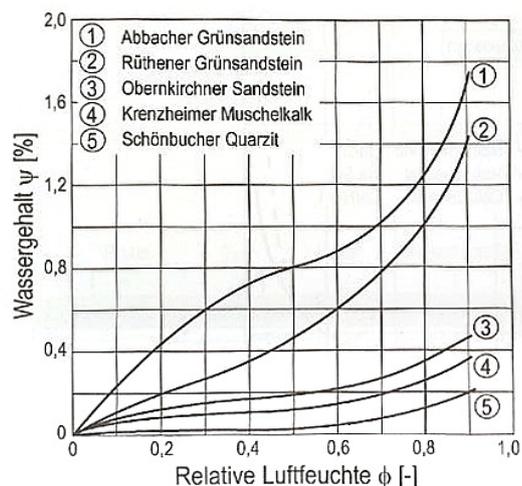


Abb. 3: Adsorptionsisotherme verschiedener Natursteine. Bei hohen Luftfeuchten kommt es zu stärkeren Anstiegen der aufgenommenen Wassermenge. (Willems, 2017, S. 181).

24 Nicht zu verwechseln mit der Absorption.

25 Willems, 2017, S. 176.

26 Ebd., S. 179f.

27 Ebd. S. 200f.

Ein weiteres Phänomen bei dem Wasser in flüssiger Phase unterhalb der Porenradien, in denen Kapillartransport stattfindet, transportiert wird, ist die Oberflächen- oder Lösungsdiffusion. In beiden Fällen erfolgt eine Bewegung von Wassermolekülen durch Diffusion in flüssiger Phase. Die so transportierte Wassermenge im Vergleich zu den anderen Phänomenen gering und kann an dieser Stelle vernachlässigt werden.²⁸

2.2 Ultraschalllaufzeit im Natursteingefüge

Für die Prüfung mit Ultraschall werden durch einen auf der Oberfläche aufgesetzten Sender mechanische Wellen mit einer Frequenz zwischen 20 und mehreren 100 kHz im Gesteinsgefüge angeregt.²⁹ Die Masseteilchen, aus denen dieses Gefüge aufgebaut ist, können vereinfacht nach dem Modell von Krautkrämer (1986) beschrieben werden (siehe Abb. 4, links). Durch elastische Kräfte sind die Teilchen an ihrer Position gebunden und nehmen nach einer Krafteinwirkung unterhalb der Elastizitätsgrenze³⁰ wieder ihre ursprüngliche Position ein. Die Teilchen können so elastisch schwingen. Da alle Teilchen dreidimensional miteinander verbunden sind, erzeugt eine, am Rand des Gefüges ausgelöste Schwingung eine das Gefügevolumen durchlaufende Welle.³¹

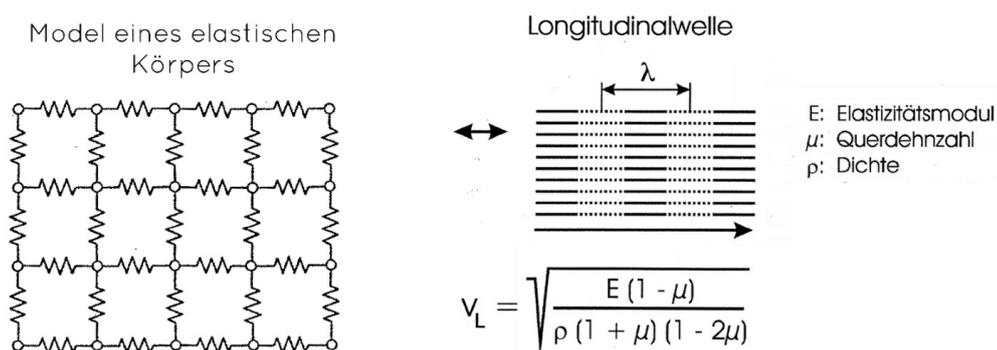


Abb. 4, links: Modell eines elastischen Festkörpers (Krautkrämer, 1986, S. 4). Rechts: Skizze der Wellenausbreitung der Longitudinalwelle und zugehörige Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit v_L (DGZfP, 1999, Bildanhang S. 1).

28 Willems, S. 196.

29 DIN EN 14579, 2004, S. 5f.

30 Die Elastizitätsgrenze bezeichnet den Wert der maximalen Krafteinwirkung, oberhalb derer es zu plastischer Deformation kommt.

31 Krautkrämer, 1986. S. 14.

Ein so angeregtes Ultraschallsignal setzt sich aus verschiedenen Wellenarten zusammen, die je nach Richtung der Schwingung unterschieden werden können. Die Longitudinalwelle, auch als p- oder Primärwelle bezeichnet, breitet sich parallel zur Richtung der Anregungsschwingung aus. Das Gefüge, das der Wellenimpuls durchläuft, wird dadurch abwechselnd komprimiert und ausgedehnt (siehe Abb. 4, rechts). Unter den verschiedenen Wellenarten hat die Longitudinalwelle die größte Ausbreitungsgeschwindigkeit. Sie erreicht daher den ebenfalls auf der Oberfläche aufliegenden Empfänger als erstes.³² Spricht man von der Ultraschallgeschwindigkeit im Zusammenhang mit dem Ultraschalllaufzeitverfahren, ist stets von der Geschwindigkeit der Longitudinalwelle die Rede. Die Ultraschallgeschwindigkeit wird errechnet aus dem Verhältnis der manuell erfassten Wegstrecke der Messung zur Laufzeit der Longitudinalwelle, die beim Eintreffen des Signals am Empfänger aufgezeichnet wird. Die Ultraschallgeschwindigkeit stellt eine charakteristische Größe eines Materials dar.³³

Die Geschwindigkeit der Longitudinalwelle in einem Medium ist abhängig von dessen Rohdichte, Poissonzahl³⁴ und dynamischem E-Modul³⁵ (siehe Formel in Abb. 4, rechts).³⁶ Die Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb eines Gesteins ergibt sich aus den Ausbreitungsgeschwindigkeiten dieser Einzelkomponenten unter Berücksichtigung der Porosität des Gefüges. An den Grenzflächen zwischen festen Partikeln und Luft wird die Ultraschallwelle nahezu vollständig reflektiert. Kleinste Luft einschlüsse oder Risse im Porenraum können nicht auf direktem Weg überwunden werden. Durch ein größeres Porenvolumen oder kleine Risse

32 Befindet sich der Empfänger bei der Messung auf der gegenüberliegenden Seite vom Sender, wird von einer Messung in Transmission gesprochen. Je nach Fragestellung sind auch andere Messkopfanordnungen möglich. Beispielweise werden für die Detektion von Rissen über die Ultraschallgeschwindigkeit die Messköpfe einseitig aufgesetzt und in ihrem Abstand variiert. Siehe hierzu u.a. DIN EN 14579, 2004, Anhang A & Patitz, 2009, S. 53ff.

33 DGZfP, 1999, S. 4.

34 Die Poissonzahl, auch Querdehnzahl, ist ein Materialkennwert, der das Querkontraktionsverhalten von Stoffen charakterisiert. Bei Kraffteinwirkung auf einen Festkörper beschreibt sie das negative Verhältnis von der relativen Längenänderung orthogonal und der relativen Längenänderung parallel zu deren Richtung.

35 Der E-Modul bildet bei ideal linear-elastischem Verhalten den Proportionalitätsfaktor zwischen angelegter Spannung und der daraus resultierenden Dehnung. Umso größer der E-Modul, desto kleiner ist die Dehnung, die bei angelegter Spannung auftritt und umso steifer verhält sich ein Material.

36 Krautkrämer, 1986. S. 14.

im Gefüge erhöht sich die Laufzeit der Welle, womit sich die daraus resultierende Ultraschallgeschwindigkeit verringert. Kompakteres Gefüge führt im Umkehrschluss zu höheren Ultraschallgeschwindigkeiten. Folglich kann die Ultraschallgeschwindigkeit als Indikator für Gefügestörungen herangezogen werden. Angegeben wird die Ultraschallgeschwindigkeit in m/s oder km/s.^{37,38}

Über die Messung der Laufzeit der Dehnwelle bzw. der daraus ermittelten Geschwindigkeit kann des Weiteren der dynamische E-Modul eines Gesteins bestimmt werden. Die Dehnwellengeschwindigkeit ist nur vom E-Modul, der Dichte und der Geometrie eines Probekörpers abhängig (vgl. Abb. 5). Daher kann durch vorheriges Bestimmen der Dichte über Gewicht und Volumen des Probekörpers der dynamische E-Modul errechnet werden. Voraussetzung, um miteinander vergleichbare Werte zu bekommen, sind definierte Maße und einen zylinderförmige Geometrie, damit sich die Dehnwellen in gleicher Weise ausbreiten können.³⁹

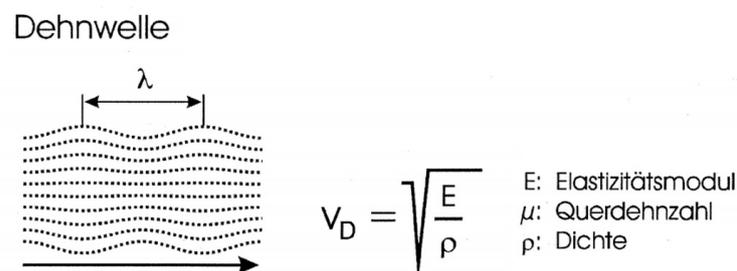


Abb. 5: Skizze der Ausbreitung der Dehnwelle mit mathematischem Zusammenhang zwischen Dehnwellengeschwindigkeit und dynamischem E-Modul (DGZfP, 1999, Bildanhang S. 1).

In der Denkmalpflege wird das Ultraschalllaufzeitverfahren seit Jahrzehnten zur Untersuchung der Verwitterung von Naturstein eingesetzt und ist eine der bedeutendsten Methoden zur zerstörungsfreien Prüfung. Objekte der Anwendung sind in der Regel Baudenkmäler oder Skulpturen. Mürbezonen, Risse und Fehlstellen können durch die Messung der Ultraschalllaufzeit detektiert und analysiert werden. Die Gesteinsfestigkeit kann näherungsweise abgeschätzt und bei bekannter Dichte der dynamische E-Modul ermittelt werden. Auch der Erfolg

37 Auras et al., 2011, S. 47f.

38 Deutsch, 2010, S. 20ff.

39 DGZfP, 1999, S. 8f.

von Festigungsmaßnahmen lässt sich über die Messung der Ultraschalllaufzeit nachweisen. Das Verfahren ist außerdem gut geeignet, um mittels regelmäßigem Monitorings den Zustand von Kunst und Kulturgütern aus Naturstein zu überwachen und rechtzeitig Maßnahmen zu deren Erhaltung ergreifen zu können.^{40, 41, 42}

40 Auras et al., 2011, S. 47ff.

41 Wittmann, 1995, S. 284.

42 DGZfP, 1999, S. 2.

3 Forschungsstand zum Ultraschalllaufzeitverfahren an Denkmalgesteinen

Das Ultraschalllaufzeitverfahren findet eine breite Anwendung in der Geologie, dem Bauingenieurwesen sowie der Denkmalpflege und ist daher Gegenstand jahrzehntelanger Forschung.⁴³ Großer Vorteil des Verfahrens ist, dass Messungen zerstörungsfrei und in situ, direkt am Objekt durchgeführt werden können. Warum sich diese in situ Messungen bzw. deren Messwerte nur schwer untereinander und mit denen unter Laborbedingungen gemessenen Werten vergleichen lassen, ist Thema des folgenden Kapitels.

Da der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf dem Einfluss der Materialfeuchte auf die Ultraschallgeschwindigkeit liegt, wird zunächst ein Überblick über bisher erfolgte Untersuchungen zu diesem Thema gegeben. Zum besseren Verständnis der Ergebnisse der in der Arbeit durchgeführten und ausgewerteten Versuche, werden Studien zu weiteren Faktoren, die ebenfalls Einfluss auf die Messungen haben, kurz zusammengefasst. Daraus wird ein nach dem derzeitigen Stand der Wissenschaft empfohlenes Vorgehen bei Untersuchungen mittels Ultraschalllaufzeitverfahren von frei bewitterten Denkmalobjekten abgeleitet.

3.1 Einfluss der Materialfeuchte auf die Ultraschalllaufzeit

Verschiedene Autor*innen^{44,45,46} weisen darauf hin, dass die Ultraschallgeschwindigkeit stark vom Feuchtigkeitsgehalt des zu untersuchenden Objektes beeinflusst wird. Der Einfluss des Wassergehalts wird mit bis zu 50 % des am trockenen Probekörper bestimmten Wertes angegeben. Voruntersuchungen und Erfahrung seien daher für Messungen und Auswertungen unverzichtbar.

Zum Verständnis der Übertragung von Ultraschallwellen in feuchtem Gestein erweiterte Fleischer in seiner Dissertation zur „Beurteilung von Ultraschall-

43 Um einige zu nennen: Köhler (1988), Underwood (2014) & Hutt (2013).

44 DIN EN 14579, 2004, S. 11.

45 Ehling, 2009, S. 68.

46 Auras et al., 2011, S. 49.

untersuchungen an Natursteinobjekten in der Denkmalpflege⁴⁷ das Modell von Krautkrämer⁴⁸ (siehe Abb. 4, links). Das Ultraschallsignal wird über Federn von Teilchen zu Teilchen weitergegeben (vgl. Abschnitt 2.2). Fleischer unterscheidet dabei den Einfluss der Federkonstante des Porenraums c_P und den Einfluss der Federkonstante der Kontaktstellen zwischen den Körnern c_K auf die Ultraschallübertragung. Die Federkonstante ist materialspezifisch und direkt proportional zum E-Modul, der die elastische Dehnung in Folge einer Krafteinwirkung angibt.

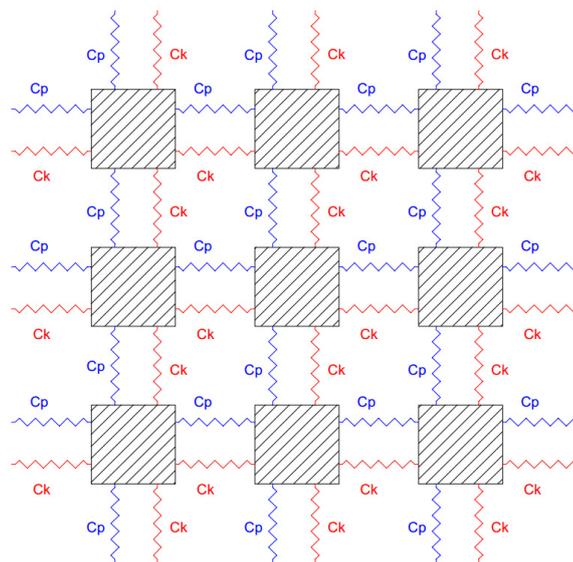


Abb. 6: Modell der Wellenübertragung in Anwesenheit von Wasser im Porenraum. Die Schwingungen werden bestimmt durch die Federkonstante des Porenraumes c_P und die Federkonstante der Kornkontakte c_K . (Fleischer, 2002, S. 89).

Bei trockenem Gestein ist die Federkonstante des Porenraums c_P annähernd null. Es können keine Schwingungen über den Porenraum übertragen werden und die Ultraschallwelle läuft über die Kornkontakte. Bei Feuchtigkeit im Porenraum kann das Signal auch über das im Porenraum vorhandene Wasser übertragen werden ($c_P \neq 0$) und erspart sich damit den Umweg über die Kornkontakte. Bei Wassersättigung wird davon ausgegangen, dass c_P und c_K etwa in gleichem Maße an der Übertragung der Welle beteiligt sind.⁴⁹ Fleischer geht davon aus,

47 Fleischer, 2002, S. 89.

48 Krautkrämer, 1986, S. 4.

49 Fleischer, 2002, S. 89

dass sich die Ultraschalllaufzeit in Abhängigkeit des Verhältnisses von Korngröße und Porengeometrie entweder verlängert oder verkürzt:

„Kostet die Überwindung relativ großer flüssigkeitsgefüllten [sic] Poren mehr Zeit als ein vergleichsweiser [sic] kurzer Umweg über das Festkorn, kann die Ultraschalldurchgangsgeschwindigkeit dieses Materials bei Wassersättigung abnehmen. Geht andererseits die Schallübertragung über die „kleine“ Pore schneller als über den „großen“ Umweg des Kornkontaktes resultiert aus der Wassersättigung ein Anstieg der Ultraschalldurchgangsgeschwindigkeit [sic] dieses Materials.“⁵⁰

In nur teilweise gefüllten Poren vermutet Fleischer keinen erheblichen Anstieg der Federkonstante c_P und damit einen nur geringen Anteil des Wassers an der Wellenübertragung. Je nach Porenstruktur könnte die Ultraschallgeschwindigkeit nicht vom Porenfüllungsgrad, sondern vom Anteil der vollständig gefüllten Poren abhängen.⁵¹

Fleischer führte im Rahmen seiner Arbeit auch Versuche mit Proben verschiedener prominenter Baugesteine Österreichs durch. Diese untersuchte er trocken und nach verschieden langer Wasserlagerung und beobachtete in den meisten Fällen einen Anstieg (bis zu 35 %) der Ultraschallgeschwindigkeit (siehe Tabelle 1). Bei den meisten von ihm untersuchten Gesteine handelt es sich um dichte Gesteine mit geringer Porosität (vgl. Tabelle 1). Lediglich beim verwitterten St. Margarethener Kalksandstein kam es zu einem minimalen Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit (-1,5 %). Hier zeigte Fleischer, dass sich unverwitterte und verwitterte Gesteine unter Feuchteinfluss unterschiedlich verhalten können, da sich in Folge der Verwitterung der Porenraum vergrößert (vgl. Abschnitt 2.1).⁵² Fleischer fasst zusammen, dass die Feuchtigkeit im Porenraum einen entscheidenden Einfluss auf die gemessene Ultraschallgeschwindigkeit hat, der wiederum stark gesteinsabhängig ist.⁵³

50 Fleischer, 2002, S. 89.

51 Ebd., S. 90.

52 Ebd., S 91f.

53 Ebd., S. 97.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchung von Fleischer zur Abhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeit mit steigender Materialfeuchte verschiedener Gesteine. Δv_p : Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit. (Fleischer, 2002, S. 91ff).

Gestein	Δv_p	Wassergehalt
St. Margarethener Kalksandstein, Varietät A	+ 1 %	5,0 M.-%, „mehrtägige Wasserlagerung“
St. Margaretener Kalksandstein, Varietät B	+ 3 %	2,5 M.-%, „mehrtägige Wasserlagerung“
St. Margaretener Kalksandstein, Varietät B	+ 5 %	5,5 M.-%, „mehrtägige Wasserlagerung“
St. Margaretener Kalksandstein, Varietät B, stark verwittert	- 1,5 %	10,0 M.-%
Carrara Marmor	+ 5 %	0,2 M.-%, „kurze Wasserlagerung“
Carrara Marmor	+ 25 %	0,4 M.-%, „längere Wasserlagerung“
Sterzinger Marmor	+ 35 %	0,3 M.-%
Schremser Granit	+ 10 %	0,2 M.-%
Lindabrunner Konglomerat	+25 %	2 M.-%
Untersberger Kalkstein	+ 3 %	0,3 M.-%
Zentralgneis	+ 35 %	0,4 M.-%, „mehrtägige Wasserlagerung“

Im Rahmen des DBU-Projektes „Erarbeitung eines Bewertungs-Leitfadens für Ultraschallmessungen an umweltgeschädigten Marmorskulpturen am Beispiel u. a. des Parks Potsdam Sanssouci“⁵⁴ führte Köhler in den Jahren 2011 bis 2014 wiederholt Messungen an Marmorskulpturen durch, welche einem streng geregeltem Messschema folgten. Ziel war die Quantifizierung von jahreszeitlich bedingten Schwankungen innerhalb der Ultraschallgeschwindigkeit. Er beobachtete, dass bei den von ihm untersuchten Marmorstelen die Ultraschallgeschwindigkeiten im Sommer 20 % über den Werten der Wintermessungen lag. Er vermutete, dass der Marmor im Winter aufgrund der niedrigen absoluten Feuchten der Umgebungsluft austrocknet, was mit sinkenden Ultraschallgeschwindigkeiten verbunden ist. Köhler fand eine Korrelation der Ultraschallgeschwindigkeits-Mediane der einzelnen Skulpturen und dem sieben Wochen zurückliegenden gleitenden 15-tägigen Mittelwert der absoluten

⁵⁴ Köhler, 2015.

Luftfeuchtigkeiten (vgl. Abb. 7).⁵⁵ Die daraus gebildeten Regressionsgeraden verlaufen für alle Skulpturen parallel (vgl. Abb. 8). Das bedeutet, dass alle Skulpturen demselben Einfluss von Luftfeuchte auf die Ultraschallgeschwindigkeiten unterliegen. Hieraus konnte er eine Korrekturformel aufstellen, um Ultraschallwerte, die bei unterschiedlichen Klimabedingungen gemessen wurden, auf ein einheitliches Bezugsniveau zurückzurechnen. Als Bezugsniveau legt er 75 % relative Feuchte fest. Werte verschiedener Messungen können miteinander verglichen werden, wenn der feuchtebedingte Anstieg der Ultraschallgeschwindigkeit, der einflussnehmende Zeitraum und dessen absolute Luftfeuchte bekannt ist.^{56,57}

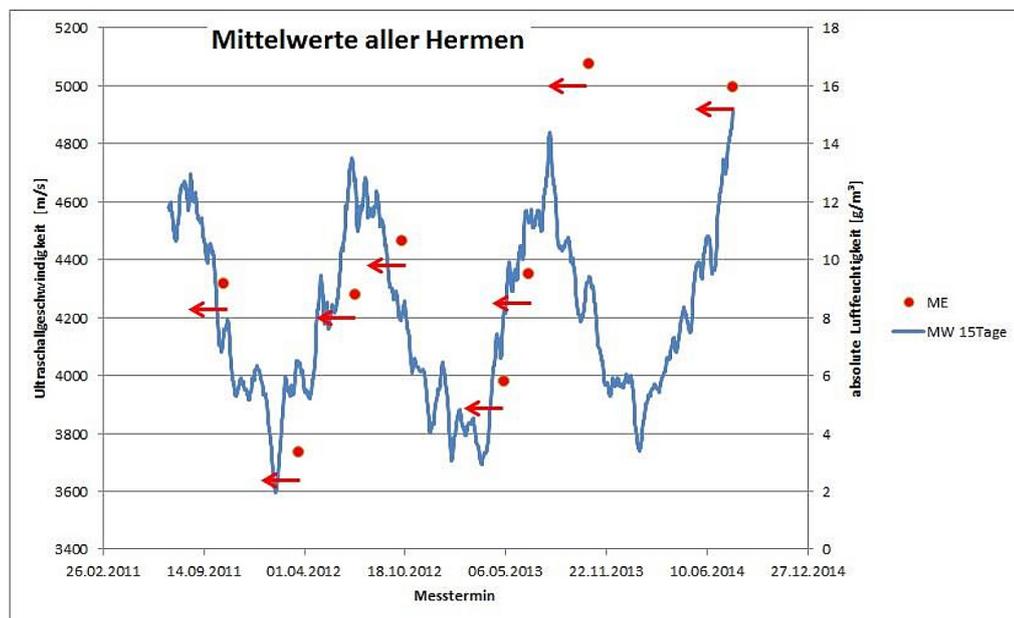


Abb. 7: Verzögerung der Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit gegenüber der absoluten Luftfeuchtigkeit bei der Messung an Skulpturen (Hermen) im Park Sanssouci (Köhler, 2015, S.94).

Bei Sandsteinen ist die Forschungslage weniger umfangreich als bei Marmor. Zudem sind Sandsteine sehr vielfältig hinsichtlich ihrer Komponenten, Bindungen und Porenräume, woraus unterschiedliches Feuchtetransportverhalten resultiert (vgl. Abschnitt 5). Das Sorptionsverhalten und die Gefügezusammensetzung bzw.

55 Köhler benutzte hierzu Klimawerte des Deutschen Wetterdienstes der Station 10379 (Stations ID: 3987) (Köhler, 2014, S. 42).

56 Köhler, 2018, S.69.

57 Köhler, 2014, S. 40ff.

Porengeometrie bedingen den Einfluss der Umgebungsfeuchte auf die Ultraschallgeschwindigkeit. Daher sind hier erhebliche Unterschiede zu erwarten.

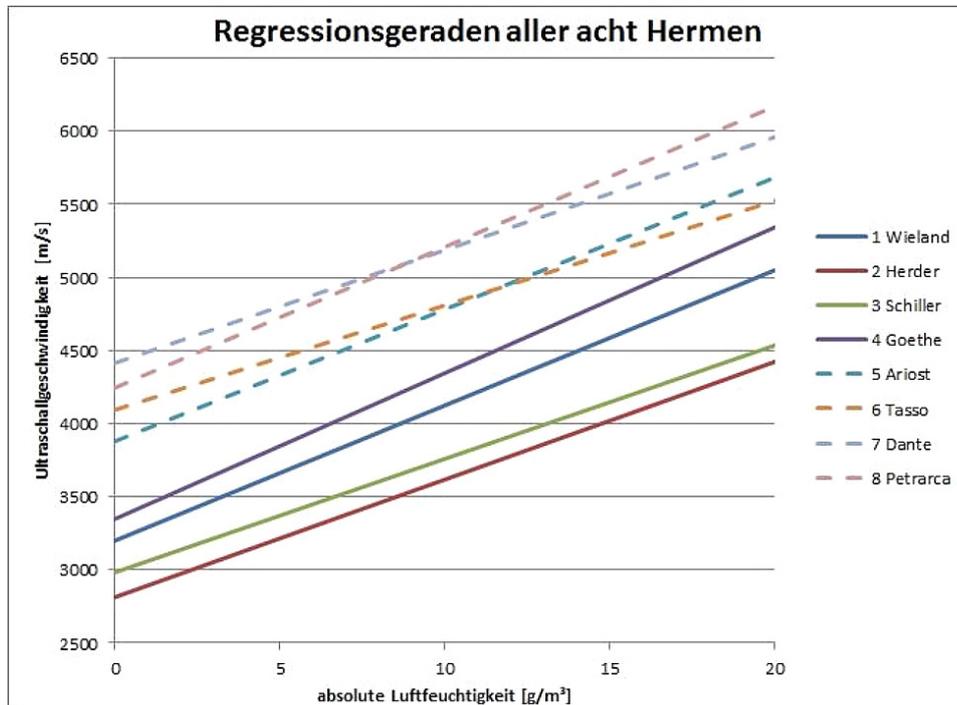


Abb. 8: Messung an Marmorskulpturen (Hermen) im Park Sanssouci. Regressionsgeraden der Mediane mit den 7 Wochen zurückliegenden 15 tägigen Mittelwerten der absoluten Luftfeuchten (Köhler, 2015, S. 95).

Weiss (1994) führte im Rahmen eines Projektes Laufzeitmessungen an Probekörpern aus Dogger- β -Sandstein⁵⁸ durch, die mit definierten Wassergehalten versetzt wurden. Er wollte hierbei untersuchen, ob sich anhand der Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit die im Gestein vorhandene Feuchtigkeit bestimmen lässt. Seine Ergebnisse (siehe Abb. 9) zeigen, dass eine Materialfeuchte von 10 M.-% zu einem Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit von durchschnittlich ca. 10 % im Vergleich zum trockenen Zustand führt. Der Abfall folgt einer Exponentialfunktion. Bei steigender Feuchte nimmt die Ultraschallgeschwindigkeit zunächst schnell und dann immer langsamer ab.⁵⁹ Gleichzeitig beobachtete Weiss, dass der Einfluss von Inhomogenitäten im Material sehr groß ist. In trockenem Zustand variiert die Ultraschall-

⁵⁸ Feinkörniger Sandstein mit großem Porenvolumen und großem w-Wert. Enthält kaum Tonminerale. E-Modul liegt mit ca 11 kN/mm² im unteren Bereich für einen Sandstein. (Weiss, 1994, S. 279f).

⁵⁹ Weiss, 1994, S. 296f.

geschwindigkeit zwischen ca. 2,2 und 2,5 km/s, obwohl die Proben makroskopisch keine oder nur minimale Unterschiede zeigten.⁶⁰

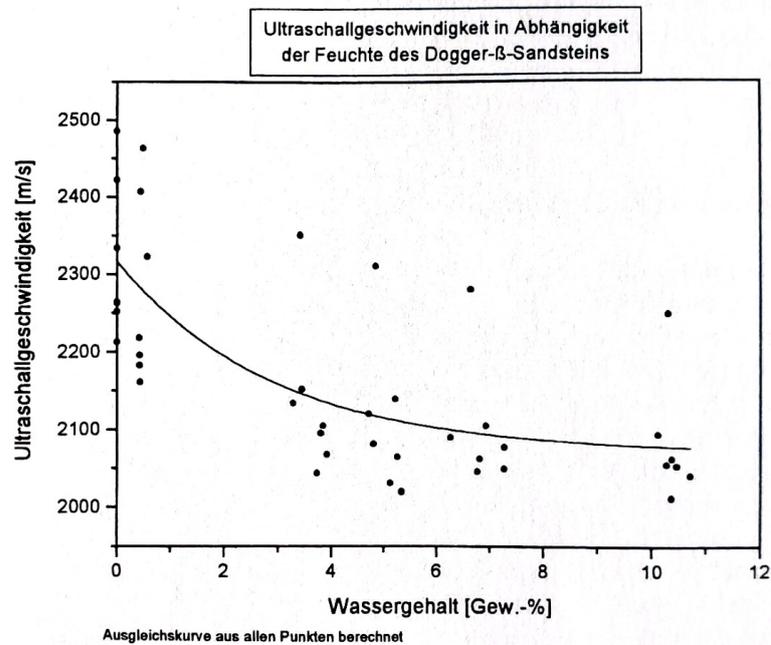


Abb. 9: Verlauf der Ultraschallgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes des Dogger-β-Sandsteins (Weiss, 1994, S. 298).

Auch bzgl. des Wasseraufnahmeverhaltens waren keine wesentlichen Unterschiede festzustellen, was auf eine ähnliche Porosität und Porenradienverteilung schließen lässt. Aufgrund der großen Streuung der Werte und der exponentiellen Abnahme schlussfolgerte er, dass eine Differenzierung von Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeit oberhalb von 3 M.-% Materialfeuchte nicht möglich ist. Die Verwendbarkeit von Ultraschall zur Feuchtemessung an Dogger-β-Sandstein schließt er damit aus.⁶¹

Esbert et al. (1991) untersuchten den Einfluss der Aufnahme bzw. Abgabe von Feuchtigkeit durch Desorption und Adsorption an drei populären spanischen Baugesteinen. Der untersuchte Villamayor Sandstein hat einen hohen Feldspat- und Tongehalt⁶². In Abbildung 10 wurden die prozentuale Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit bezogen auf den trockenen Zustand in Abhängigkeit

⁶⁰ Weiss, 1994, S. 298.

⁶¹ Ebd.

⁶² Zusammensetzung: 62 % Quartz, 13 % Feldspat, 25 % Tone (Illit, Smectit, Palygorskit). Eigenschaften: Offene Porosität 33 %, Sättigungskoeffizient 82 % (Esbert et al., 1991, S. 597).

vom Sättigungskoeffizienten⁶³ aufgetragen. Die Ultraschallgeschwindigkeit im trockenen Zustand ist mit 1,7 km/s für einen Sandstein sehr niedrig. Bei Feuchtezunahme sinkt sie zunächst um bis zu 40 %, bis zu einem Sättigungskoeffizienten von 80 %. Bei voller Sättigung steigt sie dann um 11 % an. Die Forschenden vermuteten, dass aufgrund eines relativ hohen Tonmineralanteils ein Zusammenhang zwischen Ultraschallgeschwindigkeit und der Quellfähigkeit des Gesteins besteht. Bei den beiden anderen untersuchten Gesteinen, Kalkstein und Dolomit, kommt es jeweils zu einem Anstieg der Ultraschallgeschwindigkeit. Bei dem untersuchten Kalkstein⁶⁴ steigt die Ultraschallgeschwindigkeit um 35 %, bei dem Dolomit⁶⁵ um 19 %.⁶⁶

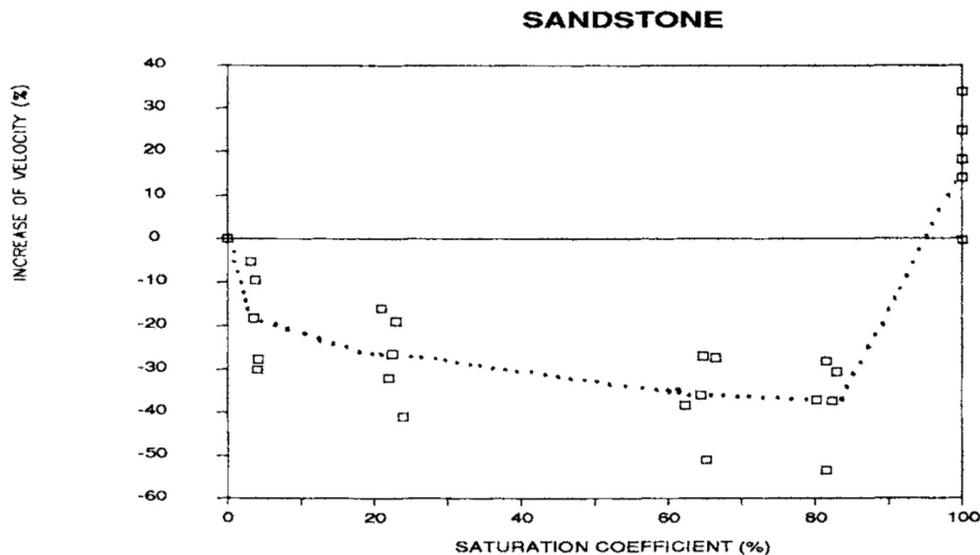


Abb. 10: Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeit von spanischem Villamayor Sandstein in Abhängigkeit des Sättigungskoeffizienten (Esbert et al., 1991, S. 600).

Fasst man die verschiedenen Forschungen zusammen, lässt sich sagen, dass es bei steigender Materialfeuchte in Naturstein sowohl zu Abnahmen als auch Zunahmen der Ultraschallgeschwindigkeit bei steigender Materialfeuchte kommen kann. Bei den Sandsteinen der herangezogenen Studien waren Abnahmen der Ultraschallgeschwindigkeiten zwischen 10 und 40 % zu beobachten. Bei

63 Der Sättigungskoeffizient ist hier angegeben mit: $S_i = (M_i - M_{\text{trocken}}) / (M_{\text{gesättigt}} - M_{\text{trocken}}) \cdot 100$, wobei M_i die Masse der Probe mit dem Wassergehalt i ist (Esbert et al., 1991, S. 598).

64 „Sevilla stone“ (Esbert et al., 1991, S. 597).

65 "Bonar stone" (Esbert et al., 1991, S. 597).

66 Esbert et al., 1991, S. 598ff.

Wassersättigung kam es auch zu Anstiegen. In Anbetracht des großen Spektrums der Beschaffenheit verschiedener Sandsteine ist die Datenlage hier mäßig. Bei Marmor und anderen ebenfalls eher dichten Gesteinen kam es vermehrt zu Zunahmen der Ultraschallgeschwindigkeiten bei steigender Materialfeuchte. Dieser Sachverhalt ließe sich nach dem Modell von Fleischer (2002) durch die kleineren Poren im Verhältnis zu denen der meisten Sandsteine erklären.⁶⁷

3.2 Messgenauigkeit und weitere beeinflussende Faktoren in der Praxis

Wie schon im vorherigen Abschnitt beschrieben, beeinflussen die in der Praxis außerhalb von Laborbedingungen auftretenden Faktoren die Messungen an Denkmalobjekten erheblich. Damit ist auch deren Aussagekraft und Vergleichbarkeit beeinträchtigt. Köhler beschreibt in seinem 2014 publizierten „*Leitfaden für Ultraschallmessungen an Marmorskulpturen*“ auftretende Ungenauigkeiten von nicht selten +/- 10 %.⁶⁸ Er geht auch davon aus, dass viele ältere Messungen mit noch größeren Unsicherheiten behaftet sind.⁶⁹ In Publikationen der letzten Jahre finden sich immer wieder Beispiele, bei denen Anstiege der Ultraschallgeschwindigkeiten bei Monitoringmessungen nicht erklärbar waren. Auch hier könnten Änderungen in den Messbedingungen oder mangelhafte Dokumentation die Gründe sein.⁷⁰ In weiteren Studien konnte gezeigt werden, dass Messungen durch unterschiedliche Personen zu Abweichungen von über 10 % führen können.⁷¹ Fleischer (2002) schreibt hierzu:

„Aus dieser Nichtbeachtung wichtiger Rahmenbedingungen wird gern gefolgert, die Methode der Messung der Ultraschalldurchgangsgeschwindigkeit sei sehr ungenau und dadurch nur für qualitative Aussagen zu gebrauchen. Leider wird aufgrund der Orientierung an ungenauen Richtwerten ohne dem ganzheitlichen Verständnis für Gesteinseigenschaften und Meßmethode dieses Verfahren zu einem ungeeigneten, aussagelosen Ratespiel degradiert.“⁷²

67 Fleischer, 2002, S. 91ff.

68 Köhler, 2014, S. 37.

69 Köhler, 2015, S. 133.

70 Auras et al., 2011, S. 52.

71 Fleischer, 2002 S. 55.

72 Ebd.

Zum Einsatz für Monitoringmessungen werden Genauigkeiten von +/- 2 bis 5 % benötigt.⁷³ Köhler (2014 & 2015) konnte zeigen, dass die angestrebte Genauigkeit mit der vorhandenen Messtechnik erreicht werden kann.^{74, 75} Ziel muss also sein, die Beeinflussung durch äußere Rahmenbedingungen möglichst gering zu halten und von den messenden Personen verursachte, systematische Fehler zu vermeiden.

Die Messung an Sandsteinobjekten stellt eine besondere Herausforderung dar. Der Wertebereich zwischen bruchfrischem und stark geschädigtem Gestein ist kleiner als bei Marmor oder anderen dichteren Gesteinen. Dadurch fallen durch Messunsicherheiten und systematische Fehler verursachte Abweichungen mehr ins Gewicht. Diese überlagern sich zusätzlich mit Schwankungen durch Gesteinsinhomogenitäten, wie u. a. bei Weiss (1994) beobachtet (siehe Abb. 9). Auch ohne optische Unterscheidbarkeit kann es zu großen Streuungen der physikalischen Eigenschaften und der Ultraschallgeschwindigkeit innerhalb eines Probegesteins kommen.⁷⁶ Die Diskrepanz der Ultraschallgeschwindigkeiten verschiedener bruchfrischer Sandsteine ist mit Werten zwischen 2,0 und 4,3 km/s sehr groß.⁷⁷ Allgemeingültige Aussagen für Sandstein zu treffen, ist alleine aus diesem Grund nicht möglich.

3.2.1 Wahl der Messfrequenz

Je höher die Frequenz, desto höher ist die Auflösung, aber auch die Dämpfung des Signals. Bei grobem Gefüge kommt es an den Korngrenzen und den Grenzflächen zwischen Pore und Korn vermehrt zu Absorption sowie Streuung und damit zu einer Abnahme des Ultraschallsignals über die Messstrecke. Größere Frequenzen sind hierbei größeren Streuungen unterworfen. Auf Grund des groben Gefüges und der vergleichsweise hohen Porosität ist die Messung an Sandsteinobjekten besonders von starken Signaldämpfungen betroffen.

73 Köhler, 2014, S.37.

74 Ebd.

75 Köhler, 2015, S. 131ff.

76 Auras et al., 2011, S. 51.

77 Köhler, 2018, S.68ff.

Fehlerquellen entstehen vor allem, wenn bei zu starker Dämpfung die Ultraschalllaufzeit nicht mehr exakt bestimmt werden kann.^{78, 79}

3.2.2 Länge der Messstrecke

Die üblichen Messdistanzen in der Denkmalpflege liegen zwischen wenigen Zentimetern bis zu einem halben Meter. In der Vergangenheit zeigten kurze Messdistanzen an ein und demselben Objekt oft kleinere Ultraschallgeschwindigkeiten als große Distanzen. Dieser Umstand wurde so interpretiert, dass feingliedrige Teile wie z. B. die Finger einer Skulptur verwitterungsanfälliger sind, als beispielsweise der Sockel. Bei verschiedenen Laborversuchen stellte sich jedoch heraus, dass auch bei unverwitterten Proben die Ultraschallgeschwindigkeit mit der Messdistanz abnahm.⁸⁰ Fleischer (2002) stellte fest, dass es bei Messungen unabhängig von der Messstrecke zu einer konstanten Verzögerung der Laufzeit kommt. Dieser Zeitverlust ist zurückzuführen auf die Kopplung zwischen Messkopf und Probe und hat vor allem messtechnische Ursachen⁸¹. Verzögerungen größer Null fallen umso stärker ins Gewicht, je kürzer die Messstrecke ist (vgl. Abb. 11). Bei den Messungen Fleischers traten über eine Distanz von 2 cm eine Abweichung von 31 % auf, während die Abweichung bei 17 cm nur 4 % betragen. Kopplungsverzögerungen von wenigen Mikrosekunden verursachen bei geringen Messdistanzen unabhängig von der Frequenz erheblichen Abweichungen.^{82,83}

Daneben gibt es die Beobachtung, dass die gemessene Ultraschallgeschwindigkeit bei großen Messdistanzen leicht abnimmt. Grund hierfür ist, dass die hochfrequenten Anteile des Ultraschallsignals stärker gedämpft werden als niederfrequente Anteile. Damit wird das Einsetzen des Signals am Empfänger mit zunehmender Wegstrecke runder und ist weniger scharf ablesbar. Üblicherweise

⁷⁸ Auras et al., 2011, S. 48.

⁷⁹ Fleischer, 2002, S. 18.

⁸⁰ Ebd., S. 57.

⁸¹ Abhängig ist die Kopplungsverzögerung vom Messgerät, dem Kopplungsmedium, der Oberflächenbeschaffenheit des Prüfkörpers, dem Anpressdruck und Kopplungsfehlern, die eine Interaktion zwischen Kopplungsmedium, Anpressdruck und Oberfläche darstellen (Fleischer, 2002, S. 71).

⁸² Fleischer, 2002, S. 57ff.

⁸³ Ebd., S. 84f.

sind die sich daraus ergebenden Unsicherheiten aber gering und im Bereich der vorgegebenen Genauigkeit des Zeitgebers ($\pm 0,1 \mu\text{s}$). Sorgfalt ist trotzdem bei der Messung über große Distanzen geboten.⁸⁴

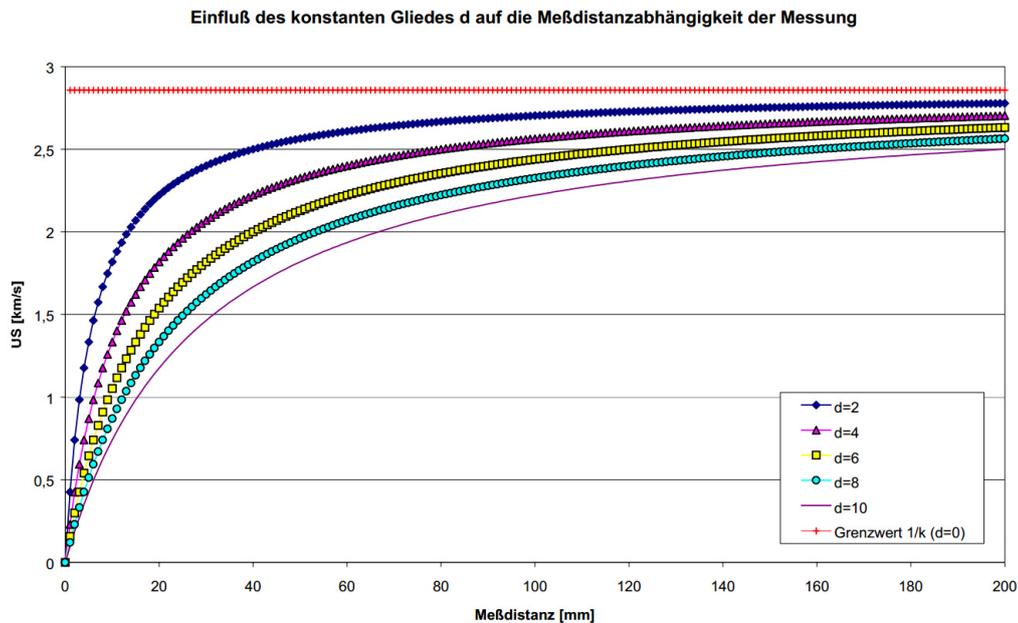


Abb. 11: Einfluss verschieden großer Kopplungsverzögerungen d [μs] auf die Ultraschallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Länge der Messstrecke (Fleischer, 2002, S. 67).

3.2.3 Ankopplung an die Oberfläche

Die Verwendung eines Kopplungsmittels⁸⁵ dient dem Ausgleich zwischen rauen und gekrümmten Oberflächen und dem Geber bzw. Empfänger. Eine gute Ankopplung ist relevant für die Güte des Messsignals. Kommt es während der Messung zu Variationen in der Dicke oder dem Feuchtegehalt des Kopplungsmittels können Schwankungen der Ultraschallgeschwindigkeiten auftreten. Die daraus entstehenden Messungenauigkeiten können im Bereich von 5 bis 10 % liegen und fallen ebenfalls umso stärker ins Gewicht, je kürzer die Messdistanz ist.⁸⁶

Auch die Variation des Anpressdrucks kann eine Fehlerquelle sein. Durch zunehmenden Anpressdruck steigt die Qualität der Kopplung und durch geringere

⁸⁴ DIN EN 14579, 2004, S. 11.

⁸⁵ Üblicherweise Ton oder Plastilin.

⁸⁶ Fleischer, 2002, S. 83.

Kopplungsverluste auch die Ultraschallgeschwindigkeit. Untersuchungen an Carrara Marmor zeigten bei Variation des Anpressdrucks zwischen 0,15 und 0,8 MPa ohne die Verwendung eines Kopplungsmittels und sonst unveränderten Rahmenbedingungen eine Schwankung von bis zu 13 %.⁸⁷ Bei St. Margarethener Kalksandstein wurde ein minimaler Anpressdruck im Bereich von 0,3 MPa⁸⁸ beobachtet, unter dem es zu erheblichen Fehlern kam. Dadurch resultierende Abweichungen reichen bis zu 164 % (vgl. Abb. 12).⁸⁹

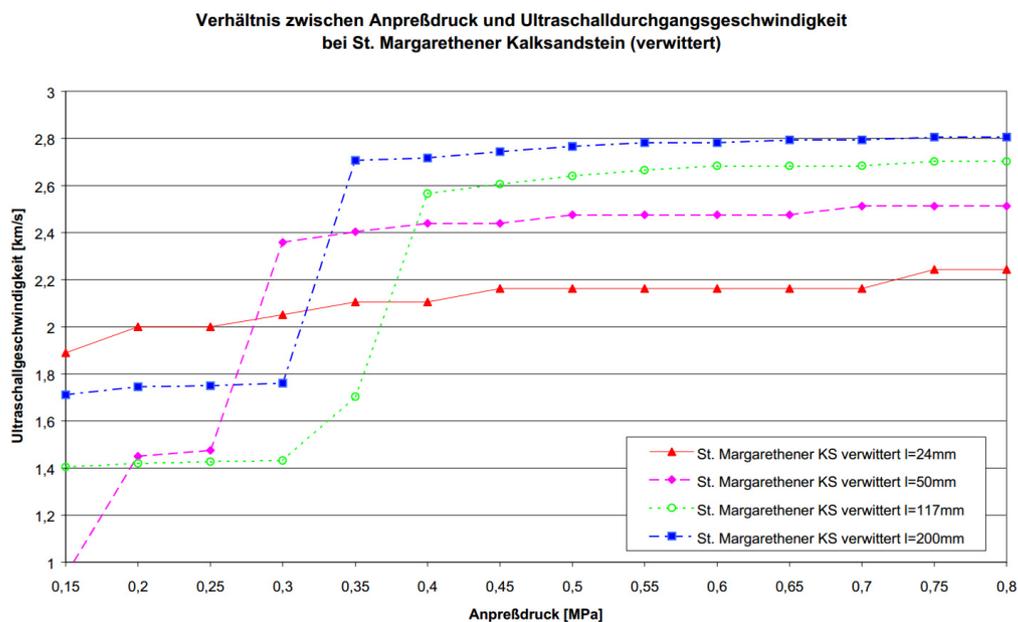


Abb. 12: Ultraschallgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Anpressdrucks von Sender und Empfänger bei Proben aus St. Margarethener Kalksandstein. (Fleischer, 2002, S. 88)

3.2.4 Einfluss der Temperatur

Der Einfluss unterschiedlicher Temperaturen auf die Ultraschallgeschwindigkeit ist gering. Bei Temperaturen um und unter dem Gefrierpunkt wurden Erhöhungen der Ultraschallgeschwindigkeiten beobachtet. Signifikante Änderungen traten sonst nur oberhalb von 60 °C auf.⁹⁰

⁸⁷ Fleischer, 2002, S. 86f.

⁸⁸ Geht man bei einem spitzen Sender bzw. Empfänger von einer Kontaktfläche von 0,5 cm² aus, entsprechen 0,3 MPa einem Druck mit einer Gewichtskraft von 1,5 kg.

⁸⁹ Fleischer, 2002, S. 86f.

⁹⁰ Fleischer, 2002, S. 109.

3.3 Empfehlungen für die Messung und Auswertung bewitterter Objekte

Die Ultraschalllaufzeitmessung und deren Auswertung in situ wird von Auras et al. (2011) in „*Leitfaden Natursteinmonitoring*“ beschrieben. Auf ebendiese bezieht sich auch Köhler in seinem 2014 entwickelten „*Leitfaden für Ultraschallmessungen an Marmorskulpturen*“. Die im Folgenden zusammengefassten Empfehlungen zur Laufzeitmessung stammen außerdem aus der Dissertation von Fleischer (2002). Einige der Vorgaben aus DIN EN 14579 (2004), für die genormte Messung unter Laborbedingungen, sind auch für in situ Messungen zu beachten und werden ebenfalls mit aufgeführt.

Für die Wahl der Messfrequenz gibt Köhler (2014) die Empfehlung, Frequenzen von 40 bis 50 kHz bei Distanzen von über 80 mm zu verwenden. Messstrecken, die unter 50 mm liegen, sollten mit Frequenzen deutlich über 100 kHz gemessen werden.⁹¹ Diese Angaben beziehen sich auf Messungen an Marmorskulpturen. Bei Sandstein ist tendenziell mit größeren Dämpfungen und schlechterer Signalübertragung zu rechnen (vgl. Abschnitt 3.2.1). Die Messfrequenz muss dementsprechend ggf. angepasst und das Signal verstärkt werden.⁹² In jedem Fall ist sicher zu stellen, dass die Messstrecke immer ein Vielfaches der Wellenlänge ist, die sich aus der verwendeten Frequenz ergibt. Die Mindestmessstrecke in Abhängigkeit von Messfrequenz und zu erwartender Ultraschallgeschwindigkeit kann in DIN EN 14579 nachgeschlagen werden.⁹³

Messfehler durch Veränderungen im Kopplungsmittel (vgl. Abschnitt 25) können durch die Verwendung von trocken aufgesetzten Messköpfen mit spitzen Kontaktflächen vermieden werden. Solche haben sich in den letzten Jahrzehnten in der Denkmalpflegepraxis bewährt.^{94,95} Die durch die Kopplung auftretende Verzögerung der Laufzeit (vgl. Abschnitt 24), muss vor der eigentlichen Messung an einem kalibrierten Laufzeitnormal bestimmt werden. Die Korrekturzeit ist

91 Köhler, 2014, S. 38.

92 Auras et al., 2011, S. 48.

93 DIN EN 14579, 2004, S. 12.

94 Auras et al., 2011, S. 49.

95 Köhler, 2014, S. 38.

individuell für jede Kombination von Sender, Empfänger, Kabel, Verstärker, Kopplungsmittel usw. neu zu bestimmen.⁹⁶

Bei manuellem Anhalten der Messköpfe sollte immer der größtmögliche, dem Objekt zumutbare Druck aufgebracht werden, da durch zu geringen oder variierenden Anpressdruck erhebliche Messfehler entstehen können.⁹⁷

Die Anzahl und Wahl der Messpunkte orientiert sich am konkreten Untersuchungsziel und an den Untersuchungsbedingungen. Köhler schreibt hierzu: „[...] Messpunkte sollten repräsentativ sein, unterschiedliche Gefügestände und Risse abbilden, auf Anisotropien hinweisen und gut wiederzufinden sein“⁹⁸. Um durch eine orientierende Messung den allgemeinen Erhaltungszustand einer Skulptur feststellen zu können, sind nach den Erfahrungen von Köhler 20 bis 30 Messpunkte nötig. Details werden nicht mit untersucht und Aussagen über Gesteinsanisotropien sind nicht möglich. Eine allgemeine Zustandsuntersuchung benötigt 50 bis 60 Messpunkte. Hier ist es auch möglich, Aussagen über Gesteinsanisotropien zu treffen. Eine systematische Zustandsuntersuchung für die Vorbereitung und Planung von Restaurierungsmaßnahmen erfordert 80 bis 100 Einzelmessungen. Spezielle Probleme wie zum Beispiel Risse, die im Laufe der Messung entdeckt werden, müssen ergänzend untersucht werden. Durch Gesteinsinhomogenitäten kann es auch bei dicht nebeneinander liegenden Messpunkten zu Abweichungen der Ultraschallgeschwindigkeit kommen. Eine exakte Dokumentation der Messstellen ist daher unerlässlich.⁹⁹ Bei der Interpretation der Daten muss außerdem die Abhängigkeit der Schichtungsrichtung des Gesteins auf die Ultraschallausbreitungsgeschwindigkeit beachtet werden. Interpretationsfehler lassen sich vermeiden, wenn die Messpunkte je nach Messrichtung in Gruppen zusammengefasst werden. Nur die Ultraschallgeschwindigkeiten gleicher Orientierung sind direkt mit einander vergleichbar.¹⁰⁰

96 DIN EN 14579, 2004, S. 5.

97 Fleischer, 2002, S. 127.

98 Köhler, 2014, S. 43.

99 Köhler, 2018, S. 71.

100 Fleischer, 2002, S. 77 & S. 125.

Um verschiedene Messreihen miteinander in Bezug zu setzen, hat sich die Darstellung in Box-Wisker-Diagrammen bewährt. Verglichen werden können die Mediane und die Verteilung der Messwerte. Stark abweichende Messpunkte deuten auf Risse, Gefügestörungen oder Messfehler hin.¹⁰¹

Daten zur Ultraschallgeschwindigkeit von Gesteinen können nur sinnvoll bewertet werden, wenn Referenzwerte für den unverwitterten Zustand vorliegen. Für Marmor wurde von Köhler eine anerkannte Klassifikation zur Beurteilung des Gefügestands anhand der Ultraschallgeschwindigkeit entwickelt.¹⁰² Andere Gesteine müssen jeweils im Einzelfall betrachtet werden. Wie bereits in Abschnitt 2.1 erwähnt, können insbesondere bei Sandsteinen die Eigenschaften stark variieren. Werte von bruchfrischen Gesteinen und die Abnahme mit zunehmender Gefügeentfestigung können sehr unterschiedlich ausfallen. Die Ultraschallgeschwindigkeiten von unverwitterten Sandsteinen decken einen Bereich zwischen 2,0 und 4,3 km/s ab.¹⁰³ Für viele typische Baugesteine sind Referenzwerte vorhanden oder es befinden sich Proben in petrografischen Sammlungen. Auch die Unterschiede innerhalb derselben Varietät können mitunter sehr groß sein und historisch abgebaute Gesteine in ihren Eigenschaften stark von den gegenwärtig abgebauten Gesteinen abweichen. Daher kann es sinnvoll sein, wenn möglich, zur Gewinnung von Referenzmaterial historische Brüche aufzusuchen. Alternativ können auch Messungen an unverwitterten Bereichen desselben Gesteins im Innenraum als Vergleichswerte herangezogen werden.^{104,105,106} Bestehen diese Optionen nicht, ist eine Abschätzung des Referenzwertes über die von Köhler vorgeschlagene 90 %-Regel¹⁰⁷ möglich.

In der Regel sind die Ergebnisse von Ultraschalllaufzeitmessungen nur qualitativ zu beurteilen.¹⁰⁸ Eine quantitative Betrachtung, wie sie zum Beispiel zur Ermittlung

101 Auras et al., 2011, S. 50.ff.

102 Köhler, 2014, S. 38.

103 Köhler, 2018, S.68ff.

104 Auras et al., 2011, S. 50ff.

105 Köhler, 2014, S. 38.

106 Köhler, 2018, S. 68ff.

107Erfahrungen haben gezeigt, dass die höchsten an einem Objekt gemessenen Schallgeschwindigkeiten etwa 90 % des Referenzwertes des unverwitterten Gesteins entsprechen (Köhler, 2018, S. 70f).

108 Fleischer, 2002, S.52.

der Risikoziffer¹⁰⁹ notwendig ist, kann über den Destruktionsfaktor D^{110} erfolgen, der sich aus dem Quotienten von gemessenem Wert und Referenzwert ergibt. Die 90 %-Regel und der Destruktionsfaktor sollen an dieser Stelle nur erwähnt werden. Sie sind für die weiteren Betrachtungen der vorliegenden Arbeit nicht relevant.

Wie in Abschnitt 3.1 gezeigt, sind bei Messungen im Außenbereich das Umgebungsklima und die sich im Zuge dessen einstellende Gleichgewichtsfeuchte im Gestein Ursachen großer Messungenauigkeiten. Die Temperatur von Umgebung und Messobjekt kann hierbei nahezu vernachlässigt werden (vgl. Abschnitt 3.2.4). Nur überdurchschnittlich hohe (Oberflächen-)temperaturen und Temperaturen unterhalb und nahe dem Gefrierpunkt sind zu vermeiden.¹¹¹ Nach Niederschlägen müssen Wartezeiten, die vom Trocknungsverhalten des jeweiligen Gesteines abhängen, beachtet werden. Detailliertere Untersuchungen bzw. Empfehlungen hierzu liegen nicht vor. Um eine Idee von der Feuchtesituation im zu untersuchenden Gestein zu bekommen, muss nicht nur das Klima des Messzeitpunkts betrachtet werden, sondern das Klima einer gewissen Zeitspanne, die der Messung vorausgeht. Köhler empfiehlt bei der Ultraschallprüfung von Marmorskulpturen die tägliche Erfassung von relativer Feuchte und Temperatur¹¹² in einem Zeitraum von drei Monaten vor der geplanten Messung. Alternativ kann auf Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zurückgegriffen werden, wenn sie für den Objektstandort repräsentativ sind.¹¹³ Die geringsten Schwankungen bei Wiederholungsmessungen an Marmorskulpturen beobachtete Köhler in den Monaten Juni bis September und empfiehlt daher Ultraschalllaufzeitmessungen während der Sommermonate durchzuführen.¹¹⁴ Die im Gestein vorhandene Materialfeuchte

109 Die Risikoziffer ist eine ebenfalls im Rahmen eines DBU-Projektes entwickelte Methode zur Erfassung des Erhaltungszustands von Skulpturen über die Messung verschiedener petrophysikalischer Parameter unter Einbezug objektspezifischer Informationen. Siehe hierzu Drewello (2018).

110 Die Anwendung des Destruktionsfaktors wird in Köhler (2018) vorgeschlagen und bezieht sich auf eine Herleitung von Schön (2004).

111 Fleischer, 2002, S. 126.

112 Zur Errechnung der absoluten Feuchte.

113 Köhler, 2014, S. 41f.

114 Köhler, 2018, S.69.

kann zusätzlich durch zerstörungsfreie Feuchtemessung qualitativ abgeschätzt werden. Köhler sammelte hier die Erfahrung, dass bei Messungen mittels Gann-Hydrometer¹¹⁵, die mit Werten von 40 bis 50 auf mittlere Materialfeuchten hindeuteten, günstige Messbedingungen herrschten.¹¹⁶

An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass bei dem Vergleich mit Literaturwerten, die nach DIN EN 14579 bestimmt wurden, beachtet werden muss, dass die Proben vor der Messung bei 70 °C bis zur Massekonstanz getrocknet wurden.¹¹⁷ Ein direkter Vergleich mit auf diese Weise ermittelten Werten ist nicht möglich, da hier eine Feuchtesituation vorliegt, die in der Praxis, außerhalb des Labors praktisch nicht anzutreffen ist.

Trotz der Relevanz des Einflusses der Materialfeuchte auf Ultraschalllaufzeitmessungen in der Praxis finden sich neben den von Köhler durchgeführten Studien an Marmorskulpturen in der Literatur wenig konkrete Empfehlungen zu diesem Thema. Verschiedene Autor*innen weisen lediglich auf das Risiko erheblicher Messunsicherheiten hin (vgl. Abschnitt 3.1).

115 Die Messung des Wassergehalts eines Baustoffs mit einem Gann-Hydrometer erfolgt über den kapazitiven Widerstand, der u. a. vom Wassergehalt abhängt. Die Ergebnisse sind nur qualitativ durch die Anzeige des Wassergehalts auf einer Skala zwischen 1 und 100. (Köhler, 2014, S. 40).

116 Köhler, 2014, S. 42.

117 DIN EN 14579, 2004, S. 6.

4 Probenmaterial Cottaer und Ummendorfer Sandstein

Die beiden ausgewählten Sandsteinvariäteten orientieren sich am Skulpturenbestand des Neuen Palais in Potsdam. Cottaer und Ummendorfer Sandstein sind zwei verbreitete Bildhauergesteine. Cottaer Sandstein ist ein kreidezeitlicher Elbsandstein und findet seit Jahrhunderten in weiten Teilen Nordost-Deutschlands Verwendung. Das Abbauggebiet von Cottaer Sandstein befindet sich südlich von Pirna bei Dresden.¹¹⁸

Ummendorfer Sandstein stammt aus dem Abbauort Ummendorf in der Nähe von Magdeburg. Er wird den Rhätsandsteinen zugeordnet. Auch er ist ein klassisches Bildhauergestein, das vorallem vom 14. bis zum 18. Jahrhundert im Norden Sachsen-Anhalts und in Brandenburg verwendet wurde. Blütezeit hatten die Rhätsandsteine zur Regierungszeit Friedrichs II., da von 1754 bis 1786 die Einfuhr sächsischer Sandsteine verboten war und die Rhätsandsteine das einzige Sandstein-Vorkommen in Preußen darstellten.¹¹⁹

Die Quellenlage zu Cottaer Sandstein ist sehr gut. Da er als einer der beliebtesten Bildhauergesteinen Deutschlands angesehen werden kann, beschäftigten sich zahlreiche Untersuchungen mit seinen Eigenschaften. Ehling und Siedel (2011) fassen in ihrem Buch über Baugesteine in Sachsen-Anhalt, Sachsen und Schlesien verschiedene Untersuchungen u. a. von Hüttel (2002), Grunert (2007a & 2007b) und Grunert & Szilagy (2010) zusammen. Der Gesteinskatalog INSK (1998) führt die petrografischen Werte auf, die von den Sächsischen Sandsteinwerken, die Cottaer Sandstein neben anderen Elbsandsteinen abbauen, auf ihrer Website angeben. In Grimm (2018) sind ebenfalls detaillierte Angaben zu den Eigenschaften von Cottaer Sandstein zu finden.

Ummendorfer Sandstein ist weniger populär als Cottaer Sandstein. In Anbetracht der dennoch breiten Verwendung finden sich in der Literatur vergleichsweise wenige Daten zu gesteintechnischen Kennwerten. Ehling & Siedel (2011) widmen den Rhätsandsteinen in ihrem Buch ein Kapitel. Der Gesteinskatalog

118 Ehling & Siedel, 2011, S. 209ff.

119 Ebd., S. 131ff.

INSK bezieht sich auf Gesteinskennwerte der LGA Würzburg. Im umfangreichen Buch zu Denkmalgesteinen Deutschlands von Grimm (2018) ist Ummendorfer Sandstein nicht aufgeführt.

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die für die vorliegende Arbeit relevanten petrophysikalischen Eigenschaften der beiden Gesteine. Eine Übersicht der relevanten Kennwerte mit entsprechenden Quellenangaben kann außerdem Tabelle 1 in Anhang A.1 entnommen werden.

4.1 Petrografische Eigenschaften

Die Cottaer Varietät ist ein feinkörniger, grau-weiß bis gelblicher Sandstein. Er ist geschichtet und mit gut sichtbaren Ton- und Kohlefasern durchsetzt (vgl. Abb. 13).¹²⁰ Ummendorfer Sandstein wird als sehr homogen beschrieben, ist ebenfalls feinkörnig, sowie von hellgelber oder auch weißer und dunkelgelber Farbigkeit.¹²¹

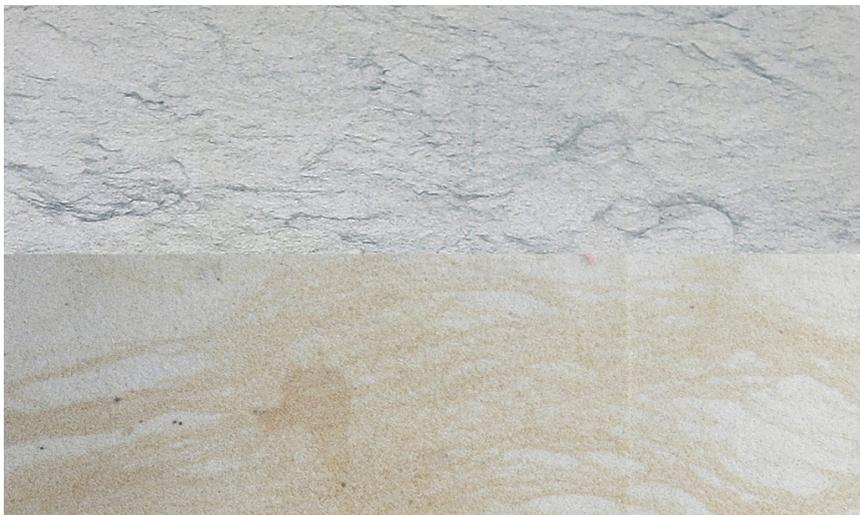


Abb. 13: Cottaer (oben) und Ummendorfer Sandstein (unten). Aufnahmen stammen von den für die Herstellung der Probekörper verwendeten Gesteinsblöcken.

Hinsichtlich ihrer mineralischen Zusammensetzung ähneln sich die beiden Sandsteine, wobei die Streuung der Eigenschaften innerhalb der Varietäten groß sein kann. Bei Cottaer Sandstein wird der Quarzanteil von Ehling & Siedel (2011) mit über 90 % angegeben. Grimm (2018) beziffert einen Quarzanteil von 86 %.

¹²⁰ Ehling & Siedel, 2011, S. 215.

¹²¹ Ehling & Siedel, 2011, S. 132.

Daneben finden sich Feldspat¹²², die Tonminerale Illit und Kaolinit, kohlige Substanzen und Gesteinsbruchstücke.

Der Quarzanteil von Ummendorfer Sandstein bewegt sich in einer ähnlichen Größenordnung mit 87 bis 97 %, der Feldspatanteil zwischen 0 und 5 %. Ebenfalls vorhanden sind 1 bis 7 % des Tonminerals Kaolinit.¹²³

Die Korngrößen des Cottaer Sandsteins liegen zwischen 0,05 und 0,25 mm. Die Körner sind schwach gerundet bis gerundet. Die Sortierung wird von Ehling & Siedel als schlecht angegeben.^{124,125} Ummendorfer Sandstein hat mit Korngrößen von 0,08 bis 0,26 mm Körner in einer sehr ähnlichen Größenspanne. Diese werden als gut gerundet beschrieben und deren Sortierung als gut.¹²⁶

Auch die Rohdichte und offene Porosität der beiden Varietäten sind sehr ähnlich. Für Cottaer Sandstein finden sich in der Literatur für die Rohdichte Werte zwischen 2,0 und 2,1 g/cm³ für die offene Porosität Werte zwischen 22,6 und 24,1 Vol.-%. Für Ummendorfer Sandstein wird die Rohdichte von INSK (1998) mit 2,02 g/cm³ angegeben. Die offene Porosität liegt nach Untersuchungen von Ehling & Siedel (2011) zwischen 23,5 und 25,4 Vol.-%.

Signifikante Unterschiede zeigen sich in den Porenradienverteilungen der beiden Gesteine (vgl. Abb. 14). Der größte Anteil der Porenradien des Cottaer Sandsteins liegt unterhalb von 1 µm im unteren Kapillarporen- und oberen Mikroporenbereich, in denen Kapillarkondensation und Kapillarität stattfinden (vgl. Abb. 2 in Abschnitt 2.1). Der Anteil an größeren Kapillarporen ist gering. Makroporen sind nicht vorhanden.¹²⁷ Vom Ummendorfer Sandstein liegt in der Literatur keine Porenradienverteilung vor. Im Rahmen der Arbeit wurde jedoch an einer Probe derselben Gesteinsblöcke, welche auch der Autorin später zur Entnahme von Probekörpern dienten (vgl. Abschnitt 6.2.1), von Prof. Dr. H. Siedel an der TU Dresden die Porenradienverteilung bestimmt.¹²⁸ Die untersuchte Probe des

122 5 - 10 % nach Ehling & Siedel (2011), 1 % nach Grimm (2018).

123 Ehling & Siedel, 2011, S. 134

124 Grimm, 2018, S. 328.

125 Ehling & Siedel, 2011, S. 218.

126 Ebd., S. 133f.

127 Ehling & Siedel, 2011, S. 218.

128 Messprotokoll siehe Anhang A.2.

Ummendorfer Sandsteins weist kaum Mikroporen auf. Der Großteil der Poren liegt im Kapillarporenbereich zwischen 10 und 100 μm . Makroporen sind auch hier kaum vorhanden.

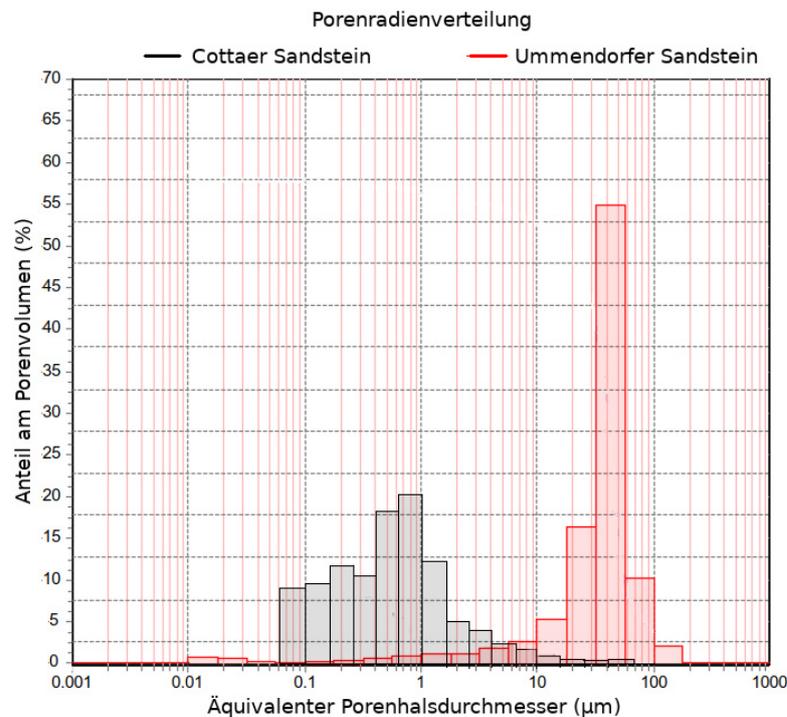


Abb. 14: Porenradienverteilungen von Cottaer und Ummendorfer Sandstein (nach Siedel, TU Dresden & Grimm, 2018, S. 328).

Die verschiedenen Porenradienverteilungen zeigen sich auch im Feuchte-transportverhalten. Die w -Werte der verwendeten Probegesteine wurden zuvor im Rahmen des Projektes bestimmt. Bei Cottaer Sandstein lag der w -Wert im Mittel bei $0,4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$, bei Ummendorfer Sandstein mit $1,3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ deutlich höher.¹²⁹ Die Wassersättigungswerte der beiden Gesteine, die wiederum von der offenen Porosität bestimmt sind, zeigen kaum Unterschiede. Für die Wassersättigung von Cottaer Sandstein wurden im Rahmen verschiedener Studien Werte zwischen 6,8 und 8,2 M.-% gemessen.^{130,131} Bei Ummendorfer Sandstein finden sich hierzu zwei Quellen, die Werte zwischen 7,3 und 8,8 M.-% angeben.^{132,133} An den verwendeten Probegesteinen wurde im Rahmen des DBU-

129 Projektinternes Messprotokoll, Labor Köhler.

130 Grimm, 2018, S. 283.

131 Sächsische Sandsteinwerke, 2023.

132 Ehling & Siedel, 2011, S. 135.

133 INSK, 1998, Abschnitt 95.6.

Projektes bei Cottaer Sandstein nach 48 Stunden Wasserlagerung eine Sättigung von 8,5 M.-% und bei Ummendorfer Sandstein eine Sättigung von 8,0 M.-% gemessen, was gut mit den Literaturwerten übereinstimmt.¹³⁴

Zur Ultraschallgeschwindigkeit liegen nur für Cottaer Sandstein Referenzwerte aus der Literatur vor. Grunert (2007) gibt Werte von 2,7 km/s senkrecht zur Schichtung und 2,8 km/s parallel zur Schichtung an. Die von ihm gemessenen Werte weisen jeweils eine Streuung von ca. 8 % auf. Die Ultraschallgeschwindigkeiten befinden sich damit für einen Sandstein im mittleren Bereich (vgl. Abschnitt 3.3).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass viele Untersuchungen zu den petrografischen Eigenschaften von Cottaer Sandstein vorliegen, hingegen wenige zu Ummendorfer Sandstein. Die beiden Gesteine ähneln sich hinsichtlich ihrer Zusammensetzung, Korngrößen, Dichte und Porosität. Signifikante Unterschiede bestehen in der Porenradialverteilung und damit im Feuchtetransportverhalten.

4.2 Verwitterungsverhalten

In Cottaer Sandstein sind Inhomogenitäten wie Tonanreicherungen und Kohlefasern besonders verwitterungsanfällig. Zu Schäden kommt es vor allem bei Feuchte- und Salzbelastung im Sockelbereich bzw. allgemein bei besonderer Feuchteexposition. Durch die Auswitterung toniger Bestandteile können Verwitterungen aufgrund von Reliefbildung entstehen. Typische Ausprägungen sind etwa Abschuppen oder Zerbröckeln der Gesteinsoberfläche. Bei intensiver, allseitiger Bewitterung in exponierter Lage, wie bei freistehenden Skulpturen, tritt eine Verschwärzung der Oberfläche auf. In weniger exponierten Lagen erfolgt häufig eine Verfärbung ins Graue oder tiefere Gelb.¹³⁵

Die Verwitterungsresistenz von Ummendorfer Sandstein wird von Ehling & Siedel (2011) als gut bis mäßig angegeben. Typisch ist ein gleichmäßiges Absanden aufgrund des Verlusts der meist nur mäßig ausgeprägten kieseligen Bindung. Infolgedessen ist ein Zurunden von Ecken und Kanten typisch. Bei tonreichen

¹³⁴ Projektinternes Messprotokoll, Labor Köhler.

¹³⁵ Ehling & Siedel, 2011, S. 132.

Varietäten kann es zu inhomogenen Verschmutzungen und Reliefbildung kommen. In Berlin und Potsdam wurden aufgrund des schlechten Erhaltungszustandes im 19. und 20. Jahrhundert viele der im 17. Jahrhundert eingebauten Rhätsandsteine durch andere Gesteine ausgetauscht.¹³⁶

¹³⁶ Ehling & Siedel, 2011, S. 135.

5 Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse des DBU-Projektes

Das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte Projekt AZ 34558/01¹³⁷ begann auf Antragstellung von Wolfram Köhler im Jahr 2018. Weitere Projektbeteiligte sind die Abteilung der Skulpturenrestaurierung der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten (SPSG), der Studiengang Steinrestaurierung der Fachhochschule Potsdam und Prof. Dr. Rolf Snethlage. Das Projekt war zunächst für einen Zeitraum von drei Jahren angelegt. Es musste aufgrund der Coronasituation und darüber hinaus durch den Tod von Wolfram Köhler und Rolf Snethlage auf insgesamt 4 Jahre Projektlaufzeit verlängert werden. Der Hauptfokus des Projekts lag auf der Untersuchung der Feuchteabhängigkeit von Ultraschalllaufzeitmessungen an Sandstein und die Frage nach der Anwendbarkeit der Methode für ein Langzeitmonitoring. Als Untersuchungsobjekte sind vor allem Skulpturen des Neuen Palais in Potsdam, aus dem Verantwortungsbereich der SPSG, genutzt worden. Ergänzend erfolgten auch Messungen an den Reliefs des Steinernen Albums in Großjena.¹³⁸

Neben den Messungen an Skulpturen am Neuen Palais, die zu verschiedenen Jahreszeiten ausgeführt worden sind, ist zu Beginn des Projekts ein Messstand in freier Exposition an der Fachhochschule Potsdam installiert worden, an dem über die Projektlaufzeit an Blöcken aus Ummendorfer und Cottaer Sandstein in Abhängigkeit vom Außenklima und der Materialfeuchte automatisiert die Ultraschallgeschwindigkeit aufgezeichnet werden sollte. Die automatisierten Messungen zeigten sich allerdings als sehr störungsanfällig. Die Sensoren lösten sich immer wieder von der Oberfläche und konnten so keine zuverlässigen Daten mit gleichbleibenden Kopplungsbedingung liefern. Das Messprogramm wurde daraufhin angepasst. Weitere Untersuchungen erfolgten nunmehr an Bohrkernen,

137 DBU-Projekt „Standicherheit von frei bewitterten Natursteindenkmalen: Beurteilung des Einflusses der Feuchte auf die Ultraschallgeschwindigkeit, u. a. am Beispiel von national wertvollen, anthropogen geschädigten Objekten aus dem Park Sanssouci“, Az. 34558/01, Start: 23.08.2018.

138 Die Ergebnisse sind im Bericht zu dem DBU-Vorhaben AZ 33821/01-45 zu diesem Objekt verzeichnet.

die im Labor auf bestimmte Luftfeuchtigkeiten konditioniert wurden. Durch das geringere Volumen der Bohrkerne konnte die Gleichgewichtsfeuchte leichter eingestellt bzw. kontrolliert werden. Erste Vorversuche erfolgten an kleinen Gesteinsprismen, um die Akklimatisierungszeit maximal zu verkürzen. Des Weiteren wurde zur Untersuchung der Trägheit der Feuchteaufnahme von großen Sandsteinkörpern (Skulpturen) gegenüber dem Außenklima eine Simulation der Feuchteverteilung durchgeführt. Die Ergebnisse beider Versuche werden in dem folgenden Kapitel zusammengefasst.

Außerdem erfolgten Bestimmungen der kapillaren Wasseraufnahme (w -Werte) der beiden verwendeten Probegesteine. Diese wurden bereits in Abschnitt 4 bei der Zusammenstellung der petrophysikalischen Eigenschaften von Cottaer und Ummendorfer Sandstein aufgeführt.

5.1 Ultraschallgeschwindigkeit und bisherige Untersuchungen zu deren Feuchteabhängigkeit

Für ein besseres Verständnis des Einflusses der Sorptionsfeuchte auf die Ultraschallgeschwindigkeit bei Cottaer und Ummendorfer Sandstein zu bekommen, wurden kleine prismenförmige Probekörper¹³⁹ (vgl. Abb. 15) in Exsikkatoren bei unterschiedlichen Luftfeuchten¹⁴⁰ akklimatisiert. Bei angenommener Gleichgewichtsfeuchte wurde die Ultraschallgeschwindigkeit gemessen. Das ausgesprochen kleine Probekörpervolumen wurde gewählt, um die benötigten Wartezeiten zwischen den Messungen möglichst gering zu halten. Umso größer das Probekörpervolumen ist, desto länger braucht der Probekörper, um die entsprechende Gleichgewichtsfeuchte anzunehmen. Nachteilig ist, dass durch die geringe Messdistanz von 3 cm bereits kleine Messfehler großen Einfluss auf die Ergebnisse haben können. Wie bereits in Abschnitt 3.2 gezeigt, führen Messunsicherheiten, die sich aus der Ankopplung ergeben, insbesondere bei kleinen Messstrecken, zu großen Ungenauigkeiten. Die Messungen erfolgten an drei Probekörpern pro Varietät, an denen an jeweils einem Messpunkt entlang

139 Maße: Länge: 3 cm, Grundfläche: 1 x 1 cm.

140 0 %, 22 %, 50 %, 75 %, 85 %, 100 % relative Feuchte (Snethlage, 2022, S. 10).

der Längsachse die Ultraschallgeschwindigkeit gemessen wurde.¹⁴¹ Die Messungen können damit zunächst einen zu erwartenden Trend abzeichnen, sind aber für allgemeingültige Aussagen mit Vorsicht zu interpretieren. Durchgeführt wurden die Messungen von den Studentinnen Lale von Baudessin und Tamara Niedtner.¹⁴² Die Auswertung erfolgte durch Prof. Dr. R. Snethlage. Seine Ergebnisse werden im Folgenden kurz zusammengefasst.



Abb. 15: Gesteinsprismen aus Cottaer und Ummendorfer Sandstein.

Abbildung 16 und 17 zeigen die an den Prismen aus Cottaer und Ummendorfer Sandstein gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Umgebungsklimas. Aufgetragen sind außerdem die Ultraschallgeschwindigkeiten nach der Trocknung bei 100 °C und nach vollständiger Wassersättigung. Es ist kein Einfluss der relativen Feuchte der Umgebungsluft auf die Ultraschallgeschwindigkeiten zu erkennen. Die Abweichungen bleiben im Bereich der Messunsicherheit. Eine größere Streuung bei Ummendorfer Sandstein bei 0 % relativer Feuchte weist auf Inhomogenitäten des Materials hin. Bezüglich der gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten bei 0 % relativer Feuchte und den bei 100 °C getrockneten Proben ist bei beiden Gesteinen kein Unterschied zu erkennen. Bei den wassergesättigten Proben kommt es hingegen bei beiden Gesteinen zu einem deutlichen Abfall der Ultraschallgeschwindigkeiten, wobei bei Ummendorfer Sandstein auch hier große Streuungen auftreten.¹⁴³

141 Persönliche Mitteilung von Lale von Baudessin, 10.11.2022.

142 Verwendet wurde ein Messgerät der Firma Krompholz mit einer Messfrequenz von 350 kHz. (Snethlage, 2022, S. S. 8).

143 Snethlage, 2022, S. 11ff.

Als mögliche Erklärung für den Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit bei Wassersättigung bei den beiden Sandsteinen, nennt Snethlage den Abfall des E-Moduls.¹⁴⁴ Die Ultraschallgeschwindigkeit steht in direktem Zusammenhang mit der Größe des dynamischen E-Moduls (vgl. Abb. 4, Abschnitt 2.2). Bei Cottaer Sandstein sinkt bei Wassersättigung die Druckfestigkeit um 50 %.¹⁴⁵ Infolge der Wassersättigung kommt es auch zum Absinken des E-Moduls.¹⁴⁶

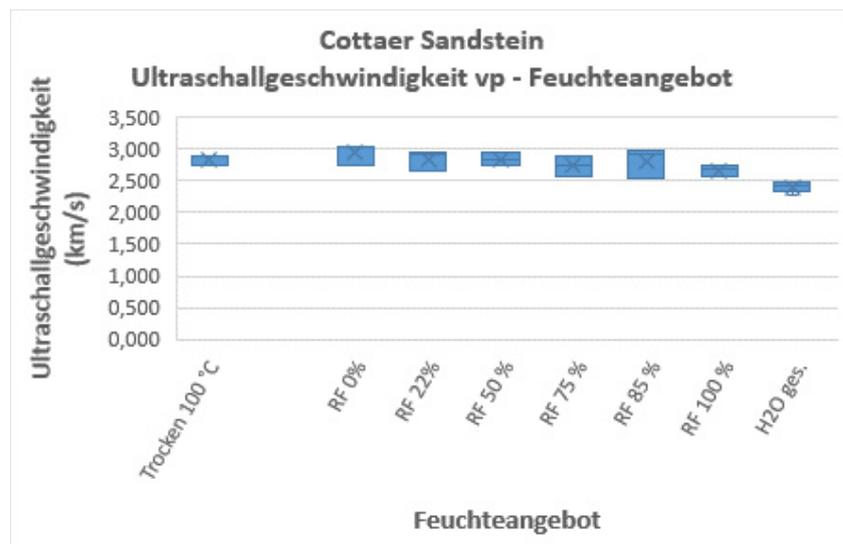


Abb. 16: Cottaer Sandstein: Ultraschallgeschwindigkeiten nach Lagerung in verschiedenen relativen Luftfeuchten sowie in getrocknetem und wassergesättigtem Zustand (Snethlage, 2022, S. 13).

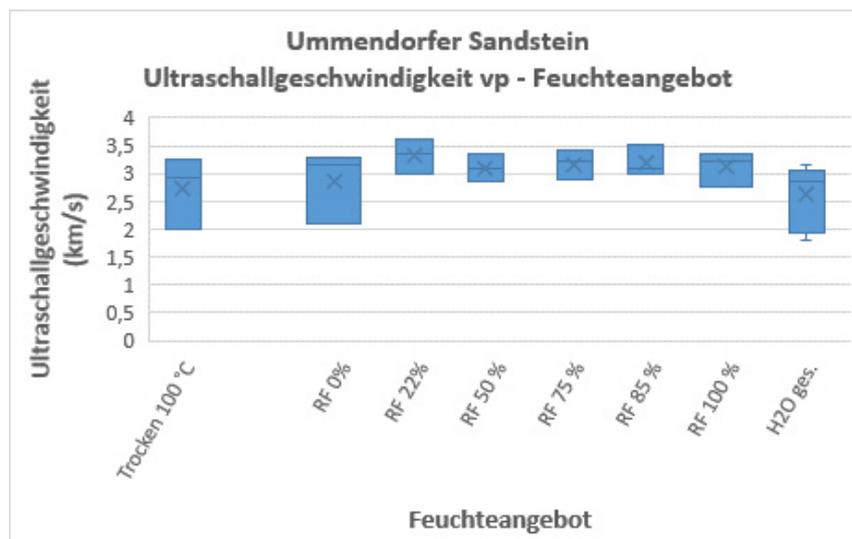


Abb. 17: Ummendorfer Sandstein: Ultraschallgeschwindigkeiten nach Lagerung in verschiedenen relativen Luftfeuchten sowie in getrocknetem und wassergesättigtem Zustand (Snethlage, 2022, S. 13).

144 Snethlage, 2022, S. 12.

145 Snethlage, 2022, S. 12, nach Grunert (2007a) und Grunert & Szilagy (2010).

146 Snethlage, 2022, S. 12.

Aus den Ergebnissen schlussfolgert Snethlage, dass im Gegensatz zu Messungen an Marmor klimatische Bedingungen, mit Ausnahme von direkter Beregnung, eine eher untergeordnete Rolle spielen und damit keine Korrektur notwendig ist:

„Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit können so direkt als Folge von Materialveränderungen interpretiert werden d. h. als Folge von Verwitterungsprozessen. Es wäre somit bei Sandstein theoretisch einfacher, mit Hilfe von Ultraschallmessungen Materialveränderungen über längere Zeiträume zu registrieren.“¹⁴⁷

Snethlage weist auch auf die Problematik des kleinen Wertebereichs bei Sandstein hin (vgl. auch Abschnitt 3.2). Nach Snethlage hat unverwitterter Sandstein in der Regel Werte zwischen 3,0 bis 3,5 km/s¹⁴⁸, verwitterter Sandstein Werte von ca. 2,0 km/s. Werte von unter 2,0 km/s kommen nur bei starken Gefügezerüttungen vor. Die großen Streuungen der durchgeführten Messungen, 0,1 bis 0,5 km/s bei Cottaer Sandstein und 0,5 bis 1 km/s bei Ummendorfer Sandstein, zeigen, dass grundsätzlich nur unpräzise Aussagen über den Verwitterungszustand möglich sind.

5.2 Simulation der Feuchteverteilung in Skulpturen aus Cottaer Sandstein

Im Rahmen des DBU-Projekts wurde von Prof. R. Snethlage mit Unterstützung von Dr. R. Utz (ProDenkmal) eine Simulation zum Feuchtetransport in Skulpturen aus Cottaer Sandstein mittels der Software WUFI¹⁴⁹ durchgeführt. WUFI dient der Simulation der Verteilung von Feuchtigkeit in Bauteilen bei Exposition in einem bekannten lokalen Außenklima. Es kann dabei die Verteilung in unterschiedlichen Geometrien über den Verlauf mehrerer Jahre betrachtet werden.

Die durchgeführte Simulation beruhte auf stündlichen Werten von Temperatur, Luftfeuchtigkeit sowie Menge und Richtung von Niederschlagsereignissen.

147 Snethlage, 2022, S. 14.

148 Abweichungen nach oben bis zu 4,0 km/s sind möglich. (Snethlage, 2022, S. 14).

149 **Wärme und Feuchte** Instationär. Entwickelt vom Fraunhofer Institut für Bauphysik (Snethlage & Utz, 2021, S.1).

Ebenso berücksichtigte sie die Sonnenscheindauer, Windstärke und Windrichtung. Als Grundlage wurde das Durchschnittsklima Augsburgs verwendet.¹⁵⁰ Die benutzten Materialkennwerte von Cottaer Sandstein finden sich in Anhang A.3.¹⁵¹

Simuliert wurde die Feuchte- und Temperaturverteilung in freistehenden Objekten wie etwa Skulpturen im Verlauf eines sowie mehrerer Klimajahre. Dazu wurde ein einfaches Modell¹⁵² einer Skulptur entwickelt (vgl. Abb. 18), dessen Ausrichtung festgelegt und dem lokalen Klima ausgesetzt. Startpunkt der Simulation ist die Gleichgewichtsfeuchte des Objektes bei 80 % relativer Feuchte. Angezeigt werden kann der zeitliche Verlauf der Feuchteverteilung im zweidimensionalen Schnitt sowie der Wassergehalt gesamttheilich oder in verschiedenen Tiefen der Skulptur.¹⁵³

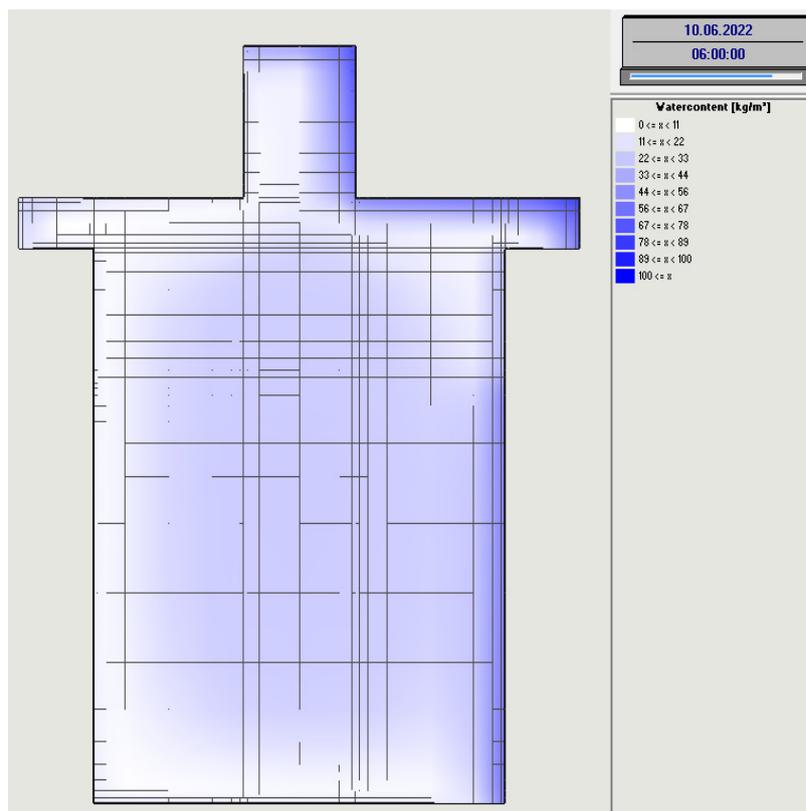


Abb. 18: Skulpturenmodell aus Cottaer Sandstein (Ausrichtung: Ost links, West rechts). Wassergehalt [kg/m³] nach einem Regenereignis im Juni. Die Westseite ist durch den von Westen einfallenden Regen deutlich stärker durchfeuchtet (Snethlage & Utz, 2021, S. 4).

150 Auch wenn sich das Augsburger Klima nicht eins zu eins auf das Potsdamer übertragen lässt, können die Ergebnisse in ihren Tendenzen als für Potsdam repräsentativ angesehen werden.

151 Snethlage & Utz, 2021, S. 1f.

152 Korpus: Höhe (H) 80 cm, Breite (B) 55 cm. Arme: B 75 cm, H 5 cm. Kopf: H 20 cm, B 15 cm.

153 Snethlage & Utz, 2021, S. 2.

Abbildung 18 zeigt das Skulpturenmodell nach einem Regenereignis im Juni, nach zehnmonatiger Exposition im Augsburger Klima. Zu erkennen ist, dass im exponierten, nach Westen orientierten, Bereich die Feuchtigkeit deutlich erhöht ist. Der Wassergehalt beträgt hier ca. 5 M.-%. Im regengeschützten Bereich unter der Auskrugung liegt der Wassergehalt bei ca. 2,2 M.-%, im unteren Bereich ohne direkten Regenschutz bei ca. 2,7 M.-%. Das Innere der Skulptur ist mit ca. 1,7 M.-% nur gering durchfeuchtet.¹⁵⁴ Die Simulation verdeutlicht, dass es durch die Westorientierung der Niederschläge in Deutschland auch im Jahresverlauf zu einer stärkeren westseitigen Durchfeuchtung kommt.¹⁵⁵

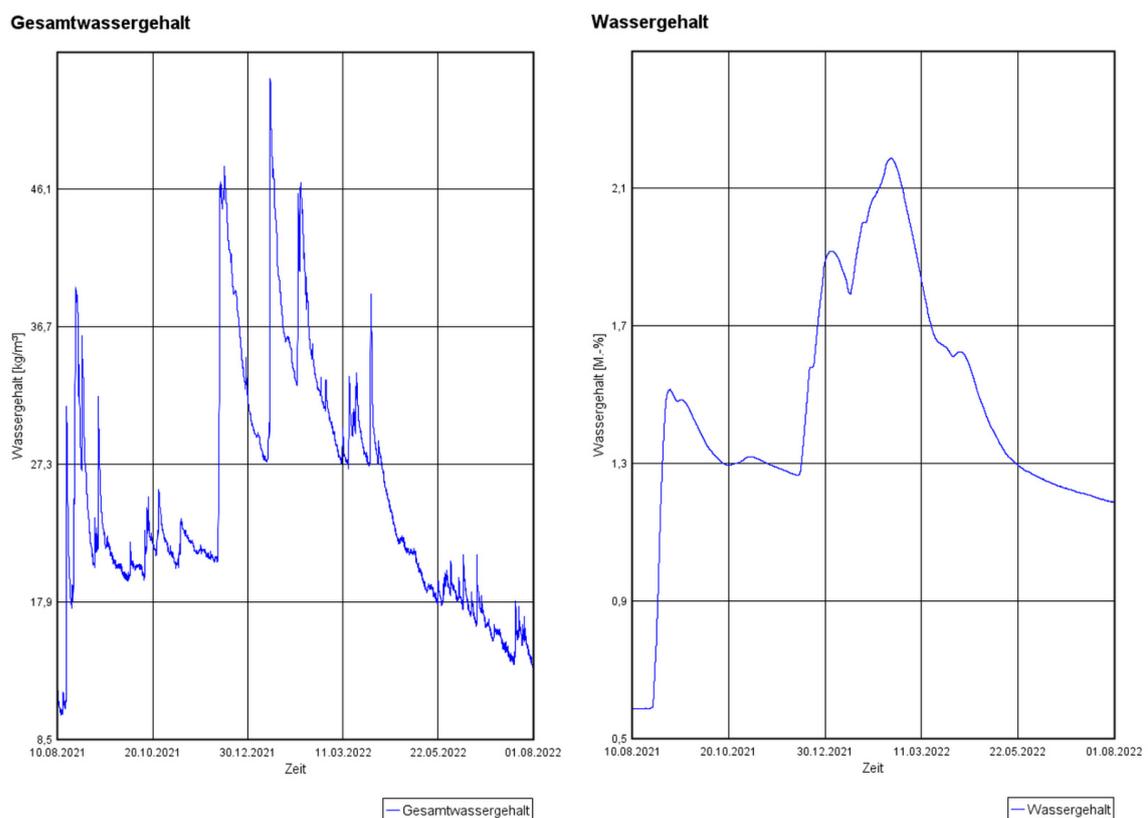


Abb. 19: Wassergehalt im Skulpturenmodell aus Cottaer Sandstein während einer Klimaperiode mit der Dauer eines Jahres. Links: Verlauf des Gesamtwassergehalts $[\text{kg/m}^3]$. Rechts: Wassergehalt im Kernbereich [M.-%]. Die Datierung auf der Abszisse resultieren daraus, dass zum Start des Klimajahres willkürlich der 10.08.2021 gewählt wurde (Snethlage & Utz, 2021, S. 5f).

Wird der Gesamtwassergehalt in der simulierten Klimaperiode betrachtet (vgl. Abb. 19, links), so sieht man, dass Regenereignisse den Wassergehalt, wie zu erwarten, deutlich ansteigen lassen. Die höchsten Durchfeuchtungsspitzen treten

¹⁵⁴ Snethlage & Utz, 2021, S. 4.

¹⁵⁵ Snethlage & Utz, 2021, S. 2.

in den Wintermonaten auf und liegen bei 46 bis 56 kg/m³, was 2,3 bis 2,8 M.-% entspricht. Der Gesamtwassergehalt geht am Ende des Testjahres fast auf den Ausgangswert zurück.¹⁵⁶

In der Entwicklung des Wassergehalts im Kernbereich (Abb. 19, rechts) ist im Jahresverlauf eine erhöhte Durchfeuchtung in den Wintermonaten zu sehen. Der Wassergehalt unterliegt weniger starken Schwankungen und ist am Ende des Testjahres höher als zu Beginn. Ein Peak existiert im Herbst, der deutlich höher ist als die Werte der Sommermonate.¹⁵⁷

Um die Veränderung im Kernbereich über mehrere Jahre zu untersuchen, wurden an Quadern¹⁵⁸ aus Cottaer Sandstein vier Klimaperioden¹⁵⁹ simuliert. Der Wassergehalt im Kernbereich beträgt nach den vier Zyklen ca. 1,2 M.-%. Nach dem ersten Jahr ist bereits die Gleichgewichtsfeuchte erreicht, die sich in den nächsten Jahren nicht mehr signifikant ändert. Die Veränderung des Wassergehalts im Jahresverlauf wiederholt sich periodisch.¹⁶⁰

Fazit ist, dass im Inneren von frei bewitterten Steinobjekten immer eine Zone mit erhöhter Feuchte besteht. Die Randbereiche werden bei Regenereignissen stärker durchfeuchtet und trocknen wieder vollständig auf die Gleichgewichtsfeuchte ab. Die Zone mit erhöhtem Wassergehalt im Inneren schwankt in einem Bereich zwischen 1,2 und 2,2 M.-% und ist damit weit entfernt von der Sättigungsfeuchte (vgl. Abschnitt 4.1). Es sei darauf hingewiesen, dass durch die Simulationen keine für Cottaer Sandstein allgemeingültigen Aussagen getroffen werden können, da die Varianz der Eigenschaften von Cottaer Sandstein zu groß ist. Es kann lediglich der Cottaer Sandstein mit den eingegebenen Eigenschaften abgebildet werden. Die in der Simulation gezeigten Trends können jedoch als repräsentativ angesehen werden.¹⁶¹

156 Snethlage & Utz, 2021, S. 5.

157 Snethlage & Utz, 2021, S. 6.

158 Um Rechenleistung einzusparen, wurde eine einfachere Geometrie betrachtet.

159 Viermal Augsburgs Klimajahr.

160 Snethlage & Utz, 2021, S. 12f.

161 Snethlage & Utz, 2021, S. 14.

6 Versuche zur Feuchteabhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeit im Labor und in situ

Die zuvor im Rahmen des DBU-Projekts ausgewerteten Versuche gaben Aufschluss über die Feuchteverteilung in Sandsteinskulpturen im jahreszeitlichen Wandel. Sie lieferten bereits erste Hinweise, dass es bei Cottaer und Ummendorfer Sandstein mit steigender Materialfeuchte zu einem Abfall der Ultraschallgeschwindigkeiten kommen kann (vgl. Abschnitt 5.1). Dieses Ergebnis wurde auch bei anderen Studien an verschiedenen Sandsteinen beobachtet (vgl. Abschnitt 3.1).

Wiederholte Messungen, die im Rahmen des DBU-Projektes in den vergangenen Jahren an Skulpturen des Neuen Palais durchgeführt wurden, sollen nun zeigen, wie groß jahreszeitliche Schwankungen der Ultraschallgeschwindigkeit in der Praxis sind. Ergänzt werden diese Messungen durch Untersuchungen im Labor, um feuchteabhängige Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeit bei sonst gleich bleibenden Rahmenbedingungen quantifizieren zu können. Untersucht werden sollte der Einfluss von kapillar und aus der Luftfeuchte aufgenommenem Wasser. Hierzu wurde zum einen die Ultraschallgeschwindigkeiten bei Tränkung und anschließender Trocknung überwacht, zum anderen bei Akklimatisierung bei unterschiedlichen Luftfeuchten. Die Labormessungen erfolgten zum Teil durch die Autorin, wurden aber zu einem großen Anteil ebenfalls von Studierenden des Studiengangs Steinkonservierung der Fachhochschule Potsdam durchgeführt.¹⁶²

Die Versuche werden im folgenden Abschnitt zunächst separat beschrieben und ausgewertet. Nach einer Fehlerbetrachtung werden die Ergebnisse gemeinsam diskutiert und miteinander, sowie mit vorher besprochenen Studien (vgl. Abschnitt 3.1 & 5.1) in Zusammenhang gebracht. Die verwendeten Messgeräte, Parameter und die detaillierten Messergebnisse finden sich im Anhang.¹⁶³ Analyse und Darstellung der Daten erfolgte mittels der Statistiksoftware R.

¹⁶² Auf die genaue Urheberschaft der Daten wird in Abschnitt 6.2.1 & 6.3.1 im Detail eingegangen.

¹⁶³ Messergebnisse der Messungen an den Skulpturen des Neuen Palais siehe Tabellen 3 bis 10 in Anhang B.5. Messergebnisse der Laborversuche siehe C.2 & C.3.

6.1 Jahreszeitliche Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeit an Skulpturen des Neuen Palais in Potsdam

In den Jahren 2019 bis 2022 erfolgte eine umfangreiche Messkampagne an den Umlaufskulpturen des Neuen Palais in Potsdam. Erfasst werden sollten dabei die jahreszeitlichen Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeit an Skulpturen aus Ummendorfer und Cottaer Sandstein. Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit werden die erfassten Daten ausgewertet. Das folgende Kapitel stellt zunächst das Neue Palais und seinen Skulpturenbestand vor. Anschließend wird erläutert, nach welchen Kriterien die untersuchten Skulpturen ausgewählt wurden. Das Unterkapitel *Durchführung der Messungen* beschreibt den Vorgang der verschiedenen Messungen, die bereits vor der Masterarbeit durch verschiedene Akteur*innen des DBU-Projektes erfolgten. Nach Analyse des Klimas an und vor den Messtagen erfolgt die Datenauswertung und die dazugehörigen Ergebnisse werden beschrieben.

Tabelle 2: Überblick über die im Rahmen des DBU-Projektes an Skulpturen des Neuen Palais durchgeführten Messungen

Probekörper	Messung der Ultraschallgeschwindigkeiten	Zeitraum
8 Skulpturen: 3 aus Ummendorfer Sandstein, 5 aus Cottaer Sandstein	Einzelmessungen an bis zu 29 Messpunkten	5 Messungen (Juli 2019, Februar 2020, Mai 2020, Oktober 2020, Januar 2022)

6.1.1 Auswahl von Skulpturen aus Ummendorfer und Cottaer Sandstein am Neuen Palais in Potsdam

Das Neue Palais befindet sich an der Westseite des Parks Sanssouci in Potsdam. Es wurde 1763 bis 1769 unter Friedrich II. erbaut. Es diente nicht als Residenz, sondern als Repräsentationsbau und als Schloss für Gäste des Hofes. 1888 bis 1918 machte es Wilhelm II. zu seinem Hauptwohnsitz. Es gehört heute zum

UNESCO Weltkulturerbe und wird als Höhepunkt des Friderizianischen Rokoko angesehen.^{164,165}

Das Gebäude tritt durch einen besonders reichen Skulpturenschmuck hervor. Im Erdgeschoss und auf dem Dach befinden sich insgesamt 267 überlebensgroße Skulpturen. Die Skulpturen wurden während der Bauzeit aus Cottaer und Ummendorfer Sandstein von unterschiedlichen Bildhauern gefertigt, was zu Qualitätsunterschieden führte.¹⁶⁶



Abb. 20: Das Neue Palais in Potsdam Sanssouci (Visit Berlin, 2023).

Zur Orientierung sind alle Skulpturen mit einem Kürzel versehen. Die Abkürzungen F und HD bezeichnen die zwei Flügel des Neuen Palais, den Friedrichflügel (F) und den Hofdamenflügel (HD). Die Nummerierung kann Abbildung 21 entnommen werden. Abbildung 21 zeigt ebenso die für das Messprogramm ausgewählten Skulpturen von Hofdamen- und Friedrichflügel. Die Entscheidung fiel auf acht kleinere Skulpturen, an denen alle Messungen ohne Gerüst durchgeführt werden konnten.

164 Drescher & Badstübner- Gröger, 1991, S. 24ff.

165 SPSG, 2023.

166 Hüneke, 2012., S. 286ff.

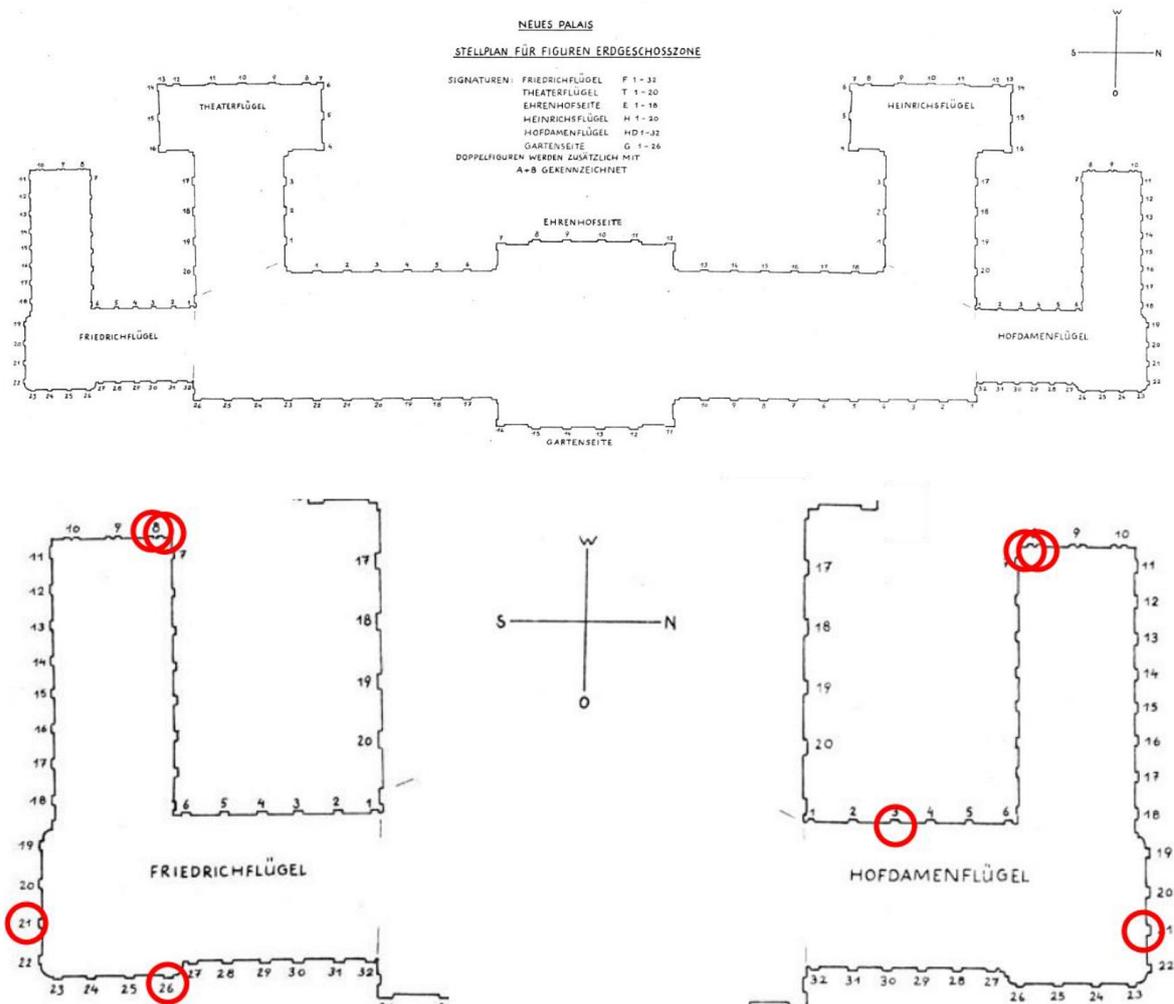


Abb. 21: oben: Stellplan der Skulpturen im Erdgeschoss des Neuen Palais. Die Buchstaben kennzeichnen den zugehörigen Flügel des Gebäudes, die Nummerierung erfolgt chronologisch. Unten: Rot markiert sind die für das Messprogramm ausgewählte Skulpturen von Hofdamen- und Friedrichflügel. (R. Böhm, Skulpturenrestaurierung SPSG).

Es sollten zwei verschiedene Gesteinsarten untersucht werden, Cottaer und Ummendorfer Sandstein. F8a, F8b, F21, F26 und HD8a sind aus Cottaer Sandstein, HD3, HD8b und HD21 aus Ummendorfer Sandstein. Die ausgewählten Skulpturen repräsentieren außerdem verschiedene Expositionen beeinflusst durch Himmelsrichtung, angrenzendes Gebäude und Umgebung. Damit sind unterschiedliche Durchfeuchtungsgrade zu erwarten. F8a, F8b, HD8a HD8b und HD3 befinden sich im Westen. F21 im Süden, HD21 im Norden und F26 im Osten. Alle Skulpturen außer F8b und HD8a sind Originale aus den

Jahren 1760 bis 1769. F8b wurde als Kopie 2015 gefertigt, HD8a in 2016. Die Skulpturen F8a und F8b sowie HD8a und HD8b sind Doppelfiguren aus unterschiedlichen Zeiten und Sandsteinen, was einen gute Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Gesteine und Verwitterungsstufen bei gleicher Exposition ermöglicht. Abbildung 22 zeigt die für die Messungen ausgewählten Skulpturen mit deren Bezeichnungen. Einen Überblick der Skulpturen, deren Material, Exposition und Fertigungsjahr ist Tabelle 1 in Anhang B.1 zu entnehmen.



Abb. 22: Für die Messreihen ausgewählte Skulpturen (Hippe, Skulpturenrestaurierung SPSG).

6.1.2 Durchführung der Messungen

Durchgeführt wurden die Messungen von Dipl.-Rest. Daniel Sandles und den Studierenden Lale von Baudessin, Rebecca Knapp und Johanna Lutze unter der Anleitung von Wolfram Köhler.

Um die Reproduzierbarkeit der Messungen zu gewährleisten, wurden bis zu 29 Messpunkte an den Skulpturen festgelegt und dokumentiert. Durch die genaue Dokumentation der Messpunktverortungen wurde sichergestellt, dass die Messungen zu den verschiedenen Jahreszeiten stets an denselben Stellen erfolgten. Die Dokumentation der Messpunkte findet sich in Anhang B.2. An jedem Messpunkt wurde versucht, pro jahreszeitlicher Messung einen Wert zu erfassen. Die Erstmessungen fanden an vier Tagen im Sommer 2019 statt. Es folgten vier Vergleichsmessungen an jeweils ein bis drei nah beieinander liegenden Tagen im Frühling, Herbst und Winter 2020 sowie eine weitere Messung im Winter 2022.¹⁶⁷

Die Messstrecken wurden manuell mit einem Messzirkel abgenommen. Die eingestellte Kopplungsverzögerung des Gerätes wurde vor den Messungen an kalibrierten Laufzeitnormalen überprüft. Gemessen wurde je nach Messstreckenlänge mit Frequenzen von 46 kHz, 64 kHz oder 250 kHz. Bei starker Dämpfung des Signals wurde Plastic-Fermit¹⁶⁸ als Kopplungsmittel verwendet. In Fällen, in denen durch zu starke Dämpfung kein Signaleinsatz ablesbar war, wurde vereinzelt mit einer Frequenz von 20 kHz gemessen. Bereichsweise konnten keine Messwerte erfasst werden, da die Signaldämpfung zu stark war. Die Messungen erfolgten mit einem von Herrn Köhler zur Verfügung gestellten Gerät der Firma Krompholz.¹⁶⁹

Vor Beginn der Messung einer Skulptur wurden Lufttemperatur und relative Feuchte erfasst. Neben den tagesaktuellen Werten hat vor allem das Klima in den Wochen und Tagen vor den Messungen einen Einfluss auf die im Gestein

¹⁶⁷ Das genaue Datum der jeweiligen Messungen sind in Tabelle 1 in Anhang B.1 zu finden.

¹⁶⁸ Plastic-Fermit ist eine dauerplastische Dichtungsmasse aus dem Sanitärbereich, die sich die letzten Jahrzehnte als Kopplungsmittel bei Ultraschallmessungen an Denkmalgesteinen bewährt hat.

¹⁶⁹ Projektinterne Messprotokolle, Labor Köhler.

vorhandene Feuchtigkeit (vgl. Abschnitt 3.1). Zur Interpretation der Messergebnisse wurden von der Autorin Klimadaten für die Jahre der Messungen aus der Datenbank des Deutschen Wetterdienstes (DWD) heruntergeladen und ausgewertet.¹⁷⁰ Die Daten der betrachteten Klimareferenzstation am Telegrafenberg in Potsdam¹⁷¹ wurden bereits in Köhler (2014) verwendet und für den Park Sanssouci und das Neue Palais als repräsentativ bewertet.¹⁷² Abbildung 23 zeigt Lufttemperatur, relative Feuchte und Niederschlagsmengen für den Zeitraum der Untersuchungen. Die Tage der Messungen sind durch senkrechte Linien im Diagramm eingezeichnet. Im Detail können die Messtage der einzelnen Skulpturen und die dazugehörigen Klimadaten in Tabelle 3 bis 10 in Anhang B.3 nachvollzogen werden.

An den vier Tagen der Referenzmessungen im Juli 2019 lagen Temperaturen zwischen 19 und 24 °C vor. Die relative Feuchte lag zwischen 49 und 55 %. Die Skulptur F26 wurde als erstes gemessen. In den frühen Morgenstunden des Messtages kam es zu leichten Niederschlägen bis zu 0,1 mm/h. Drei Tage vor der Messung fielen mittelstarke Regenschauer mit Niederschlagsmengen bis zu 8,8 mm/h. 5 Tage vor der Messung der Skulptur F21 kam es ebenfalls zu mittelstarken Regenfällen mit bis zu 13 mm/h. Sonst blieb es trocken. Durch Sonnenschein und milde Temperaturen herrschten gute Abtrockenbedingungen. Die Tage der Messungen Ende Mai 2020 waren mit Temperaturen zwischen 16 und 27 °C ebenfalls verhältnismäßig warm. Der erste der beiden aufeinander folgenden Tage, an dem alle Skulpturen außer HD8a und HD 8b gemessen wurden, war jedoch deutlich wärmer. Die relative Feuchte lag zwischen 30 und 46 %. Das letzte Regenereignis lag drei Tage vor den Messungen mit einer Niederschlagsmenge von 2,4 mm/h. Im Herbst 2020 war es regnerisch. An den Tagen vor der Messung (alle Skulpturen konnten an einem Tag gemessen werden) kam es immer wieder zu leichten Regenfällen mit bis zu 2,3 mm/h über einige Stunden hinweg. Auch in den frühen Morgenstunden des Messtages fielen leichte Niederschläge mit bis zu 0,1 mm/h. Die Temperaturen lagen bei 8 bis 11 °C, die

170 DWD, 2022.

171 Koordinaten: 52.3812, 13.0622.

172 Köhler, 2014, S. 42.

relative Feuchte bei 69 bis 94 %. Im Winter 2020 erfolgten die Messungen Mitte Februar. Alle Skulpturen wurden an einem Tag gemessen, es herrschten Temperaturen von 2 bis 7 °C. Zwei Tage vor den Messungen war es regnerisch mit Niederschlägen bis zu 2,1 mm über den gesamten Tag hinweg. Der Niederschlag dauerte an bis in die Morgenstunden des Tages vor der Messung. Der Messtag selber blieb trocken. Die relative Feuchte betrug zwischen 57 bis 65 %. Im Winter 2022 fanden die Messungen an zwei aufeinander folgenden Tagen statt. Zwei Tage vor der Messung kam es zu Niederschlägen mit bis zu 3,4 mm/h. Die relative Feuchte lag am ersten Messtag zwischen 75 und 86 % und am zweiten Tag zwischen 48 und 57 %.

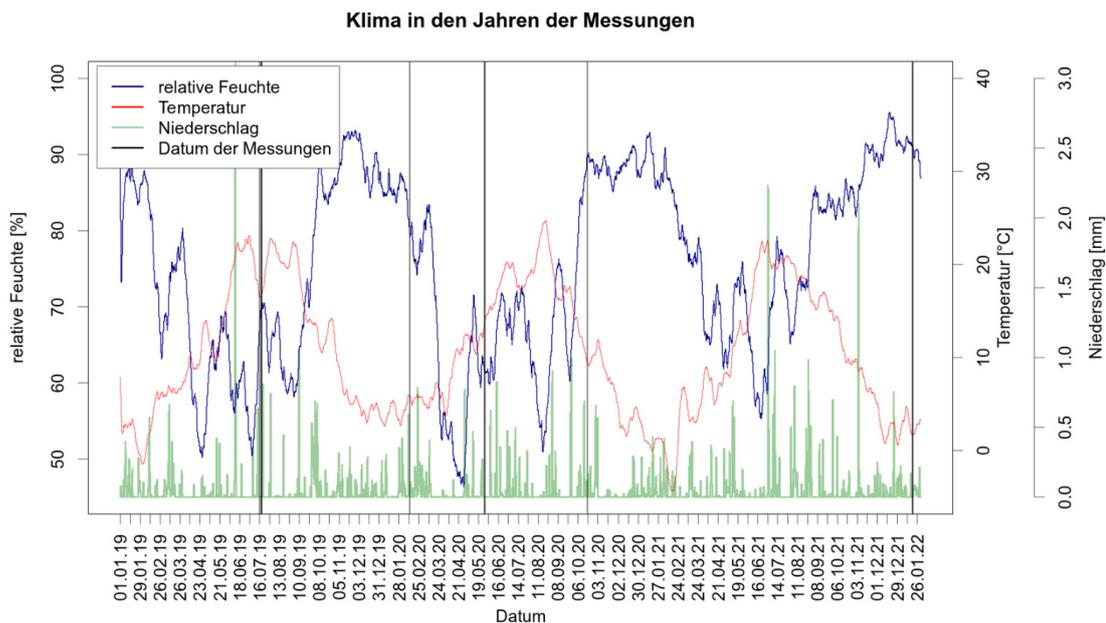


Abb. 23: Temperatur, relative Feuchte und Niederschlag vom 01. Januar 2019 bis 31. Januar 2022. Durch schwarze vertikale Linien sind die Tage der Messungen markiert. Niederschlag gleitender Mittelwert für einen Tag, Temperatur und relative Feuchte: wöchentlicher gleitender Mittelwert (DWD, 2022).

6.1.3 Ergebnisse

Um einen Überblick über die erhobenen Messdaten zu erlangen, werden die Daten in Box-Wisker-Diagrammen¹⁷³ aufgetragen (vgl. Abb. 24). Auf den ersten

¹⁷³ In einem Box-Wisker-Diagramm wird der Median als horizontaler Balken in einer Box dargestellt. Die Box verdeutlicht oberes und unteres Quartil in dem 50 % der Daten liegen. Die Wisker markieren Minimum und Maximum der Werte, die noch innerhalb der Grenzen der Box +/- 1,5 IQR liegen (IQR: Interquartilsabstand/Breite der Box). Durch Kreise außerhalb der Wisker sind Ausreißer gekennzeichnet.

Blick ist zu erkennen, dass die Streuung der Messwerte sehr unterschiedlich ausfällt. Um die Verteilung der Werte besser nachvollziehen zu können und Ausreißer zu identifizieren, werden die Werte der einzelnen Messpunkte als Punktwolken über die Messdiagramme gelegt. Die Bezeichnung des Messpunktes ist dabei als kleine Ziffer neben den Messwerten dargestellt. Um zu untersuchen, ob es eine Distanzabhängigkeit bei der Streubreite oder Ausreißern gibt, werden die Werte der einzelnen Messpunkte je nach Länge der Messdistanz farblich abgestuft dargestellt (vgl. Anhang B.4).

Tabelle 3 gibt zusätzlich einen Überblick über die zu den verschiedenen Jahreszeiten an den Skulpturen gemessenen Medianen. Als Maß der Streuung ist die mittlere absolute Abweichung der Messwerte vom Median mit aufgetragen.¹⁷⁴

Tabelle 3: Mediane MD mit mittlerer absoluter Abweichung im Bezug zum Median v der an den Skulpturen zu den unterschiedlichen Jahreszeiten gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten. [MD] = [km/s], [v] = [%], CS: Cottaer Sandstein, US: Ummendorfer Sandstein.

MD(v)	F21	F26	F8a	F8b	HD21	HD3	HD8a	HD8b
Gestein	CS	CS	CS	CS	US	US	CS	US
Sommer 19	2,93 (6 %)	3,10 (5 %)	2,88 (7 %)	2,77 (3 %)	2,83 (12 %)	2,73 (22 %)	2,91 (5 %)	3,01 (10 %)
Frühling 20	2,91 (4 %)	2,98 (5 %)	2,87 (5 %)	2,84 (5 %)	2,67 (11 %)	2,51 (26 %)	2,93 (5 %)	2,78 (11 %)
Herbst 20	2,78 (9%)	2,93 (6 %)	2,82 (7 %)	2,66 (3 %)	2,51 (9 %)	2,06 (13 %)	2,65 (3 %)	2,41 (14 %)
Winter 20	2,76 (3 %)	2,93 (6 %)	2,85 (6 %)	2,80 (7 %)	2,54 (7 %)	2,07 (10 %)	2,66 (6 %)	2,37 (9 %)
Winter 22	2,82 (8 %)	2,86 (5 %)	2,89 (8 %)	2,73 (6 %)	2,62 (12 %)	2,11 (10 %)	2,66 (4%)	2,36 (8 %)

Auf eine Gliederung der Messwerte nach Schichtungsrichtungen wie von Fleischer (2002) empfohlen (vgl. Abschnitt 3.3), wurde an dieser Stelle verzichtet. Betrachtet wird die Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit über die Jahreszeiten in der Gesamtheit der Messwerte (Median) und im späteren Verlauf des Kapitels die Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit an den einzelnen Messpunkten. Eine Anisotropie möglicher feuchtebedingter Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeit wird nicht erwartet (vgl. hierzu auch weitere Untersuchungen in Abschnitt 6.2 & 6.3).

¹⁷⁴ Prozentual auf den Wert des Medians bezogen.

Jahreszeitliche Messungen an ausgewählten Skulpturen des Neuen Palais

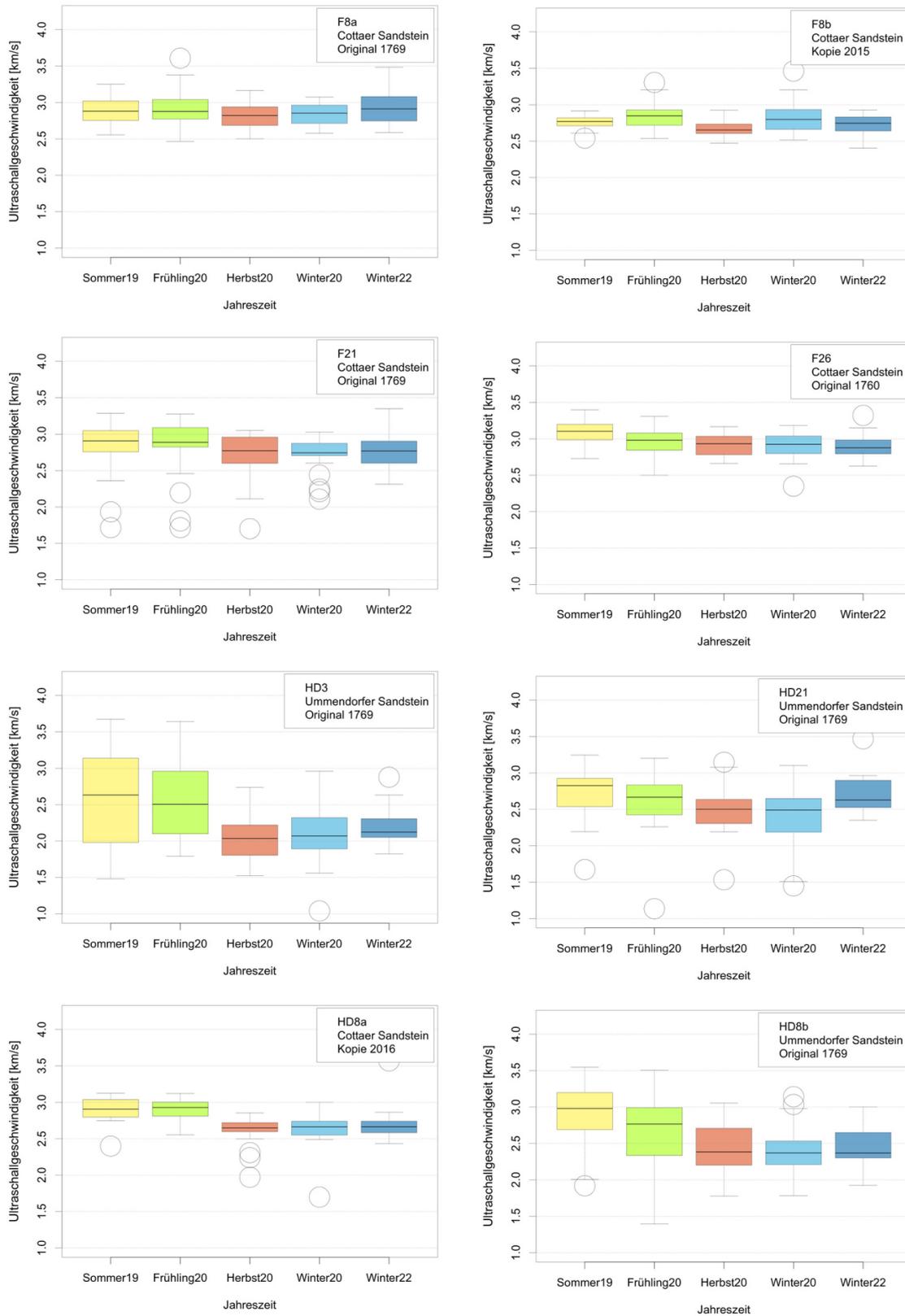


Abb. 24: Box-Wisker-Diagramme der jahreszeitlichen Messreihen an den acht ausgewählten Skulpturen des Neuen Palais.

Betrachtet man zunächst die Referenzmessungen aus dem Sommer 2019, so liegen die Mediane der Ultraschallgeschwindigkeiten der einzelnen Skulpturen im Bereich zwischen 2,7 und 3,1 km/s. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Varietäten ist nicht zu erkennen. Die Werte der Referenzmessungen an den Skulpturen aus Cottaer Sandstein liegen etwas über denen von Grunert (2007b) für bruchfrischen Cottaer Sandstein gemessenen Werte. Dieser gibt 2,69 km/s senkrecht bzw. 2,77 km/s bzw. parallel zur Schichtung an (vgl. Abschnitt 4.1). Die Ultraschallgeschwindigkeiten der Skulpturen aus Ummendorfer Sandstein sind etwas geringer als die bereits im DBU-Projekt an Probekörpern aus Ummendorfer Sandstein ermittelten Ultraschallgeschwindigkeiten (vgl. Abschnitt 5.1).

Auffällig ist, dass die Streubreiten der Messwerte an den Skulpturen aus Ummendorfer Sandstein deutlich größer ausfallen als an den Skulpturen aus Cottaer Sandstein (vgl. Abb. 24). Vor allem bei großen Messdistanzen von über 40 cm kommt es zu deutlichen Ausreißern nach unten (vgl. F21, HD21, HD3). Vereinzelt kommt es bei Messdistanzen ≤ 10 cm zu Ausreißern nach oben. Die größten Streubreiten mit über 20 % zeigt die Skulptur HD3 aus Ummendorfer Sandstein. Sie befindet sich im sogenannten „Eishof“, in dem es die meiste Zeit feucht und schattig ist. Die Messenden berichteten, dass die Messungen an Skulptur HD3 hinsichtlich der Signaldämpfung am problematischsten waren (vgl. Bemerkungen in Tabelle 1 Anhang B.1).

Eine Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeiten über die Jahreszeiten tritt vor allem im Herbst und im Winter auf. Die Mediane der Messungen im Sommer 2019 und Frühling 2020 liegen überwiegend dicht beieinander und oberhalb der Mediane der Herbst- und Wintermessungen. Bei den Skulpturen aus Ummendorfer Sandstein ist die Abnahme der Mediane im Vergleich zur Referenzmessung im Sommer 2019 am deutlichsten und fällt auch hier bei den Herbst und Wintermessungen am größten aus. Bei den Skulpturen aus Cottaer Sandstein sind sowohl die Schwankungen zwischen den Jahreszeiten, als auch die Streuungen der Werte, die an einer Skulptur zu einem bestimmten Zeitpunkt gemessen wurden (< 10 %) insgesamt geringer.

Zwischen den Doppelfiguren F8a und F8b, die beide aus Cottaer Sandstein gefertigt wurden und der selben Exposition ausgesetzt sind, ist kaum ein Unterschied zu erkennen. Die Werte der Originalskulptur F8a liegen tendenziell etwas oberhalb der Werte der Kopie F8b, so auch die Werte der Referenzmessung. F8b ist die einzige Skulptur, bei der es zwischen Sommer- und Frühlingmessung zu einem leichten Anstieg kommt. Die Änderung liegt aber im Bereich der Streubreiten der beiden Werte. F8a hat tendenziell etwas größere Streubreiten, die aber mit $\leq 8\%$ moderat sind. Die Doppelfiguren HD8a und HD8b mit vergleichbaren Expositionseigenschaften wurden aus unterschiedlichen Gesteinen gefertigt. Hier bestätigen sich die zuvor beobachteten Unterschiede zwischen Cottaer und Ummendorfer Sandstein. Bei der Skulptur HD8b, die als Original 1769 aus Ummendorfer Sandstein gefertigt wurde, sind die Streubreiten der Messungen mit 8 bis 14 % groß. Bei Skulptur HD8a, einer Kopie von 2016 aus Cottaer Sandstein, sind die Streubreiten mit 3 bis 6 % deutlich niedriger. Die Mediane der Referenzmessungen beider Skulpturen ähneln sich auch hier. Bei beiden kommt es zu einer geringen Abnahme im Frühling und einer deutlichen Abnahme im Herbst und Winter, die bei HD8b aus Ummendorfer Sandstein stärker ausgeprägt ist. Die Ultraschallgeschwindigkeit sinkt bei HD8a um 0,3 km/s, bei HD8b um 0,65 km/s, was einer Abnahme von 20 % entspricht.

Um den Einfluss der Materialfeuchte quantitativ zu bewerten, werden Werte, die bei den Box-Whisker-Diagrammen außerhalb der Whisker liegen, als Ausreißer eingestuft und aus den Daten entfernt. Sie deuten auf Messfehler oder Gesteinsinhomogenitäten hin. In den Tabelle 3 bis 10 in Anhang B.5 sind alle Messwerte, die in den weiteren Betrachtungen aussortiert wurden, gelb markiert. Messpunkte, bei denen es innerhalb der Sommermessungen zu Ausreißern gekommen ist, werden komplett aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen, da der Referenzwert als schlecht angenommen werden muss.

Aufgrund der Simulation des Feuchtegehalts innerhalb der Skulpturen (vgl. Abschnitt 5.2) kann davon ausgegangen werden, dass vor allem die äußeren Zentimeter einer Skulptur den größten Schwankungen im Feuchtegehalt unterliegen und sich damit bei kurzen Messstrecken die größten feuchtebedingten

Änderungen zeigen sollten. In Abbildung 25 sind deshalb die Abweichungen der Werte der einzelnen Messpunkte von der Referenzmessung im Sommer 2019 nach der Länge der Messstrecke aufgetragen. Die einzelnen Skulpturen werden farblich unterschieden, die Gesteinsvarietäten durch verschiedene Symbole. Die Abbildungen zeigen, dass nach Aussortieren der Ausreißer bei den Herbst- und Wintermessungen die Abweichung nach unten bei den kurzen Messstrecken zunimmt. Allerdings ist zu beachten, dass bei kurzen Messdistanzen auch die meisten Messwerte vorliegen. Bei der Frühlingsmessung kommt es vermehrt zu Änderung der Ultraschallgeschwindigkeiten nach oben, auch bei mittleren Messstrecken.

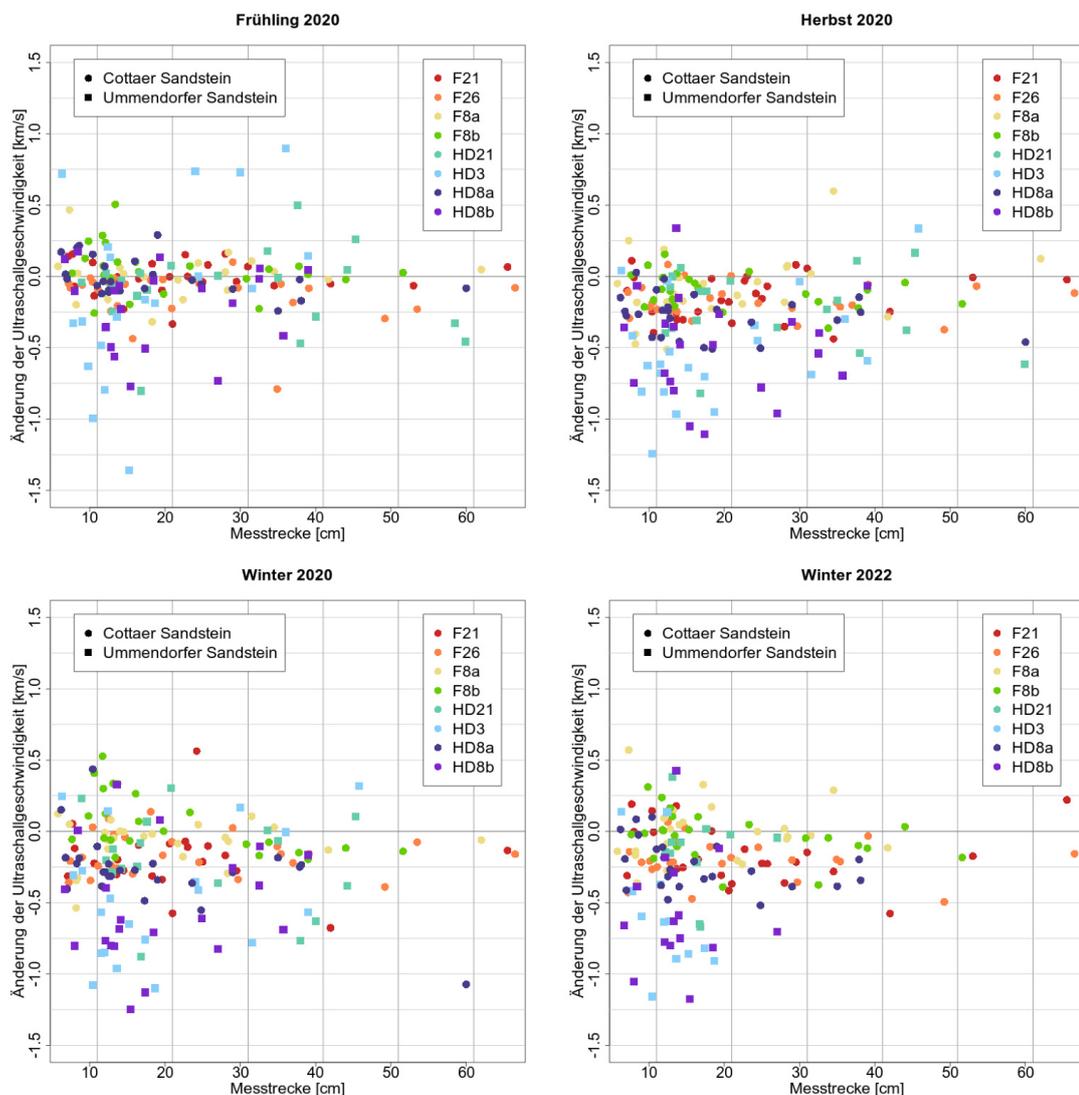


Abb. 25: Plot der Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeiten im Vergleich zur Sommermessung nach Bereinigung der Daten. Dargestellt sind die Änderungen an den einzelnen Messpunkten in Abhängigkeit ihrer Messstrecke.

Aufschluss über die jahreszeitlichen bzw. klimatisch bedingten Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeiten an den verschiedenen Skulpturen gibt die Betrachtung des Mittelwerts der Differenzen zur Sommermessung aller Messpunkte mit einer Messtrecke < 20 cm einer jeden Skulptur (vgl. Abb. 26).

Durchschnittliche Änderung bei Messtrecken < 20 cm in Bezug auf die Sommermessung

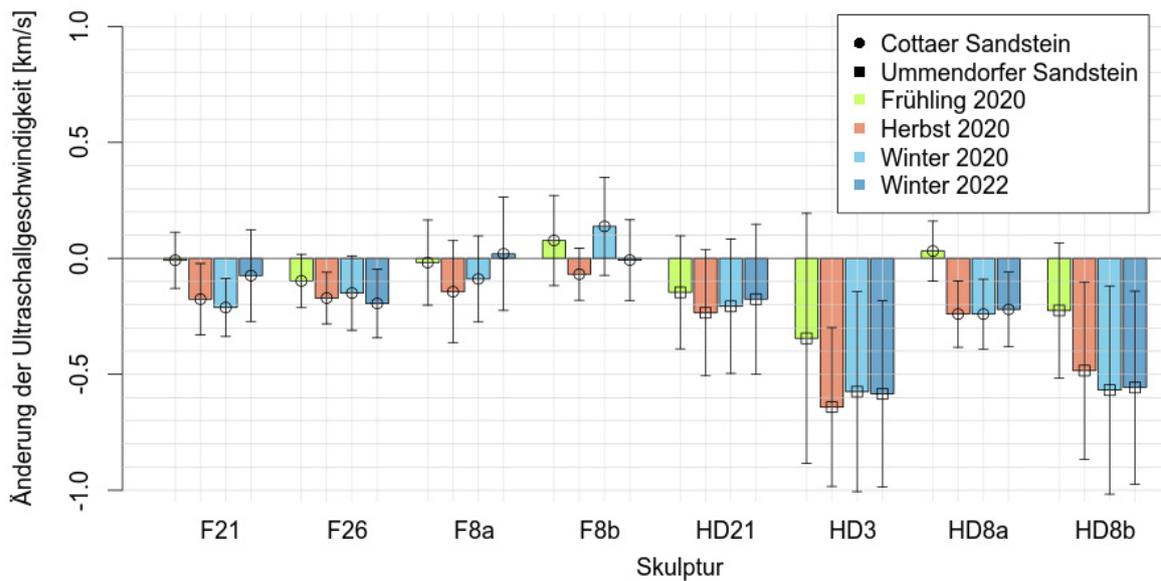


Abb. 26: Durchschnittliche Änderung der Ultraschallgeschwindigkeiten bei Messtrecken < 20 cm in Bezug auf die Sommermessung, die zu den unterschiedlichen Jahreszeiten an ausgewählten Skulpturen des Neuen Palais gemessen wurden.

Zu erkennen ist der bereits zuvor beschriebene Trend: Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeiten im Vergleich von Frühlings- und Sommermessung sind am geringsten. Bei Cottaer Sandstein liegen sie unterhalb von 0,1 km/s. Hier sind sowohl Anstiege als auch Abfälle der Ultraschallgeschwindigkeiten zu beobachten, diese liegen aber innerhalb der Streubreiten der auftretenden Änderungen. Bei Ummendorfer Sandstein ist die durchschnittliche Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit zwischen Sommer und Frühling mit bis zu -0,35 km/s deutlich größer. Die Änderungen können hier aber je nach Messpunkt sehr unterschiedlich ausfallen, wie die großen Streubreiten zeigen. Bei HD3 ist die Streuung der Änderungen größer als die durchschnittliche Änderung der Ultraschallgeschwindigkeiten. Die größten Änderungen treten im Herbst und Winter bei den Skulpturen HD3 und HD8b auf. Sie liegen im Mittel in einem

Bereich von 0,6 bis 0,7 km/s. Auch hier lassen die Streubreiten erkennen, dass die an den einzelnen Messpunkten auftretenden Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeiten sehr unterschiedlich ausfallen. Die durchschnittliche Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeiten der Skulpturen aus Cottaer Sandstein im Herbst und Winter liegt bei bis zu 0,2 km/s. Bei F8b ist ein durchschnittlicher Anstieg von 0,15 km/s zu beobachten, der aber auch innerhalb seiner eigenen Streubreite liegt.

6.2 Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit bei Durchfeuchtung und Trocknung

Um die Grenzwerte des zu erwartenden Wertebereiches für Ultraschallgeschwindigkeit und Feuchteaufnahme von Cottaer und Ummendorfer Sandstein zu bestimmen, werden getrocknete und kapillar gesättigte Probekörper untersucht. Anschließend erfolgen Messungen von Ultraschallgeschwindigkeit und Wassergehalt in definierten Intervallen innerhalb des Trocknungsprozesses. Hierdurch wird untersucht, wie schnell die im Stein vorhandene Feuchtigkeit entweicht und wie stark im Laufe des Trocknungsprozesses die Ultraschallgeschwindigkeit beeinflusst ist. Diese Versuche zeigen, wie groß die in der Praxis auftretende Abweichung bei kapillarer Durchfeuchtung eines Gesteins, durch zum Beispiel Regenereignisse, ist. Es wird außerdem erfasst, welche Zeit die verschiedenen Gesteine benötigen, um wieder zu trocknen und ab welchem Punkt im Trocknungsprozess die vorhandene Feuchtigkeit bei Messung der Ultraschallgeschwindigkeit vernachlässigt werden kann.

Um die Theorie von Snethlage (2022) bzgl. des Einflusses der Änderung des E-Moduls bei Durchfeuchtung zu überprüfen, wurde zudem der dynamische E-Modul an trockenen und getränkten Proben gemessen. Zum Vergleich erfolgten hier auch Messungen an Probekörpern aus Carrara Marmor, bei dem im Rahmen anderer Studien Anstiege der Ultraschallgeschwindigkeit bei Durchfeuchtung gemessen worden sind (vgl. Abschnitt 3.1).

Die Tabellen 4 & 5 geben einen Überblick über die durchgeführten Messungen. Im folgenden Abschnitt werden Probekörperherstellung und Durchführung beschrieben und die Ergebnisse des Versuchs dargestellt.

Tabelle 4: Überblick über die durchgeführten Messungen für die Ermittlung des Wertebereiches der Ultraschallgeschwindigkeit zwischen trockenem und gesättigtem Zustand und der Änderungen im Laufe des Trocknungsprozesses.

Probekörper	Messung der Ultraschallgeschwindigkeiten	Zeitraum
<p><u>Komplett trocken und nach Durchfeuchtung:</u> Ummendorfer und Cottaer Sandstein, insgesamt 35 Probekörper, Durchmesser Ø 3 cm und Ø 5 cm, senkrecht und parallel zu Schichtung</p> <p><u>Trocknungsstufen:</u> Cottaer und Ummendorfer Sandstein, Durchmesser Ø 5 cm, je 2 senkrecht und 2 parallel zur Schichtung</p>	<p><u>Komplett trocken und nach Durchfeuchtung:</u> 3 Messpunkte entlang der Längsachse, 2 x 3 Messpunkte durch den Durchmesser (Achsen 90° zueinander)</p> <p><u>Trocknungsstufen:</u> je 3 Messpunkte entlang der Längsachse</p>	<p><u>Komplett trocken und nach Durchfeuchtung:</u> einmalig</p> <p><u>Trocknungsstufen:</u> täglich über die Dauer von 10 Tagen</p>

Tabelle 5: Überblick der durchgeführten Messungen für die Ermittlung des dynamischen E-Moduls in trockenem und getränktem Zustand.

Probekörper	Messung des dynamischen E-Moduls
<p>Cottaer und Ummendorfer Sandstein, Carrara Marmor, Ø 3 cm</p> <p>je 3 Probekörper parallel zu Schichtung</p>	<p>3 Messpunkte entlang der Längsachse, komplett trocken und nach Durchfeuchtung</p>

6.2.1 Probekörperherstellung und Durchführung

Als Probekörper zur Untersuchung der Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit dienen zylinderförmige Bohrkerne aus Cottaer und Ummendorfer Sandstein. Es werden zwei Größen an Probekörpern untersucht: kleine Bohrkerne mit einem Durchmesser von 3 cm und einer Länge von 9 cm und große Bohrkerne mit einem Durchmesser von 5 cm und einer Länge von 15 cm (vgl. Abb. 27). Um mögliche Unterschiede in Abhängigkeit der Schichtungsrichtung des Gesteins erfassen zu können, wurden Bohrkerne senkrecht und parallel zur Schichtung

entnommen. Die Herstellung der kleinen Probekörper erfolgte bereits im Rahmen des DBU-Projektes. Die Herstellung der großen Probekörper erfolgte durch die Autorin im Rahmen der Masterarbeit. Die Probekörper wurden jeweils aus den selben Blöcken aus Cottaer bzw. Ummendorfer Sandstein entnommen. Bei dem Block aus Cottaer Sandstein handelte es sich um bruchfrisches Material. Es kann davon ausgegangen werden, dass dessen Eigenschaften mit den Angaben der Sächsischen Sandsteinwerken vergleichbar sind (vgl. Abschnitt 4). Der Block aus Ummendorfer Sandstein stammt aus einem Bruch nordwestlich von Ummendorf (ehem. Fa. Gleussner Natursteinwerke), dem einzigen bergrechtlich aktiven Bruch in dem gegenwärtig noch Rhät-Sandsteine abgebaut werden.¹⁷⁵

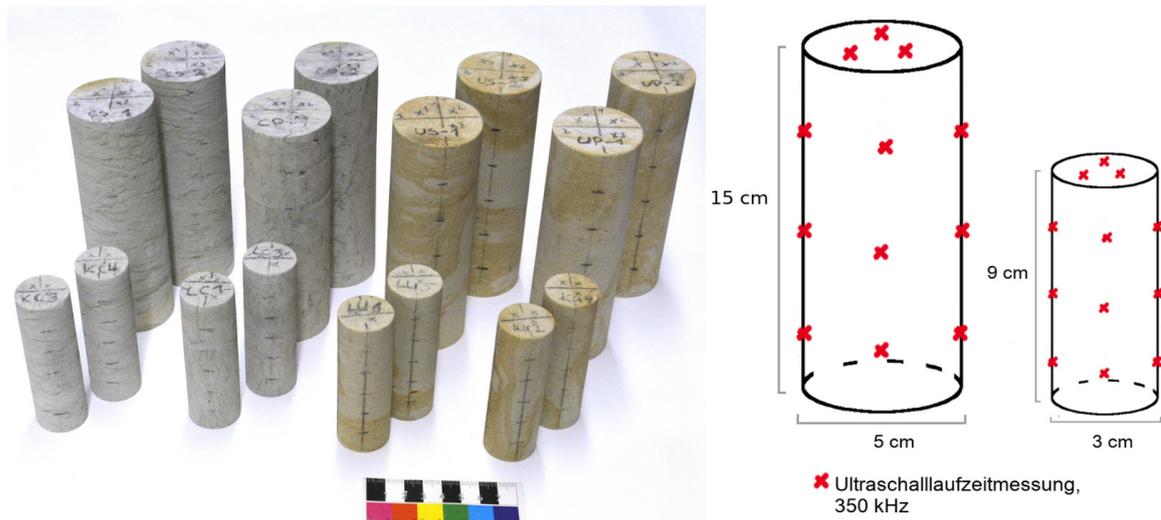


Abb. 27 links: kleine und große Probekörper senkrecht und parallel zur Schichtung entnommen. Cottaer (links) und Ummendorfer Sandstein (rechts).
rechts: Skizze der Messpunkte und Maße der kleinen und großen Probekörper.

Die Betrachtung der Grenzwerte von Ultraschallgeschwindigkeit und Wassergehalt erfolgte zunächst an allen im Projekt vorhandenen großen und kleinen Probekörpern (vgl. Tabelle 6). Die Messungen der kleinen Probekörper wurden im Rahmen des DBU-Projektes bei der Bestimmung der Wasseraufnahme durch die Studierenden Lale von Baudessin und Tamara Niedtner durchgeführt. Die Messungen an den großen Probekörpern wurden durch die Autorin vorgenommen. In Folge dessen sind bei den großen und kleinen Probekörpern leicht unterschiedliche Vorgehensweisen zu beachten.

¹⁷⁵ Schriftliche Mitteilung von R. Will, 18.01.23

Die großen Probekörper verblieben bis zur Gewichtskonstanz in einem Trockenschrank bei 40 °C, während die kleinen Probekörper bei 60° getrocknet wurden. Bei Erreichen der Gewichtskonstanz¹⁷⁶ wurden Trockengewicht und Ultraschallgeschwindigkeiten bestimmt.

Die Ultraschallgeschwindigkeiten wurden an jeweils drei Punkten auf zwei verschiedenen Achsen durch den Durchmesser der Probekörper sowie an drei Messpunkten entlang der Längsachse erhoben (siehe Abb. 27). Zur Durchfeuchtung wurden die großen Probekörper in Wasser gestellt, sodass die Feuchtigkeit kapillar über die Standfläche aufgenommen werden konnte. Sobald sich der nach oben steigende Feuchtehorizont an der Oberseite der Probekörper geschlossen hatte, wurde angenommen, dass das Wasser den Porenraum kapillar durchdrungen hat. Es wird erneut Gewicht und Ultraschallgeschwindigkeit bestimmt. Die Ultraschallmessung an den kleinen Probekörpern erfolgten im Rahmen der Bestimmung der Wasseraufnahme im DBU-Projekt nach 48 Stunden Unterwasserlagerung.

Um für die Betrachtung der Trocknung möglichst repräsentative Werte mit geringer Streuung zu erhalten, wurden aus den zuvor gemessenen Probekörpern je zwei pro Schichtungsrichtung und Gesteinsvarietät ausgewählt, deren Werte für die Ultraschallgeschwindigkeiten möglichst ähnlich und nah am Mittelwert lagen (vgl. Tabelle 6).

An den ausgewählten Probekörpern erfolgten Messungen von Gewicht und Ultraschallgeschwindigkeit über einen Zeitraum von 10 Tagen in einem zeitlichen Abstand von einem Tag. Die im Stein vorhandene Feuchtigkeit kann aus der Differenz zum Trockengewicht bestimmt werden. Die Ultraschallgeschwindigkeit wurde an drei Punkten entlang der Längsachse gemessen. In diesem Zeitraum blieben die Bohrkerne in einer Klimakammer mit konstanter Luftfeuchte und Temperatur von 19 °C und 69 % relativer Feuchte. Bei den selben klimatischen Bedingungen erfolgten auch die Messungen der Ultraschallgeschwindigkeit.

¹⁷⁶ Die Gewichtskonstanz gilt als erreicht, wenn die Differenz zwischen zwei im Abstand von 24 h durchgeführten Wägungen nicht mehr als 0,1 % der ersten der beiden Massen beträgt (DIN EN 14579, 2004, S. 6).

Detaillierte Aufnahmen des Aufbaus der Ultraschallmessung finden sich in Anhang C.1.

Die Messungen wurden mit einer Frequenz von 350 kHz und einer Abtastrate von 10 MHz durchgeführt. Da bei den getränkten Probekörpern, insbesondere bei den Proben aus Ummendorfer Sandstein, die Dämpfung der Ultraschallimpulse sehr groß war, musste die Amplitude von 50 mV auf 10 mV angepasst werden, um ein besseres Signal zu erhalten. Die Korrekturzeit wurde vor den Messungen an einem Kalibrierstab überprüft. Der Anpressdruck bei den Labormessungen wurde durch ein Stativ konstant gehalten (vgl. Abb. 1 in Anhang C.1).

Die durch DIN EN 14579¹⁷⁷ vorgegebenen Mindestmessstrecken wurden bei allen vorgenommenen Messungen eingehalten. Bei einer Prüffrequenz von 350 kHz, wie sie in der Arbeit genutzt wurde, ergibt sich bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 3,0 km/s eine Wellenlänge des Signals von 0,8 cm. Bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 2,5 km/s beträgt die Wellenlänge 0,7 cm. Die kürzeste Messdistanz betrug entlang des Durchmessers der kleinen Probekörper 3 cm.

Die Bestimmung des dynamischen E-Moduls erfolgte an je drei der parallel zur Schichtung ausgerichteten kleinen Probekörpern aus Cottaer und Ummendorfer Sandstein (vgl. Tabelle 6). Für die Vergleichsmessungen an Carrara Marmor wurden von Leon Wilke drei kleine Probekörper mit selber Geometrie aus Carrara Marmor hergestellt. Bei dem Material, aus dem die Probekörper entnommen wurden, handelte es sich um einen vom Marmorpalais Potsdam¹⁷⁸ ausgebauten Block Carrara Marmor, der freundlicherweise von der SPSG für Untersuchungen zur Verfügung gestellt wurde. Das Probegestein war mindestens bis zum Ausbau Ende der 1990er Jahre Verwitterung durch das Außenklima ausgesetzt und ist nicht vorbehandelt.¹⁷⁹ Die erste Messung der Proben erfolgte nach viertägiger Trocknung bei 60 °C nach Erreichen der Gewichtskonstanz. Eine weitere Messung der Proben aus Cottaer und Ummendorfer Sandstein wurde nach kapillarer Tränkung, wie oben beschrieben, durchgeführt. Da der Porenraum von

177 DIN EN 14579 (2004).

178 Erbaut 1787-97.

179 Schriftliche Mitteilung, R. Will, 11.01.2023.

Marmor wesentlich dichter ist als der von Sandstein, erfolgten die erneuten Messungen der Marmorproben erst nach 24-stündiger Unterwasserlagerung, um sicherzustellen, dass der Porenraum des Gesteins vollständig von Wasser durchdrungen war. Die Dehnwellenmessungen wurden von den Studierenden Leon Wilke und Marlene Boshold durchgeführt. Gemessen wurde mit einer Frequenz von 250 kHz an drei Messpunkten entlang der Längsachse eines jeden Probekörpers.

Tabelle 6: Übersicht der Probekörper für die Messungen an Trocknung und Tränkung, sowie für die Messungen im Laufe des Trocknungsprozesses. CS: Cottaer Sandstein, US: Ummendorfer Sandstein, M: Carrara Marmor.

Trocknung und Tränkung				
	Ø 3 cm		Ø 5cm	
	senkrecht	parallel	senkrecht	parallel
CS	5 Proben	5 Proben	4 Proben	3 Proben
US	5 Proben	5 Proben	5 Proben	3 Proben
	20 kleine Probekörper		15 große Probekörper	
	Insgesamt 35 Probekörper			
Trocknungsprozess				
	Ø 3 cm		Ø 5cm	
	senkrecht	parallel	senkrecht	parallel
CS	2 Proben	2 Proben	2 Proben	2 Proben
US	2 Proben	2 Proben	2 Proben	2 Proben
	8 kleine Probekörper		8 große Probekörper	
	Insgesamt 16 Probekörper			
Dynamischer E-Modul				
	Ø 3 cm, parallel			
CS	3 Proben			
US	3 Proben			
M	3 Proben			

6.2.2 Ergebnisse

Die Ultraschallmessungen nach der Tränkung erfolgten bei den kleinen Probekörpern aus Cottaer Sandstein bei einem Wassergehalt von 9 M.-%, bei den großen Probekörpern bei einem Wassergehalt von 6 M.-%. Die Abweichung resultiert aus den Unterschieden bei der Tränkung (vgl. Abschnitt 6.2.1). Bei Ummendorfer Sandstein war die kapillar aufgenommene Wassermenge der großen Probekörper mit 6,5 M.-% minimal größer als bei Cottaer Sandstein. Nach Lagerung im Wasserbad war auch hier der Wassergehalt der kleinen Probekörper mit 8,7 M.-% etwas höher als bei den großen Probekörpern (vgl. Abbildung 28). Der höhere w -Wert des Ummendorfer Sandsteins ließ sich gut an der deutlich größeren Sauggeschwindigkeit gegenüber Cottaer Sandstein beobachten.

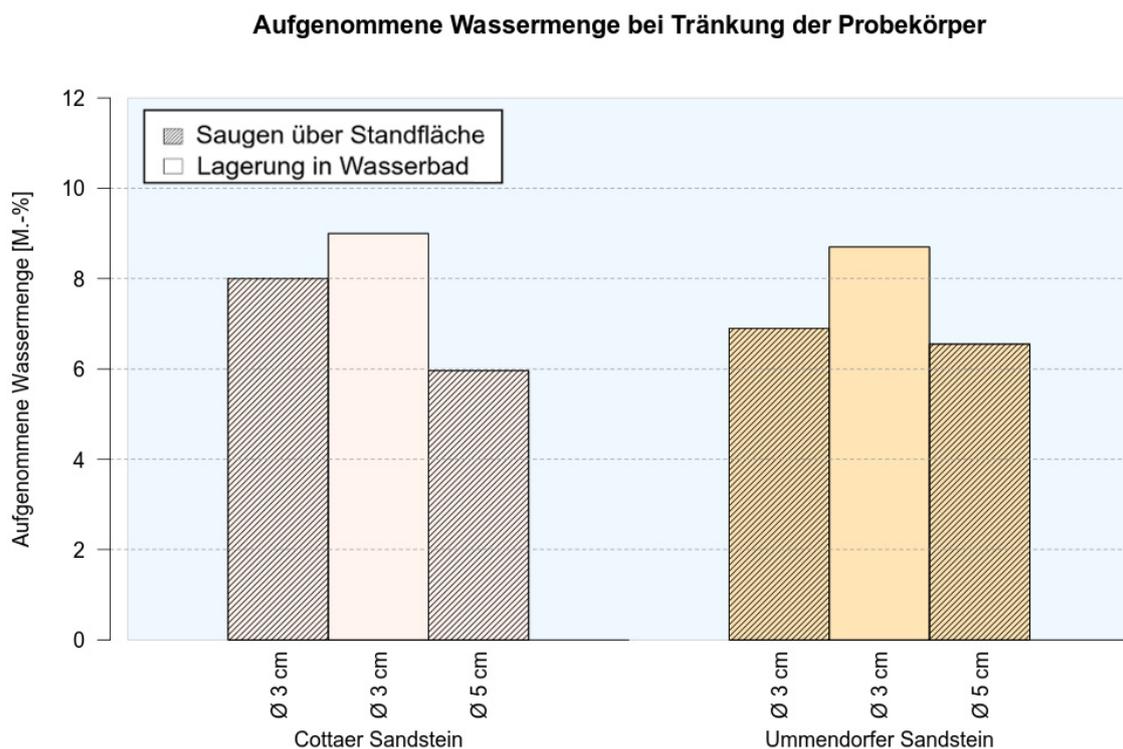


Abb. 28: Wassergehalt von kleinen und großen Probekörpern nach kapillarem Saugen über Standfläche und Wasserlagerung nach 48 Stunden.

Abbildung 29 zeigt die an trockenen und feuchten Probekörpern gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten im Vergleich. Die Mittelwerte wurden unter Berücksichtigung der Richtung der Gesteinsschichtung aus allen an kleinen bzw.

großen Bohrkernen ermittelten Werten gebildet. Zuvor wurden die Mittelwerte entlang der einzelnen Messachsen separat betrachtet (vgl. Tabelle 2 & 4 in Anhang C.2). Unter Berücksichtigung der Schichtungsrichtung des Gesteins gibt es keinen signifikanten Unterschied, ob die Messungen entlang des Durchmessers oder der Längsachse eines Probekörpers erfolgten. Daher konnten die Werte der verschiedenen Achsen zu einem Mittelwert zusammengefasst werden. Die Streubreiten der so gebildeten Mittelwerte sind nur minimal größer als bei separater Betrachtung der Messachsen (vgl. Tabelle 3 & 5 Anhang C.2). Lediglich die großen Probekörper aus Cottaer Sandstein weisen nach Zusammenfassung der Werte deutlich größere Streubreiten auf (vgl. Abb. 29).

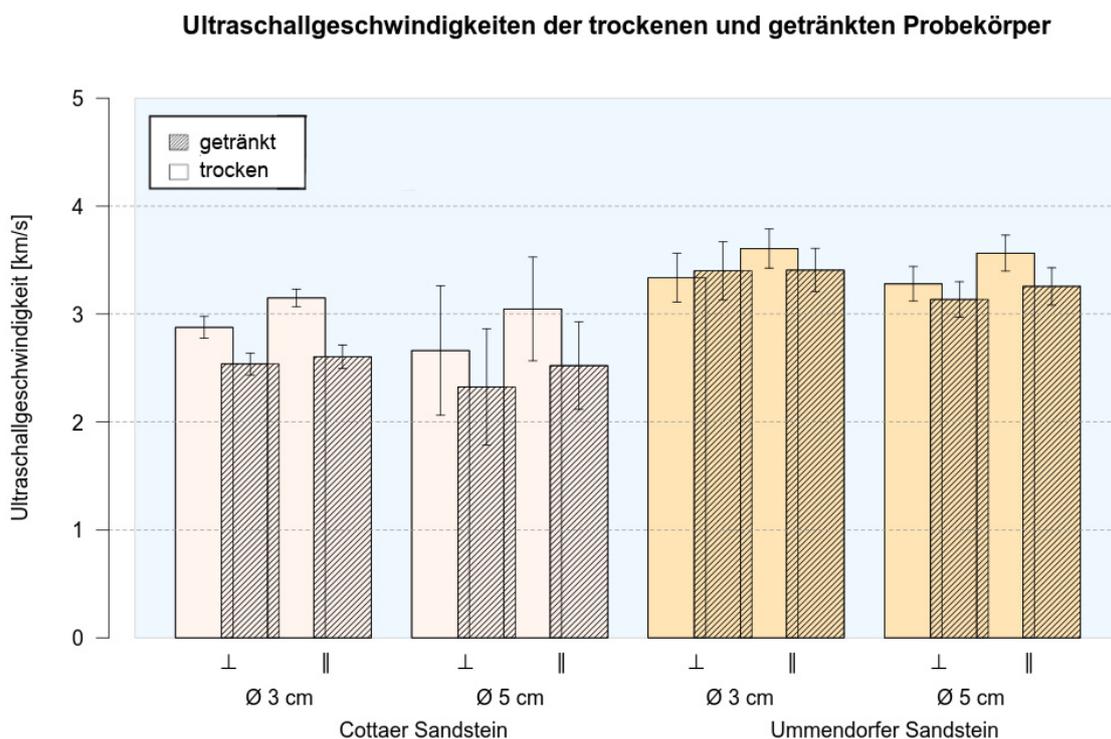


Abb. 29: Ultraschallgeschwindigkeiten von trockenen und getränkten Probekörpern. ⊥: senkrecht zur Schichtung, ||: parallel zur Schichtung.

Im trockenen Zustand wurden bei Cottaer Sandstein sowohl bei den kleinen als auch bei den großen Probekörpern parallel zur Schichtung jeweils höhere Werte für die Ultraschallgeschwindigkeit gemessen als senkrecht zur Schichtung, was sich gut mit den Beobachtungen in der Literatur deckt (vgl. Abschnitt 4.1). Die

trocken ermittelten Ultraschallgeschwindigkeiten liegen jedoch mit 2,7 bis 2,9 km/s senkrecht und 3,1 bis 3,2 km/s parallel zur Schichtung zumeist etwas über den in der Literatur angegebenen Werten. Die Proben aus Ummendorfer Sandstein weisen in trockenem Zustand mit 3,3 km/s senkrecht und 3,6 km/s parallel zur Schichtung grundsätzlich etwas höhere Ultraschallgeschwindigkeiten als die des Cottaer Sandsteins. Die Werte, die in trockenem Zustand an großen und kleinen Probekörpern gemessen wurden, stimmen innerhalb ihrer Streubreiten miteinander überein.

Bei Durchfeuchtung kommt es bei Cottaer Sandstein zu einem Absinken der Ultraschallgeschwindigkeiten. Auch wenn die Streubreiten bei den großen Probekörpern sehr groß ausfielen, ist auch hier ein Abfall in gleichem Maße zu beobachten. Nach der Durchfeuchtung ist kein signifikanter Schichtungsunterschied mehr vorhanden. Bei Ummendorfer Sandstein ist innerhalb der Streubreiten keine signifikante Änderung der Ultraschallgeschwindigkeiten zwischen trockenem und durchfeuchtetem Zustand erkennbar.

Um die gemessenen Änderungen näher zu quantifizieren, werden die Differenzen¹⁸⁰ der Ultraschallgeschwindigkeiten, die an feuchten und trocken Probekörpern an den einzelnen Messpunkten ermittelt wurden, betrachtet. Abbildung 30 zeigt die Verteilung der gemessenen Differenzen als Box-Whisker-Diagramm. In Tabelle 7 sind die Mittelwerte der feuchtebedingten Änderungen zusammengefasst.

Bei Cottaer Sandstein kommt es im Mittel zu einem Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit zwischen 0,4 km/s und 0,6 km/s, was einer Änderung von bis zu 19 % im Vergleich zum trockenen Zustand entspricht. Eine Schichtungsabhängigkeit ist nicht erkennbar. Die Streuung der Werte, angegeben durch den Variationskoeffizienten¹⁸¹, ist mit bis zu 27 % hoch. Innerhalb der Streubreiten kann kein signifikanter Unterschied festgestellt werden, ob die Proben im Wasserbad gelagert wurden oder durch Saugen über die Standfläche getränkt wurden.

180 Differenz der Ultraschallgeschwindigkeit v am Messpunkt i : $\Delta v_i = v_i(\text{durchfeuchtet}) - v_i(\text{trocken})$.

181 Variationskoeffizient = Standardabweichung/Mittelwert.

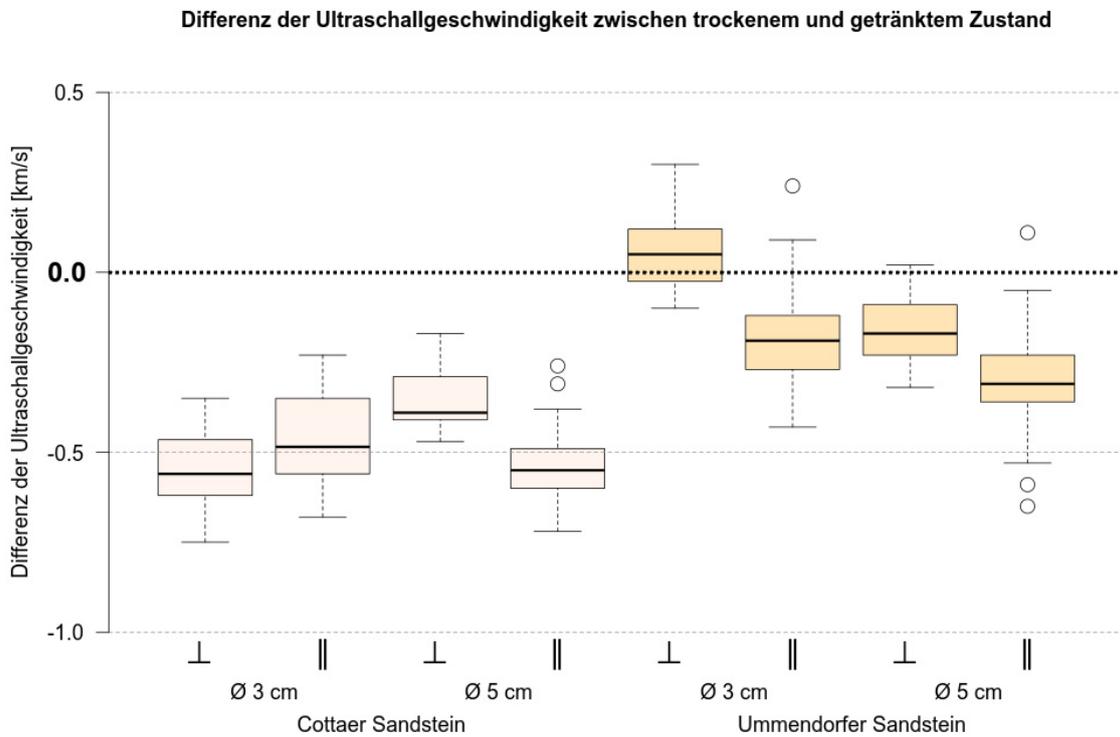


Abb. 30: Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit zwischen trockenem und getränktem Zustand.

Tabelle 7: Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit zwischen trockenem und durchfeuchtetem Zustand. Mittelwerte der an alle Messstrecken ermittelten Differenzen senkrecht (\perp) bzw. parallel (\parallel) zur Schichtung.

	Cottaer Sandstein		Ummendorfer Sandstein	
	Ø 3 cm	Ø 5cm	Ø 3 cm	Ø 5cm
Mittelwert [km/s] (Variationskoeffizient) \perp	-0,55 (20 %)	-0,36 (24 %)	0,06 (176 %)	-0,17 (53 %)
Prozentuale Änderung gegenüber trockenem Zustand	-19,1 %	-13,5 %	1,9 %	-5,2 %
Mittelwert [km/s] (Variationskoeffizient) \parallel	-0,46 (27 %)	-0,54 (18 %)	-0,19 (79 %)	-0,33 (36 %)
Prozentuale Änderung gegenüber trockenem Zustand	-14,6 %	-17,7 %	-5,3 %	-9,3 %

Bei Ummendorfer Sandstein ist mit Ausnahme der kleinen, senkrecht zur Schichtung entnommenen Probekörpern ebenfalls ein leichter Abfall zu beobachten. Bei beiden Größen ist dieser parallel zur Schichtung deutlicher ausgeprägt, bleibt aber mit bis zu 9 % eher gering. Die große Streuung der Werte bei Ummendorfer Sandsteins erklärt sich aus dem Umstand, dass die Mittelwerte sehr klein sind. Damit können auch kleine Absolutwerte der Standardabweichung im Verhältnis zu großen Unsicherheiten führen. In Abbildung 30 ist erkennbar, dass die gemessenen Differenzen der Ultraschallgeschwindigkeiten bei Ummendorfer Sandstein um die Nulllinie fluktuieren mit einem leichten Trend nach unten.

Der dynamische E-Modul fällt nach der Tränkung bei beiden Sandsteinen im Mittel um 40 % ab (vgl. Abb. 31 & Tabelle 7 in Anhang C.2). Noch größer ist der Abfall bei Carrara Marmor mit 57 %.

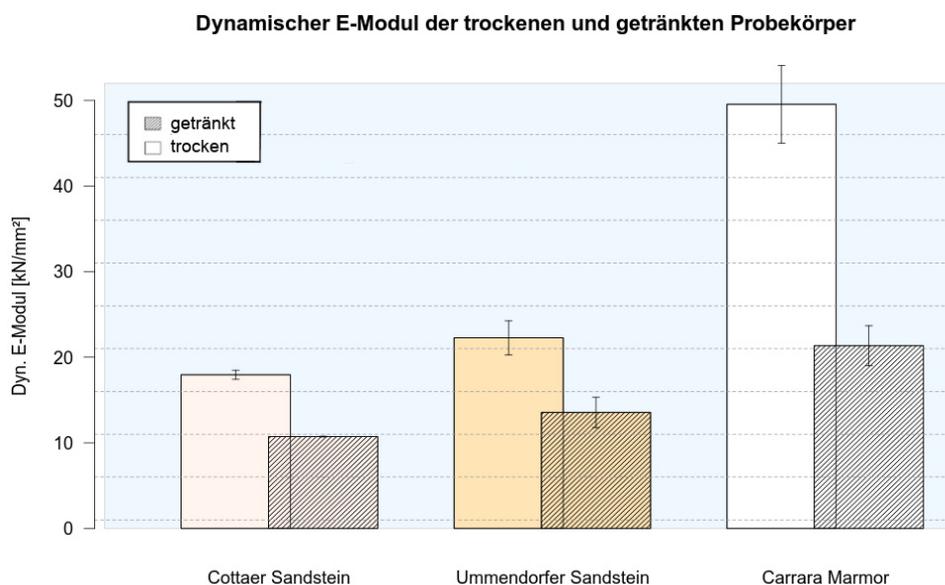


Abb. 31: Dynamischer E-Modul bei Proben aus Cottaer und Ummendorfer Sandstein, sowie Carrara Marmor in trockenem und getränktem Zustand.

Abbildung 32 zeigt die Änderung von Wassergehalt und Ultraschallgeschwindigkeit im Laufe des Trocknungsprozesses. Die Proben aus Cottaer Sandstein haben nach 6 Tagen den Wassergehalt der Gleichgewichtsfeuchte ihrer Umgebung erreicht, wobei der Abfall umso langsamer vonstatten geht, je näher sich der Wassergehalt der Gleichgewichtsfeuchte nähert.

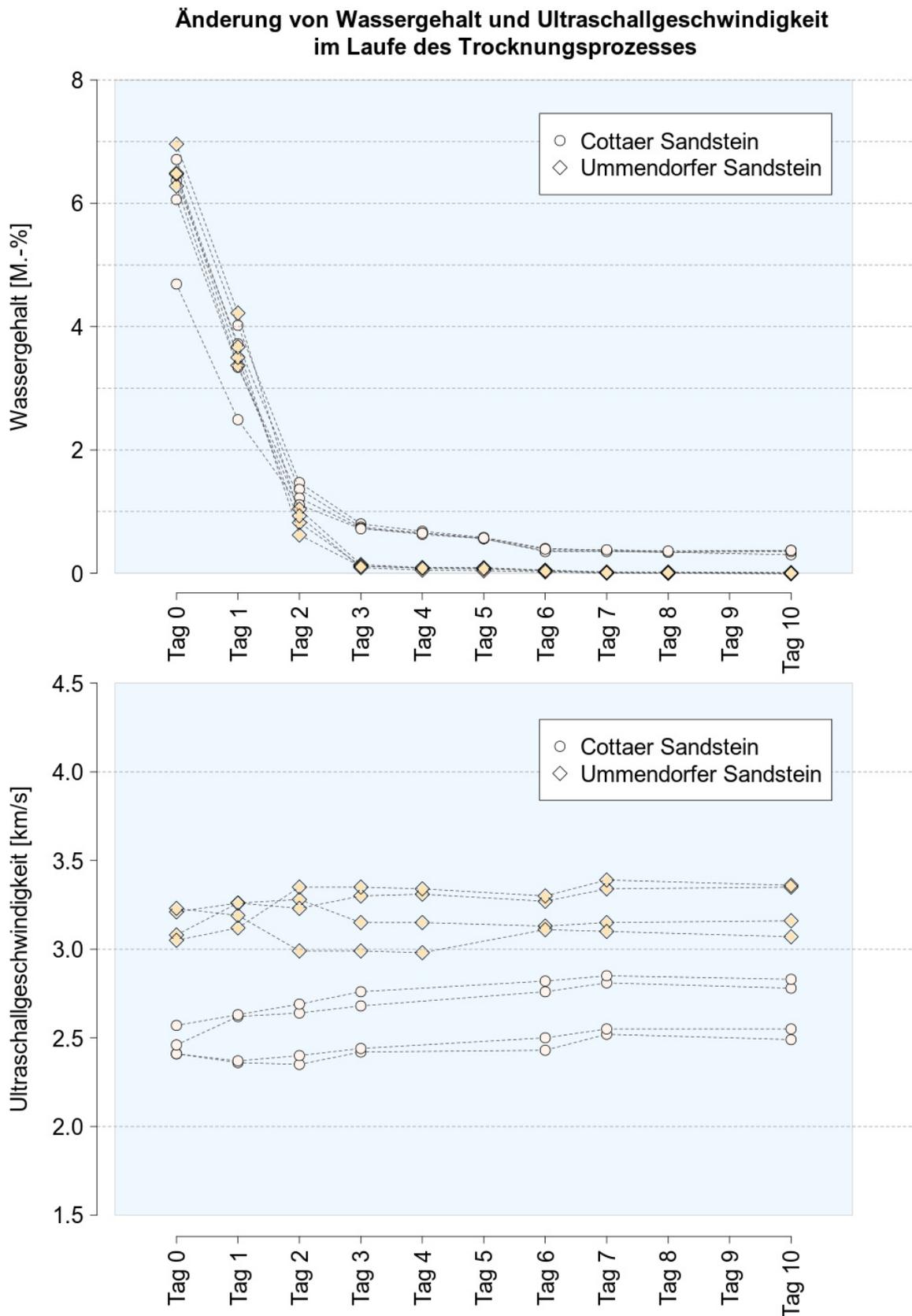


Abb. 32: Trocknung über einen Zeitraum von 10 Tagen. Ultraschallgeschwindigkeit und Wassergehalt.

Der Wassergehalt von Ummendorfer Sandstein ist bereits nach drei Tagen bei konstanter Luftfeuchtigkeit bei < 1 M.-% (vgl. Tabelle 8 in Anhang C.2). Die gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten des Ummendorfer Sandsteins sind im Laufe des Trocknungsprozesses Schwankungen unterworfen. Insgesamt lässt sich jedoch feststellen, dass der leichte, durchfeuchtungsbedingte Abfall durch einen Wiederanstieg bei Trocknung von Tag 1 zu Tag 3 ausgeglichen wird. Bei Cottaer Sandstein steigt die Ultraschallgeschwindigkeit im Laufe der Trocknung um bis zu $0,35$ km/s an. Der Anstieg ist etwas geringer, als der zuvor beobachtete Abfall, was sich unter Berücksichtigung, dass der Probekörper auf Luftfeuchte akklimatisiert und nicht wieder vollständig austrocknet, plausibel ist. Der Anstieg erfolgt annähernd linear bis Tag 7.

6.3 Konditionierung von Probekörpern in Exsikkatoren

Weiteren Aufschluss über die Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit und der dadurch im Gestein vorhandenen Feuchtigkeit sollen Messungen an in Exsikkatoren¹⁸² konditionierten Probekörpern bieten.

Tabelle 8 gibt einen Überblick über den Umfang der durchgeführten Messungen. Nach der Beschreibung von Versuchsaufbau und Durchführung werden die Ergebnisse der Messungen dargestellt.

Tabelle 8: Überblick über die durchgeführten Messungen bei Akklimatisierung der Probekörper in in den Exsikkatoren.

	Probekörper	Messpunkte der Ultraschallgeschwindigkeit	Zeitraum
Messung in Exsikkatoren	Insgesamt 16 Probekörper: 8 Ummendorfer Sandstein, 8 Cottaer Sandstein - je 4 mit 3 cm und 5 cm Durchmesser	3 Messungen entlang der Längsachse je Klimastufe Klimastufen: 10 %, 23 %, 53 %, 75 %, 84 % 100 % rF	<u>kleine Probekörper:</u> zwei Durchläufe aller Klimastufen (aufsteigend und absteigend), Messungen im Abstand von min. 3 Tagen

¹⁸² Exsikkatoren sind luftdicht abgeschlossenen Behälter, in denen über das Einfüllen von Salzlösungen kontrollierte Luftfeuchtigkeiten eingestellt werden können.

	- je 2 parallel zur Schichtung sowie 2 senkrecht zur Schichtung entnommen		<u>große Probekörper:</u> ein Durchlauf aller Klimastufen (aufsteigend und absteigend), Messungen im Abstand von min. 5 Tagen
--	---	--	--

6.3.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Konditionierung in Exsikkatoren erfolgte mit denselben Probekörpern, die auch für die Messung der Trocknungskurven ausgewählt wurden (vgl. Abschnitt 6.2.1). Hiervon wurden jeweils 2 Probekörper je Varietät und Durchmesser senkrecht und parallel zur Schichtung verwendet. Daraus ergaben sich Messungen an insgesamt 16 Probekörpern (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9: Überblick über die bei der Messung verwendeten Probekörper. CS: Cottaer Sandstein, Us: Ummendorfer Sandstein.

	Kleine Probekörper		Große Probekörper	
	senkrecht	parallel	senkrecht	parallel
CS	2 Proben	2 Proben	2 Proben	2 Proben
US	2 Proben	2 Proben	2 Proben	2 Proben
8 kleine Probekörper			8 große Probekörper	
Insgesamt 16 Probekörper				

Die Konditionierung der Probekörper erfolgte bei sechs verschiedenen Luftfeuchtigkeiten: 10 %, 23 %, 53 %, 75 %, 84 % und 100 %. Die verwendeten Salzlösungen zur Einstellung der Luftfeuchtigkeit waren: Kaliumacetat (23 %), Magnesiumnitrat (53 %), Natriumchlorid (75 %) und Kaliumchlorid (84 %). Eine Luftfeuchtigkeit von 10 % wurde durch die Verwendung von Silicagel erreicht, eine Sättigung mit 100 % relativer Feuchte durch Lagerung über einer Wasserfläche. Konditionierung und Messungen wurden in einer Klimakammer bei einer

Temperatur von 19 °C durchgeführt. Gemessen wurden wieder Ultraschallgeschwindigkeit und Gewicht der Probekörper. Aus der Differenz zum Trockengewicht wurde der in den Probekörpern vorhandene Wassergehalt errechnet. Die Messung von Gewicht und Ultraschallgeschwindigkeit erfolgte wie in Abschnitt 6.2.1 beschrieben. Die verwendete Messfrequenz betrug 350 kHz. Der Anpressdruck wurde durch ein verwendetes Stativ konstant gehalten (vgl. Abbildung 1 in Anhang C.1). Gemessen wurden je Probekörper immer drei vorher gekennzeichnete Messpunkte (vgl. Abbildung 27), so dass die Messungen immer an der selben Stelle erfolgten. Die Messungen wurden durch die Autorin und die Studierenden Tamara Niedtner, Marlene Boshold und Leon Wilke durchgeführt, wobei der Hauptanteil bei den Studierenden lag.¹⁸³

Das Messintervall, das durch die Zeit vorgegeben ist, welche der jeweilige Probekörper braucht, um sich im jeweiligen Klima zu akklimatisieren und die Gleichgewichtsfeuchte anzunehmen, wurde in Vorversuchen bestimmt. Hierzu wurde ein kleiner Probekörper aus Cottaer Sandstein (3 cm Durchmesser) im Klimaschrank auf alle im späteren Versuch gewünschten Luftfeuchtigkeiten akklimatisiert (vgl. Abb. 33).¹⁸⁴ Zu erkennen war, dass der Probekörper jeweils einen Tag brauchte, um die Gleichgewichtsfeuchte von einer Klimastufe zur nächsten anzunehmen. Der Klimaschrank stand für weitere Messungen nicht zur Verfügung, weswegen sich für die Konditionierung in Exsikkatoren entschieden wurde.

In den Exsikkatoren stellt sich die gewünschte Luftfeuchtigkeit erst nach und nach durch Abgabe bzw. Aufnahme von Feuchtigkeit durch den Probekörper und durch die Salzlösungen ein. Es muss daher im Vergleich zum Klimaschrank eine verlängerte Dauer der Akklimatisierung angenommen werden. Zwischen den Messungen verschiedener Klimastufen wurde aus diesem Grund ein verlängertes Intervall von mindestens drei Tagen gewählt. Zwei große Probekörper wurden in einem Exsikkator von 50 % auf 74 % relative Feuchte akklimatisiert. Hier zeigte sich, dass die gewünschte Gleichgewichtsfeuchte nach drei Tagen erreicht war (vgl. Abb. 34). Das Intervall zwischen zwei Messungen der großen Probekörper

¹⁸³ Die Durchführung der Einzelmessung ist Anhang C.3 zu entnehmen.

¹⁸⁴ Der Vorversuch wurde durchgeführt von Dipl.-Ing. Andreas Schultz (M.Sc.).

verschiedener Luftfeuchtigkeiten wurde daraufhin auf 5 Tage festgelegt. Die Luftfeuchtigkeit in den Exsikkatoren wurde während der Versuche mit Hygrometern¹⁸⁵ überwacht.

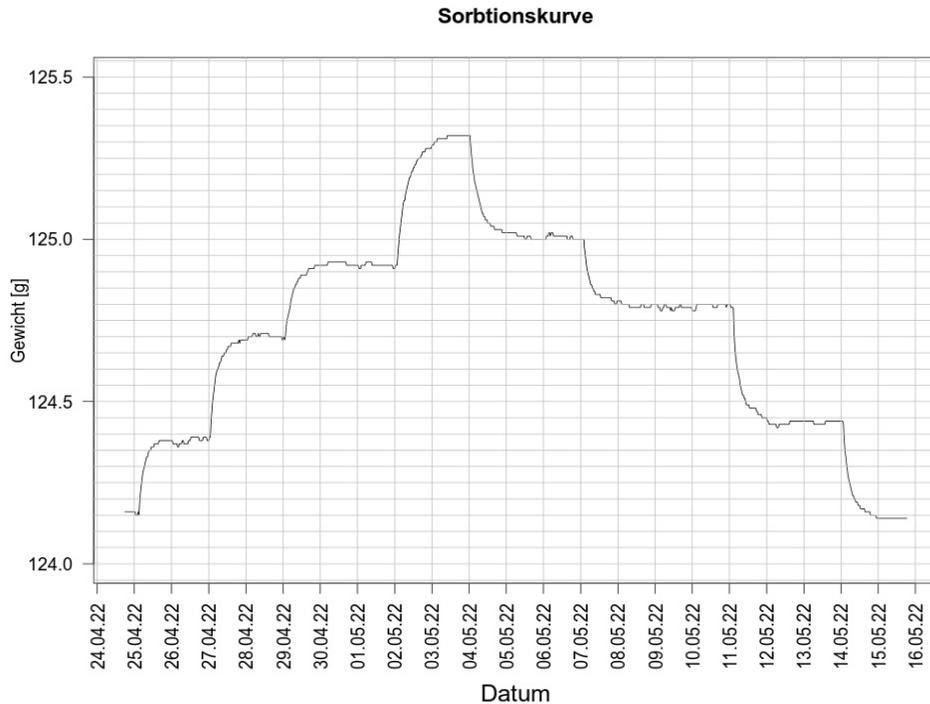


Abb. 33: Vorversuch zur Akklimatisierung der kleinen Probekörper aus Cottaer Sandstein durchgeführt von Dipl.-Ing. A. Schultz (M.Sc.). Klimastufen: (10 %, 23 %, 53 %, 75 %, 84 %, 100 % rF)

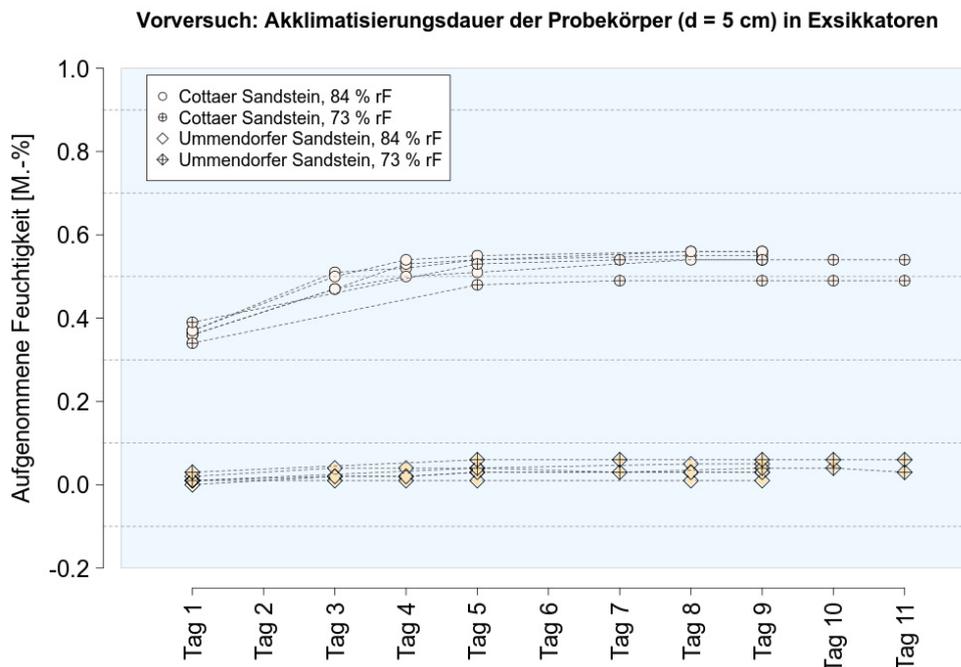


Abb. 34: Vorversuch zur Akklimatisierungsdauer der Probekörper. Die Probekörper befanden sich zuvor in einer Klimakammer bei 50 % relativer Feuchte.

185 Gerätebezeichnung siehe Anhang C.2.

Es stellte sich heraus, dass die gewünschten Klimastufen nicht immer genau erreicht werden konnten. Die Luftfeuchtigkeit in den Exsikkatoren stellt sich, wie oben beschrieben, nach und nach durch Austausch zwischen Salzlösung, Luft und Gesteinsfeuchte ein und ist damit anfälliger für Schwankungen, als ein Klimaschrank. Aufgrund der Erfahrungen aus den Vorversuchen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Gleichgewichtsfeuchte in den Gesteinen nach mehrtägigem Warten in etwa den von den Hygrometern angezeigten Luftfeuchtigkeiten entsprach.

Da die Adsorption und Desorption einer Hystereseurve folgt (vgl. Abschnitt 2.1), wurde die Akklimatisierung über aufsteigende und absteigende Luftfeuchtigkeiten untersucht. Um mögliche Schwankungen bei der Akklimatisierung zu erfassen, erfolgten bei den Klimastufen 23 %, 53 % und 84 % Messungen an je drei aufeinander folgenden Tagen. Die kleinen Probekörper konnten aufgrund der kürzeren Akklimatisierungszeit zweimal alle Luftfeuchten auf- und absteigend durchlaufen. Bei den großen Probekörpern erfolgte ein Durchlauf.

Um zusätzlich den Einfluss einer längeren Akklimatisierungszeit zu überprüfen und damit einen Maximalwert für den durch Sorption aufgenommenen Wassergehalt zu erreichen, wurden die Probekörper einmal für zwei Wochen im Exsikkator mit der höchsten Luftfeuchtigkeit belassen.

6.3.2 Ergebnisse

Betrachtet man zunächst die Schwankungen bei den Messungen an drei verschiedenen Tagen innerhalb der selben Akklimatisierungsstufen bei 23 %, 53 % und 84 % (vgl. Anhang C.3 Tabelle 10, 11 & 12), stellt man fest, dass diese sehr gering ausfallen. Auch wenn es zu Schwankungen der Luftfeuchtigkeiten in den Exsikkatoren von bis zu 11 % kam, liegen die gemessenen Gewichtsschwankungen und die damit verbundene Schwankungen der von den Probekörpern aufgenommenen Feuchtigkeit bei 0,1 bis 0,3 M.-%. Die daraus resultierenden Abweichungen bei den Ultraschallgeschwindigkeiten betragen bei einem Großteil der Messungen unter 3 %. Bei vier Ausnahmen erreichen die Schwankungsbreiten zwischen den drei Wiederholungsmessungen Werte von bis

zu 4 % und sind damit immer noch sehr gering. Oftmals liegen die Abweichungen der Ultraschallgeschwindigkeiten sogar bei unter 1 %.

Weiter kann bei der Akklimatisierung der Probekörper auf verschiedene Luftfechtigkeiten beobachtet werden, dass die Aufnahme von Feuchtigkeit über Sorption bei Ummendorfer Sandstein im Vergleich zu Cottaer Sandstein sehr gering ausfällt (vgl. Abb. 35 & 36). Mit steigender Luftfeuchte kommt es bei Cottaer Sandstein bei beiden Probekörpergrößen zu einem kontinuierlichen Anstieg des Wassergehalts auf bis zu 1,0 M.-% bei den kleinen Probekörpern und 0,9 M.-% bei den großen Probekörpern. Der Maximalwert der aufgenommenen Feuchtigkeit liegt bei den kleinen Probekörpern nach einer Akklimatisierung von 14 Tagen bei 99 % relativer Feuchte. Cottaer Sandstein erreicht hier einen Wassergehalt von 1,2 M.-%, der damit etwas höher ist als nach 5 Tagen. Bei den großen Probekörpern lässt sich eine Hystereseurve bei wieder Absinken der Luftfeuchte erkennen (vgl. Abb. 36), bei den kleinen Probekörpern ist diese weniger ausgeprägt (vgl. Abb. 35). Ummendorfer Sandstein erreicht einen maximal aufgenommenen Wassergehalt von 0,1 M.-%. Auch bei 14-tägiger Lagerung bei 99 % steigt dieser nicht weiter an.

Die Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeiten ähneln den Ergebnissen, die sich bereits im Rahmen des Versuchs der Durchfeuchtung und Trocknung gezeigt haben. Bei Ummendorfer Sandstein ist der Trend eines leichten Abfalls mit 4 bis 8 % vorhanden (vgl. Abb. 35 & 36 und Tabelle 10). Bei den Absolutbeträgen der Ultraschallgeschwindigkeit ist ein Unterschied zwischen den Schichtungsrichtungen der Proben deutlich erkennbar. Bezüglich der Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeit bei Anstieg des Wassergehalts kann innerhalb der Schwankungsbreiten ein Unterschied der Schichtungsrichtungen nicht als signifikant herausgearbeitet werden. Bei Cottaer Sandstein kommt es bei steigender Luftfeuchte zu einer stärkeren Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeit als bei Ummendorfer Sandstein. Die gemessenen Abnahmen im Vergleich zum trockenen Zustand ähneln sich bei beiden Probekörpergrößen unabhängig von der Schichtungsrichtung des Gesteins und liegen zwischen 16 und 18 %. Auch wenn nach 14-tägiger Lagerung bei 99 % relativer Feuchte der

Wassergehalt nochmals angestiegen ist, ist hier kein weiterer Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit zu erkennen. Der bei Cottaer Sandstein vorhandene Abfall liegt allerdings noch unterhalb der bei Wassersättigung gemessenen Werte (vgl. Abb 35).

Tabelle 10: Durchschnittliche Änderung der Ultraschallgeschwindigkeiten: Von trockenem Zustand zu Akklimatisierung bei 10 % und 100 % rF und vom Akklimatisierung bei 99 %rF zu wassergesättigtem Zustand.

		Durchschnittliche Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeiten					
		Trocken zu 10 % rF ¹⁸⁶		Trocken zu 100 % rF ¹⁸⁷		100 % rF ¹⁸⁷ zu gesättigt	
		[km/s]	[%]	[km/s]	[%]	[km/s]	[%]
Cottaer Sandstein ⊥	Ø 3 cm	-0,04	- 2 %	-0,47	- 17 %	0,10	4 %
	Ø 5 cm	-0,13	- 4 %	-0,50	- 18 %	0,07	2 %
Cottaer Sandstein 	Ø 3 cm	-0,04	- 1 %	-0,49	- 16 %	-0,11	- 4 %
	Ø 5 cm	-0,13	- 4 %	-0,50	-16 %	-0,08	- 2 %
Ummendorfer Sandstein ⊥	Ø 3 cm	-0,14	- 4 %	-0,21	- 7 %	0,04	1 %
	Ø 5cm	-0,03	- 1 %	-0,25	- 8 %	0,26	8 %
Ummendorfer Sandstein 	Ø 3 cm	-0,03	- 1 %	-0,17	- 5 %	0,10	3 %
	Ø 5cm	-0,05	- 1 %	-0,15	- 4 %	-0,18	- 5 %

Bei der Änderung des Wassergehalts ist bei den großen Probekörpern aus Cottaer Sandstein ein minimaler Unterschied zwischen aufsteigendem und abfallendem Ast zu erkennen (vgl. Abb. 36). Für den Einfluss auf die Ultraschallgeschwindigkeit bleibt dieser Umstand aber unbedeutend. Auch der Unterschied zwischen erstem und zweitem Durchlauf der Probekörper über die verschiedenen Klimastufen bleibt bei beiden gemessenen Parametern innerhalb der Schwankungsbreite der Werte.

186 10 % relative Feuchte bezieht sich auf die Soll-Feuchte im Exsikkator. Bei den großen Probekörpern betrug die niedrigste erreichte relative Feuchte 16 %.

187 Auch hier sind 100 % relative Feuchte die Soll-Feuchte. Bei den kleine Probekörpern wurden 99 %, bei den großen 93 % rF erreicht.

Zwischen höchster Akklimatisierungs-Luftfeuchte und wassergesättigtem Zustand kommt es bei Cottaer Sandstein sowohl zu Abnahmen, als auch zu Zunahmen der Ultraschallgeschwindigkeiten, die bei bis zu 4 % liegen. Bei Ummendorfer Sandstein liegen die von 99 bzw. 93 % relative Feuchte zu wassergesättigtem Zustand gemessenen Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeiten zwischen -5 und +8 % (vgl. Tabelle 10).

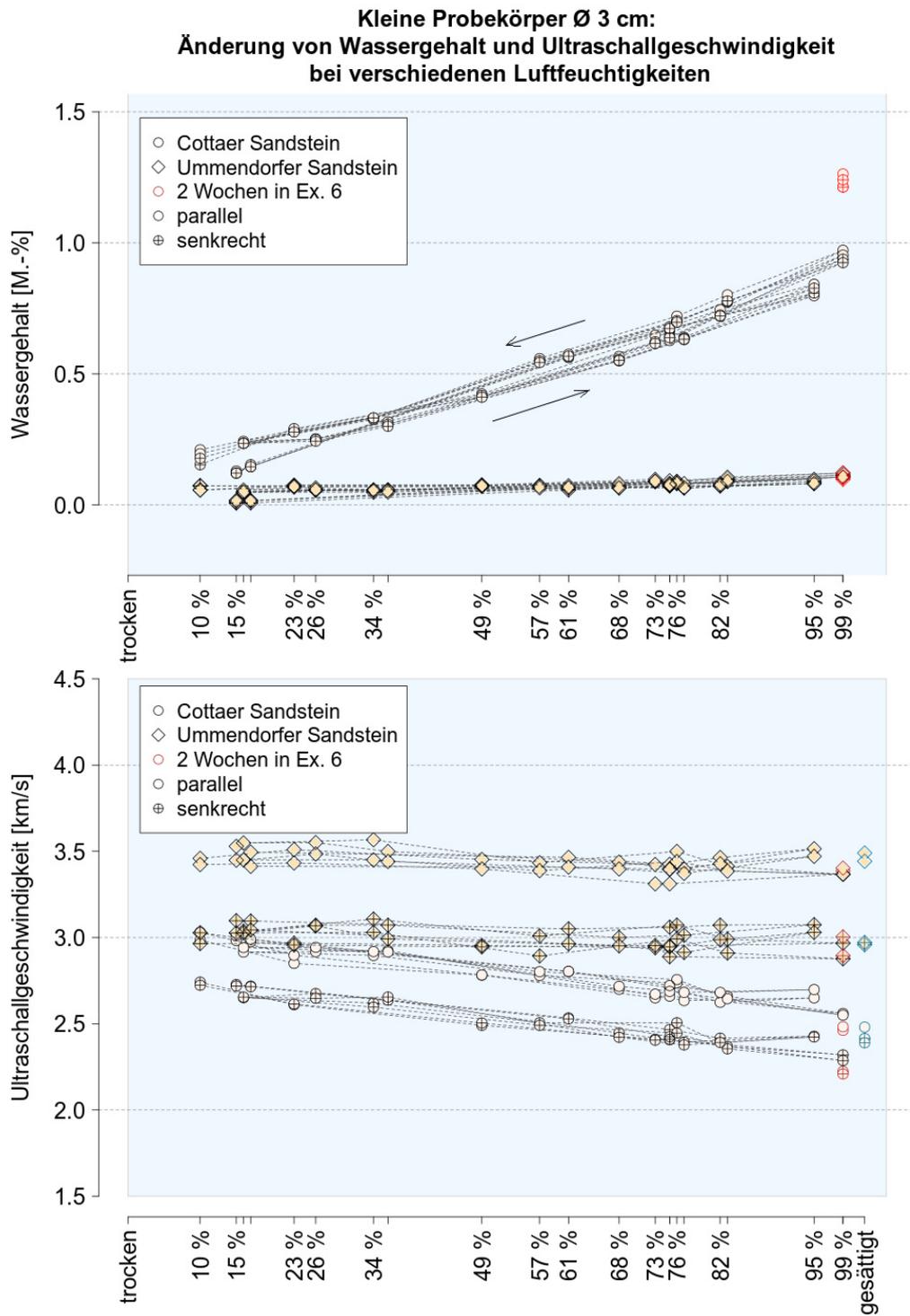


Abb. 35: Kleine Probekörper: Änderung von Wassergehalt und Ultraschallgeschwindigkeit bei Akklimatisierung auf verschiedene Luftfeuchten.

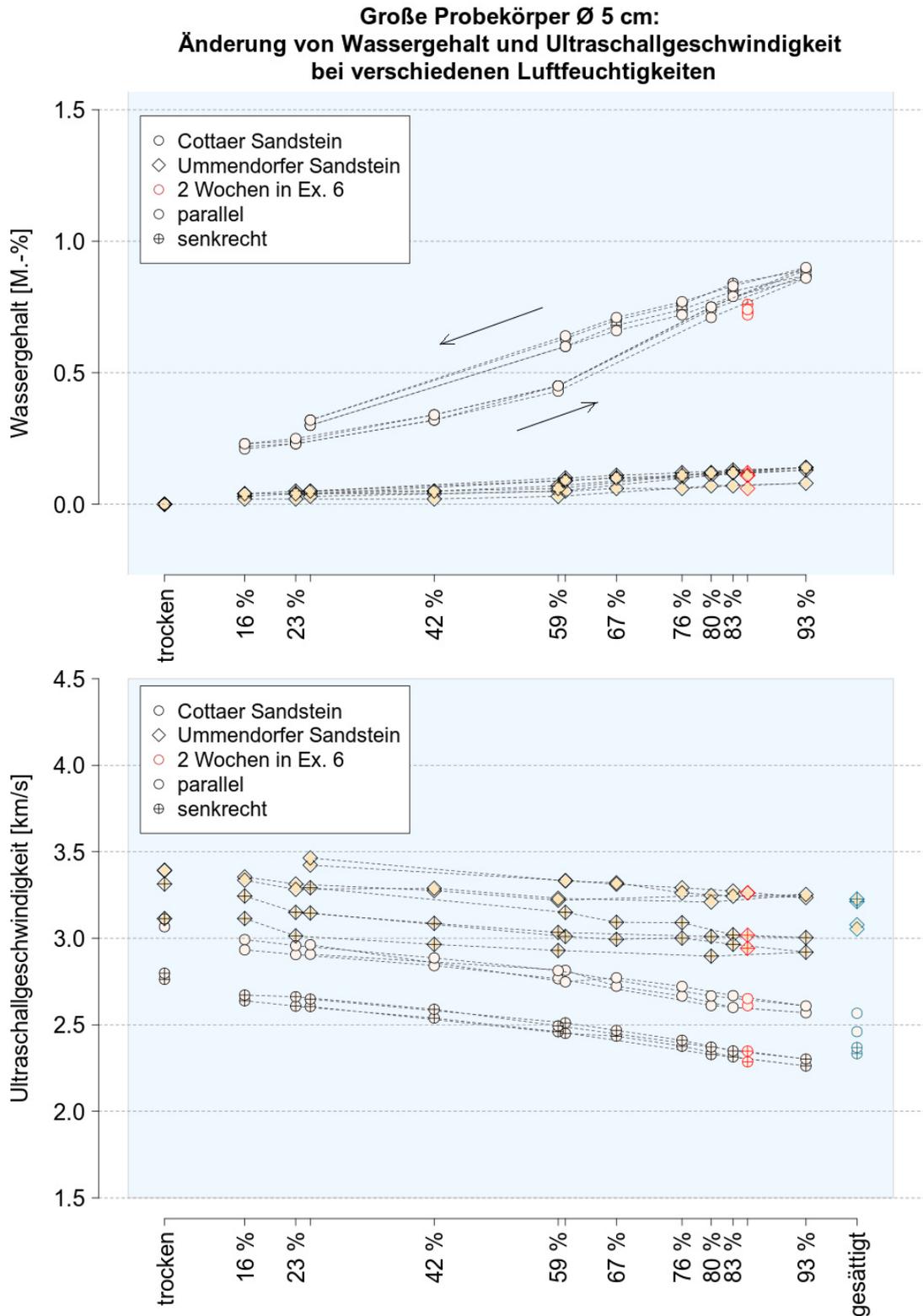


Abb. 36: Große Probekörper: Änderung von Wassergehalt und Ultraschallgeschwindigkeit bei Akklimatisierung auf verschiedene Luftfeuchten

6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Versuche haben gezeigt, dass der im Gestein vorhandene Wassergehalt einen deutlichen Einfluss auf die Ultraschallgeschwindigkeit hat. Die beiden untersuchten Sandsteine zeigen dabei ein sehr unterschiedliches Verhalten.

Die Mediane der Ultraschallgeschwindigkeiten der Referenzmessungen an den Skulpturen des Neuen Palais liegen bei beiden Varietäten in einem Bereich zwischen 2,7 und 3,1 km/s (vgl. Tabelle 3). In den meisten Fällen kommt es bei den Herbst- und Wintermessungen zu einem Abfall der Ultraschallgeschwindigkeiten. Dieser ist, anders als nach den Laborversuchen zu erwarten, bei den Skulpturen aus Ummendorfer Sandstein wesentlich deutlicher ausgeprägt, als bei denen aus Cottaer Sandstein (vgl. Abb. 24). Bei Ummendorfer Sandstein liegen die Abnahmen im Winter mit 0,75 km/s bei bis zu 27 % (vgl. HD3 in Tabelle 3). Die Änderungen zwischen Sommer- und Frühlingsmessung sind bei beiden Gesteinen weniger signifikant.

Bei der Auswertung der Ultraschalllaufzeitmessungen fällt vor allem auf, dass die auftretenden Streuungen gesteinspezifisch sehr unterschiedlich sind (vgl. Abb. 24). Bei den Skulpturen aus Ummendorfer Sandstein kommt es bei der Untersuchung zum Teil zu Streubreiten von über 20 % (vgl. Abb. 24 & Tabelle 3). Bei Cottaer Sandstein sind die auftretenden Streuungen hingegen eher gering (vgl. Abb. 24 & Tabelle 3). Bei Messdistanzen über 40 cm treten vor allem bei Ummendorfer Sandstein vermehrt deutliche Ausreißern nach unten auf. Vereinzelt Ausreißer nach oben sind bei Messdistanzen ≤ 10 cm zu beobachten (vgl. Anhang Abb. B.4).

Unabhängig von diesen Ausreißern kommt es bei Herbst- und Wintermessungen auch bei kleinen Messdistanzen vermehrt zu Abweichungen der Ultraschallgeschwindigkeiten nach unten (vgl. Abb. 25). Die größten Abweichungen liegen auch hier bei Skulpturen aus Ummendorfer Sandstein vor. Zudem sind hier die an den einzelnen Messpunkten auftretenden Änderungen zwischen den Jahreszeiten sehr unterschiedlich (vgl. Streubreiten Skulptur HD21, HD3 & HD8b in Abb. 26). Bei Vergleich der Doppelfiguren HD8a und HD8b, die

die selbe Exposition aufweisen aber aus unterschiedlichen Gesteinen gefertigt wurden, bestätigen sich die deutlich größer ausfallenden Streubreiten und der stärkere Abfall der Mediane in Herbst und Winter bei Ummendorfer Sandstein (vgl. Abb. 24).

Die Ergebnisse und die Beobachtungen während der Messungen deuten darauf hin, dass es bei Ummendorfer Sandstein einen Einfluss der Feuchtigkeit auf die Signaldämpfung gibt, der zu Ablesefehlern und zu tendenzieller Unterschätzung der Ultraschallgeschwindigkeit führt.

Bei den Laborversuchen liegt der nach Tränkung¹⁸⁸ erreichte Wassergehalt bei den kleinen Probekörpern bei 9 % und bei den großen Probekörpern bei 6 bis 7 % (vgl. Abb. 28). Ein signifikanter Unterschied zwischen den Varietäten besteht nicht. In trockenem Zustand weisen die Proben aus Ummendorfer Sandstein mit 3,3 km/s senkrecht zur Schichtung und 3,6 km/s parallel zur Schichtung höhere Ultraschallgeschwindigkeiten auf als die Proben aus Cottaer Sandstein, die bei 2,7 bis 2,9 km/s senkrecht und 3,1 bis 3,2 km/s parallel zur Schichtung liegen (vgl. Abb. 29).

Bei Tränkung kommt es bei Cottaer Sandstein zu einer Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeit zwischen 0,36 km/s und 0,55 km/s, was einer Abnahme von bis zu 19 % entspricht. Bei Ummendorfer Sandstein ist der Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit bei Tränkung mit bis zu 9 % geringer und zum Teil nicht signifikant unter Berücksichtigung der vorhandenen Schwankungsbreiten der Werte (vgl. Abb. 30 und Tabelle 7). Nach Ende der Tränkung haben die großen Probekörper aus Ummendorfer Sandstein nach 3 Tagen bereits ihr Trockengewicht annähernd erreicht (vgl. Abb. 32). Bei Cottaer Sandstein ist die Trocknung mit 6 Tagen deutlich langsamer. Bis zum siebten Tag der Trocknung ist bei Cottaer Sandstein ein Anstieg der Ultraschallgeschwindigkeit sichtbar, der etwas geringer ausfällt, als der zuvor beobachtete Abfall.

Die Schwankungen der Ultraschallgeschwindigkeiten bei drei Wiederholungsmessungen innerhalb der selben Akklimatisierungsstufe sind mit großteils deutlich

188 Volltränkung für 48 Stunden bei den kleinen Probekörpern, kapillares Saugen bei den großen Probekörpern (vgl. Abschnitt 6.2.1).

unter 3 % sehr gering (vgl. Tabelle 10,11 & 12 in Anhang C.3). Ummendorfer Sandstein nimmt mit bis zu 0,1 M.-% nur wenig Feuchtigkeit über Sorption auf, Cottaer Sandstein mit bis zu 1,2 M.-% deutlich mehr (vgl. Abb. 35 & 36). Der Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit bei Anstieg der Umgebungsfeuchte bis zu 99 % deckt sich in etwa mit den zuvor gemessenen Werten bei totaler Durchfeuchtung. Bei Ummendorfer Sandstein ist nur ein leichter Trend nach unten mit bis zu 8 % Abnahme zu beobachten. Bei Cottaer Sandstein liegt die Abnahme zwischen 16 und 18 % (vgl. Tabelle 10).

6.5 Fehlerbetrachtung

Im folgenden Kapitel erfolgt die Betrachtung möglicher Fehlerquellen der Messungen. Die möglichen Einflussfaktoren auf die in situ Messungen an Skulpturen des Neuen Palais sind dabei wesentlich umfangreicher als die der Labormessungen. Da die Messungen der Skulpturen zum Teil an unterschiedlichen Tagen erfolgten, wird zunächst geprüft, ob es aufgrund von leicht unterschiedlichen klimatischen Bedingungen zu Abweichungen der Ergebnisse kommen könnte. Dann werden weitere Faktoren betrachtet. Die Einflussfaktoren von den Versuchen zur Durchfeuchtung und Tränkung sowie der Akklimatisierung in Exsikkatoren werden in einem Abschnitt unter „Fehlerquellen der Labormessungen“ zusammengefasst.

6.5.1 Fehlerquellen der in situ Messungen

Die Referenzmessungen im Sommer 2019 erfolgten an vier verschiedenen Tagen. Einen Unterschied der Ergebnisse in Abhängigkeit der Messtage und damit verbundenen klimatischen Unterschieden kann nicht festgestellt werden (vgl. Abb 24 und Tabelle 3). Die Messung an F26 wurde als erstes durchgeführt und wäre am ehesten einem Feuchteinfluss durch mittelstarken Niederschlag 3 Tage vor der Messung unterworfen (vgl. Tabelle 2 in Anhang B.3). Der Niederschlag hat jedoch im Vergleich mit den anderen Skulpturen aus Cottaer Sandstein weder Einfluss auf den Median noch auf die Streubreite der Werte. Es

kann daher 3 Tage nach dem Niederschlag hier von einer Abtrocknung und damit keiner Einflussnahme ausgegangen werden. Auch im Frühling 2020 und Winter 2022 sind keine Unterschiede in Median oder Streubreiten in Abhängigkeit von den Messtagen feststellbar. Die Messungen im Herbst und Winter 2020 wurden jeweils an einem einzigen Tag durchgeführt.

Auffällig an den Messergebnissen der Skulpturen des Neuen Palais ist, dass die Abweichungen der Messwerte vom Median bei den Skulpturen aus Ummendorfer Sandstein deutlich größer ausfallen als bei jenen aus Cottaer Sandstein (vgl. Abb. 24 und Tabelle 3). Bei Cottaer Sandstein liegen sie in allen Fällen unter 10 % in vielen sogar bei ≤ 5 %. In Anbetracht der Tatsache, dass die Schichtungsrichtung des Gesteins bei den Messungen nicht berücksichtigt wurde und von dieser ein Anisotropieunterschied zu erwarten ist (vgl. Abschnitt 4.1), können die Schwankungen bei den Skulpturen aus Cottaer Sandstein als gering angesehen werden. Die Messrichtungen verlaufen bei allen Skulpturen überwiegend horizontal, was Grund für den bei Cottaer Sandstein beobachteten geringen Einfluss der Anisotropie auf die Streuung der Messwerte sein sollte (vgl. Dokumentation der Messpunkte in Anhang B.2). Die Anisotropie bei Ummendorfer Sandstein ist nicht wesentlich größer ausgeprägt als bei Cottaer Sandstein (vgl. hierzu die Ergebnisse in Abschnitt 6.2.2), weshalb hier kein Grund für die auftretenden großen Streuungen der Werte liegen kann. Bei den untersuchten Skulpturen aus Ummendorfer Sandstein HD21, HD3 und HD8b liegen die Schwankungsbreiten in vielen Fällen bei über 10 %, in Einzelfällen sogar bei über 20 %.

Von den Personen, die die Messungen durchgeführt hatten, wurde berichtet, dass die Signaldämpfung bei den Skulpturen aus Ummendorfer Sandstein im allgemeinen größer war, als bei den Skulpturen aus Cottaer Sandstein und es deshalb schwierig war, den Signaleinsatz sauber ablesen zu können. In einigen Fällen war eine Messung nicht möglich.¹⁸⁹ Die Dämpfung nahm mit der Messdistanz zu, was mit der Beobachtung zusammenpasst, dass vor allem lange Messdistanzen vermehrt zu Ausreißern nach unten führen. Durch die Dämpfung

189 Persönliche Mitteilung von Lale von Baudessin, 10.11.2022.

kommt es zu einer Abrundung des Signals, wodurch die Laufzeit tendenziell überschätzt wird, was dann zu geringeren Ultraschallgeschwindigkeiten führt. Dieses Phänomen konnte auch bei den Labormessungen an durchfeuchteten Bohrkernen aus Ummendorfer Sandstein beobachtet werden.

Wie auch in den Labormessungen beobachtet, scheint ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Materialfeuchte und der Dämpfung zu bestehen. Bei der Skulptur HD3, bei der aufgrund ihres schattigen und oft feuchten Standortes mit einer erhöhten Materialfeuchte zu rechnen ist, war besonders schwierig zu messen (vgl. Bemerkungen in Tabelle 1 Anhang B.1). Die Schwierigkeit, aufgrund der Dämpfung den Signaleinsatz sauber ablesen zu können, stieg im Herbst und Winter, weshalb bei einigen überwiegend langen Messstrecken im Herbst und Winter keine Werte gemessen werden konnten. Die Wintermessungen weisen hier zum Teil deshalb kleinere Streuungen auf, da Werte aufgrund von schlechter Signalqualität nicht erfasst werden konnten. Zum Teil verkleinern sich die Streubreiten bei den Herbst und Wintermessungen. Ein Grund hierfür kann darin liegen, dass Werte die zuvor schon stark gestreut haben, nun wegfielen. Die Messung im Winter 2022 wurde beispielsweise fast ausschließlich an Messstrecken < 40 cm durchgeführt.

Bei ohnehin schwer zu messenden Messpunkten kamen auch vermehrt Kopplungsmittel zum Einsatz. Bei welchen Messpunkten Kopplungsmittel eingesetzt wurden, ist nicht bekannt. Es ist aber nicht auszuschließen, dass es hier zu zusätzlichen Messfehlern gekommen ist (vgl. Abschnitt 6.1.2).

Die Messungen wurden von unterschiedlichen Personen ausgeführt, was im Detail nicht nachvollzogen werden kann. Welcher Anpressdruck bei den Messungen an den Skulpturen verwendet wurde, lässt sich nicht nachvollziehen, da die Prüfköpfe immer manuell auf die Oberflächen gedrückt wurden. Die messenden Personen beobachteten, dass die erzielten Ergebnisse mit dem von ihnen aufbrachten Druck variierten.¹⁹⁰

190 Persönliche Mitteilung von Lale von Baudessin, 10.11.2022.

Warum es bei F21 zu stärkeren Ausreißern kommt als bei den anderen Skulpturen aus Cottaer Sandstein, kann nicht gesagt werden. Die Skulptur steht im Süden und nahezu ganztägig von der Sonne beschienen. Die messenden Personen gaben an, dass es bei den Sockelmessungen an Skulptur F21 bei langen Distanzen problematisch war, Signale zu erhalten. Hier könnte die Ursache für die Ausreißer bei den Messpunkten der langen Sockeldistanzen (Messpunkte 26 und 27) und die große Streuung der Messpunkte 22, 24 und 28 liegen (vgl. Anhang B.4). Warum in diesem Fall die Dämpfung im Vergleich mit den anderen Skulpturen aus Cottaer Sandstein so groß ausfiel, ist nicht bekannt und sollte näher untersucht werden. Auch F21 wurde an einem separaten Tag gemessen, allerdings lag der letzte Regenfall 6 Tage zurück.

Bei kleinen Messstrecken treten gelegentlich Ausreißer nach oben auf. Warum es hier zu einer Überschätzung der Ultraschallgeschwindigkeit kommt, ist nicht bekannt.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass es bei den Messungen an den frei bewitterten Skulpturen aufgrund von biogenem Bewuchs auf der Oberfläche zu Messfehlern gekommen sein kann. Dieser war bei HD3 besonders ausgeprägt. Unregelmäßige Oberflächen, Rundungen und Hinterschneidungen in den Skulpturenoberflächen erschweren zum Teil das Aufsetzen der Messköpfe, was auch im Zusammenhang mit dem Anpressdruck zu Schwierigkeiten bei den Messungen führen kann.

6.5.2 Fehlerquellen der Labormessungen

Bei den Laborversuchen kann davon ausgegangen werden, dass die untersuchten Probekörper aus homogenem Material bestehen. Die Streuungen der Messwerte blieben klein, obwohl bei den Betrachtungen zu Trocknung und Tränkung (vgl. Abb. 29) verschiedene Probekörper und verschiedenen Messachsen miteinander zu einem Mittelwert kombiniert wurden. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Probekörper relativ ähnlich und somit auch die auftretende Streuung zwischen den Messpunkten gering ist. Bei den besagten

Messungen an den großen Probekörpern aus Cottaer Sandstein fällt die Streuung deutlich kleiner aus, wenn die Messachsen separat betrachtet werden. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Messachsen nicht exakt parallel bzw. senkrecht zur Schichtung verliefen. Da die Messung nach Tränkung und Trocknung an 20 kleinen und an 15 großen Probekörpern durchgeführt wurden, kann von einer hohen Reliabilität und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ausgegangen werden.

Die verwendete Messfrequenz von 350 kHz ist nicht ideal auf die Länge der großen Probekörper angepasst (vgl. Abschnitt 3.3). Nachdem Vorversuche gezeigt hatten, dass die Messung der großen Probekörper in trockenem Zustand mit der gewählten Frequenz gut möglich war, wurde sich dafür entschieden, alle Laborversuche mit derselben Messfrequenz und denselben Messköpfen durchzuführen, um einen Vergleich zu ermöglichen.

Bei allen durchgeführten Messungen konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den gewonnenen Ergebnissen an großen oder kleinen Probekörpern festgestellt werden. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass unter der Voraussetzung von homogenem Probenmaterial auch verhältnismäßig kleine Probekörper, wie sie in vorliegendem Versuch verwendet wurden, repräsentative Ergebnisse liefern können.

Bei der Konditionierung der Probekörper in Exsikkatoren trat das Problem auf, dass sich die gewünschten Luftfeuchtigkeiten nicht exakt einstellen ließen. Da sich die Luftfeuchte und der Wassergehalt der Probekörper im zeitlichen Verlauf einem Gleichgewichtszustand annähern und sich dabei gegenseitig beeinflussen (vgl. Abschnitt 6.3.1), wurde davon ausgegangen, dass die Gleichgewichtsfeuchte in den Gesteinen in etwa den mit den Hygrometern gemessenen Luftfeuchtigkeiten entsprach. Die Wiederholungsmessungen der Proben in denselben Exsikkatoren an unterschiedlichen Tagen zeigten auch, dass auftretende Schwankungen der Luftfeuchten von 10 % nur zu geringen Schwankungen in aufgenommener Feuchtigkeit und Ultraschallgeschwindigkeit führen (vgl. Tabellen 10, 11 & 12 in Anhang C.3). Die Schwankungen der Ultraschallgeschwindigkeiten lagen in den meisten Fällen bei unter 3 %, was auch

in Anbetracht der Tatsache, dass die Messungen von unterschiedlichen Personen durchgeführt wurden, sehr gering ist. Diese geringen Schwankungen belegen die Reproduzierbarkeit, Präzision und Robustheit der Methode. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Methode auch richtige Ergebnisse im linearen Messbereich liefert. Schließlich kann von einer hohen Eignung der Messmethode gesprochen werden, die somit im Rahmen dieser Arbeit qualitativ hochwertige Ergebnisse liefern konnte.

6.6 Diskussion

Die vorliegende Arbeit sollte den Fragen nachgehen, wie die Ultraschallgeschwindigkeit bei den beiden untersuchten Gesteinen von im Porenraum vorhandener Feuchtigkeit beeinflusst wird und wie diese beiden Messgrößen vom Außenklima bedingt werden.

Die Labormessungen haben gezeigt, dass sich die beiden untersuchten Sandsteine hinsichtlich der genannten Fragestellungen grundlegend unterschiedlich verhalten. Betrachtet man den Feuchtetransport, so nahm Cottaer Sandstein bei den Laborversuchen mit bis zu 1,2 M.-% deutlich mehr Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auf, als Ummendorfer Sandstein mit bis zu 0,1 M.-%. Ummendorfer Sandstein hat dafür eine höhere kapillare Wasseraufnahme und kann flüssiges Wasser schneller aufnehmen (vgl. Abschnitt 6.2 & 6.3). Der Unterschied im Feuchtetransport der beiden Gesteine, die sich prinzipiell in vielen gesteintechnischen Parametern ähneln, ist in deren unterschiedlicher Porenradienverteilungen begründet (vgl. Abb. 4.1). Cottaer Sandstein hat einen größeren Anteil an Mikro- und kleinen Kapillarporen, in denen Kapillarkondensation, also Abscheidung von zuvor in der Gasphase transportierter Feuchtigkeit, besser stattfinden kann. Bei Ummendorfer Sandstein liegen die Porenradien überwiegend im Kapillarporenbereich, was den stärker ausgeprägten Kapillartransport erklärt (vgl. Abschnitt 2.1 & Abb. 2). Aufgrund der ähnlichen Porosität ist die aufgenommene Wassermenge bei Sättigung mit bis zu 9 % ähnlich (vgl. Abb. 28 und Abschnitt 4.1). Bei Wassersättigung kommt es bei den Probekörpern aus Cottaer Sandstein zu einem Absinken der

Ultraschallgeschwindigkeit von bis zu 19 %. Bei Ummendorfer Sandstein bewegt sich die beobachtete Änderung im Mittel zwischen 2 und 9 % (vgl. Abschnitt 6.2.2). Die Ultraschallgeschwindigkeiten, die bei maximaler Feuchtigkeitsaufnahme durch Sorption gemessen wurden, unterscheiden sich bei beiden Gesteinen nicht signifikant von denen, die nach vollständiger Tränkung bestimmt wurden, obwohl ein deutlicher Unterschied in der aufgenommenen Wassermenge besteht (vgl. Abschnitt 6.3.2).

Die beobachteten Abnahmen der Ultraschallgeschwindigkeiten mit zunehmendem Wassergehalt decken sich mit den Ergebnissen anderer an Sandsteinen durchgeführten Studien¹⁹¹. Snethlage (2022) konnte nach Untersuchung kleiner Gesteinsprismen aus Cottaer und Ummendorfer Sandstein, die bereits im Rahmen des DBU-Projektes stattgefunden haben, zunächst keine erheblichen Änderungen innerhalb der auftretenden Streubreiten von Ultraschallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte feststellen (vgl. Abschnitt 5.1). Bei Wassersättigung kam es bei diesen Versuchen bei beiden Gesteinen zu einem Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit mit zunehmendem Wassergehalt. Bei den von Snethlage (2022) durchgeführten Messungen konnten aufgrund der vergleichsweise kleinen Probekörpervolumina und der geringer Probekörperanzahl lediglich qualitative Trends beobachtet werden. Die vorliegende Masterarbeit kann als Überprüfung der hier getätigten Beobachtungen verstanden werden. Von einer gewissen Präzision und Robustheit der in der Masterarbeit durchgeführten Labormessungen kann ausgegangen werden (vgl. Abschnitt 6.5.2). Daher sind die hier gewonnen Ergebnisse, sowie der beobachtete Abfall bei steigender Luftfeuchtigkeit, als repräsentativ für Ummendorfer und Cottaer Sandstein anzunehmen.

Auch andere Studien bestätigen einen Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit bei zunehmender Materialfeuchte bei Sandstein, im Gegensatz zu Anstiegen, wie sie bei Marmor oder anderen dichteren Gesteinen beobachtet wurden (vgl. Abschnitt 3.1). Ein Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit von bis zu 10 % bei dem von Weiss (1994) untersuchten Dogger- β -Sandstein erfolgte eher exponentiell, was

191 u.a. Snethlage (2022), Esbert et al. (1991) & Weiss (1994).

bedeutet, dass der Verlauf mit zunehmendem Wassergehalt abflachte. Diese Beobachtung deckt sich ebenfalls gut mit den Beobachtungen der vorliegenden Masterarbeit: Bei einem Anstieg des Wassergehalts von 1 % hin zu 9 % bei Sättigung kommt es zu keiner weiteren erheblichen Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit (vgl. Abb. 35 & 36). Nach den Untersuchungen von Esbert et al. (1991) ist möglicherweise, die Unterscheidung zwischen teilweiser und vollständiger Wassersättigung notwendig. Bei teilweiser Sättigung von bis zu 80 % kam es nämlich zu einem deutlichen Absinken um 40 %, im Gegensatz zu einem Anstieg bei vollständiger Sättigung. Da auch bei den Ergebnissen in Abschnitt 6.3 die auftretenden Änderungen zwischen maximaler Sättigung durch Sorption und kapillares Saugen nicht vollständig konsistent an einander anschließen (vgl. Abb. 35 & 36), wäre ein solcher Umstand denkbar. Die hier auftretenden Unterschiede liegen allerdings innerhalb der beobachteten Streubreiten der Werte und sind daher lediglich unter Vorbehalt zu interpretieren.

Nach dem Modell von Fleischer (2002) wäre es ebenfalls denkbar, dass ein Unterschied in dem Einfluss von teilweiser und vollständiger Wassersättigung besteht. Er betont, dass die Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit möglicherweise nicht vom Porenfüllungsgrad, sondern vom Anteil der vollständig gefüllten Poren abhänge (vgl. Abschnitt 3.1). Je nach Sättigungsgrad könnte das Ultraschallsignal über die Kornkontakte oder über den mit Wasser gefüllten Porenraum laufen, was sich in unterschiedlichen gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten niederschlagen würde. In nur teilweise gefüllten Poren, wie sie bei 99 % relativer Feuchte vorliegen, wäre nach Fleischers Modell jedoch kein erheblicher Anstieg der Federkonstante des Porenraums c_p zu erwarten. Die Ultraschallgeschwindigkeit sollte damit unverändert bleiben. Streng diesem Modell folgend, wäre zusätzlich ein stärkerer Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit bei Ummendorfer Sandstein im Vergleich zum Cottaer Sandstein zu erwarten gewesen, da Ummendorfer Sandstein die im Mittel größeren Poren aufweist.

Eine weitere Erklärung für das unterschiedliche Verhalten der untersuchten Sandsteine könnte, wie von Snethlage (2022) vermutet, in der Änderung des dynamischen E-Moduls bei zunehmender Materialfeuchte liegen. Wie in

Abbildung 4 in Abschnitt 2.2 erkennbar, ist die Ultraschallgeschwindigkeit proportional zur Wurzel aus dem E-Modul $E^{0.5}$. Bei steiferen Materialien steigt in Folge dessen die Ultraschallgeschwindigkeit: In elastischen Materialien erfolgt die Übertragung von Ultraschallwellen langsamer. Eine Änderung des E-Moduls könnte nach Fleischers Modell als eine Änderung der Federkonstante der Kornkontakte c_k verstanden werden (vgl. Abschnitt 3.1). Insbesondere in Anwesenheit von Tonen ist die Abnahme des E-Moduls und ein damit verbundenes Absinken der Ultraschallgeschwindigkeit zu erwarten, wie auch in den experimentellen Arbeiten von Esbert et al. (1991) vermutet wurde.

Betrachtet man die in Abbildung 31 gezeigten Untersuchungen der E-Module von Ummendorfer und Cottaer Sandstein bei Wassersättigung gegenüber trockener Proben, so sieht man, dass der E-Modul bei beiden Gesteinen in etwa in gleicher Weise abnimmt. Nach Ehling & Siedel (2011) ist auch der Tongehalt beider Gesteine recht ähnlich¹⁹² (vgl. Abschnitt 4.1). Demnach kann auch hier keine Begründung für das so unterschiedliche Verhalten der beiden Sandsteine gefunden werden. Auch bei Marmor kommt es bei Wassersättigung zu einem deutlichen Abfall des E-Moduls (vgl. Abb. 31). Dennoch wurden hier im Rahmen anderer Studien, im Gegensatz zu den Beobachtungen an den beiden Sandsteinen, deutliche Anstiege der Ultraschallgeschwindigkeit bei mit Wasser gefülltem Porenraum gemessen (vgl. Abschnitt 3.1).

Die Untersuchungen zeigen, dass die Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit bei Anwesenheit von Feuchtigkeit einem sehr komplexen Zusammenspiel verschiedener Faktoren unterliegt und nach jetzigem Stand der Wissenschaft noch nicht durch ein einfaches Modell beschrieben werden kann.

Betrachtet man die Auswirkungen auf die Praxis, so wäre nach der Simulation von Snethlage (2022) bei einer frei bewitterten Skulptur aus Cottaer Sandstein im Inneren mit einem Wassergehalt von etwas über 1 M.-% im Sommer und im Winter mit etwa 2,5 M.-% zu rechnen (vgl. Abschnitt 5.2).¹⁹³ Nach Regen-

¹⁹² Erwähnt sei an dieser Stelle, dass sich bei ähnlichem Tongehalt dessen Verteilung bei beiden Sandsteinvarietäten unterscheidet. Bei Cottaer Sandstein sind die Tone der Schichtung folgend zentriert und gerichtet, bei Ummendorfer Sandstein homogener im Gefüge verteilt.

¹⁹³ Köhler (2014) schloss aus seinen Untersuchungen an den Marmorstelen auf eine geringere Materialfeuchte im Winter als im Sommer (vgl. Abschnitt 3.1). Aufgrund der unterschiedlichen

ereignissen treten in den oberflächennahen Bereichen Feuchtespitzen von bis zu 5 M.-% auf. Den Ergebnissen der Laborversuche zufolge, dürfte es bei Änderungen des Wassergehalts oberhalb von 1 M.-% bei Cottaer Sandstein zu keinen signifikanten Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeit kommen (vgl. Abb. 35 & 36).

Die im Potsdamer Klima auftretende relative Feuchte liegt in der Regel zwischen 50 und 90 % (vgl. Abb. 23). Lässt man Regenereignisse außer Acht, kommt es nach den Laborversuchen bei Cottaer Sandstein in diesem Bereich zu einer Änderung der Gleichgewichtsfeuchte von 0,5 zu 1 M.-%. Dies hat wiederum ein Absinken der Ultraschallgeschwindigkeit um etwa 0,3 km/s zur Folge, was einer Änderung von etwas über 10 % entspricht. Die bei Ummendorfer Sandstein in diesem Bereich auftretenden Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeit sind äußerst gering (vgl. Abb. 35 & 36).

Bei Messstrecken < 20 cm, die nach der Simulation von Sneath (2021) den größten Feuchteschwankungen unterworfen sein sollten, treten bei Skulpturen aus Cottaer Sandstein im Herbst und Winter Abfälle der Ultraschallgeschwindigkeit von bis zu 0,2 km/s auf (vgl. Abb. 25).

Der Abgleich der Ergebnisse von Labor- und der in situ Messungen zeigt, dass der in der Praxis an Skulpturen aus Cottaer Sandstein auftretende Feuchteeinfluss eher gering ausfällt und gut handhabbar ist. Abweichungen von $> 0,2$ km/s sind nicht zu erwarten. Bei Messstrecken < 20 cm, bei denen die größten feuchtebedingten Abweichungen vorliegen sollten, fallen die beobachteten Abweichungen bei der Vergleichsmessung im Frühling mit bis zu 0,1 km/s sogar noch geringer aus (vgl. Abb. 26).

Ein klarer Trend, dass Abweichungen vor allem bei kurzen Messstrecken auftreten, wie nach der Simulation von Sneath (2021) oder auch vorherigen Studien (vgl. Abschnitt 3.2.2) zu erwarten wäre, konnte an den Skulpturen nicht beobachtet werden (vgl. Abb. 25). Nach dem Ausschluss der überwiegend bei

Porenraumstruktur und anderen Geometrie, die weniger Angriffsfläche für Regen bietet, schließen sich diese Ergebnisse nicht aus. Die Tendenzen der Simulation von Sneath (2022) deckten sich mit den Beobachtungen, die in der Praxis an den Skulpturen gemacht wurden.

langen Messstrecken auftretenden Ausreißer, nehmen Abweichungen nach unten bei kurzen Messstrecken zwar zu, allerdings liegen hier auch deutlich mehr Messpunkte vor. Die größten Abweichungen treten außerdem bei den Skulpturen aus Ummendorfer Sandstein auf, bei welchem es nach den Labormessungen aber kaum zu feuchtebedingten Abweichungen kommen sollte. Nachdem sich bei den jahreszeitlichen Schwankungen kein Muster abzeichnet (vgl. Abb. 26), das dem Einfluss der Materialfeuchte auf die Ultraschallgeschwindigkeit zugrunde liegen könnte, ist auch eine mathematische Korrelation, wie sie bei Köhler (2014) vorgenommen wurde, an dieser Stelle nicht sinnvoll (vgl. Abschnitt 3.1).

Überhaupt zeigt der Vergleich der Ergebnisse der Skulpturen aus Cottaer und Ummendorfer Sandstein, dass die Abweichungen in Herbst-, Winter- und auch Frühlingsmonaten bei Ummendorfer Sandstein wesentlich größer ausfallen als bei Cottaer Sandstein. Nachdem die Labormessungen gezeigt haben, dass die Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit mit der steigenden Materialfeuchte bei Ummendorfer Sandstein zu vernachlässigen ist, kann hier nicht der Grund für die großen beobachteten Abweichungen und Schwankungsbreiten liegen (vgl. Abb. 24).

Zu den größten Streubreiten und Abweichungen der Mediane nach unten mit über 20 % kam es an der Skulptur HD3 (vgl. Tabelle 3). Hier berichteten die Messenden, dass es überaus schwierig war, einen Signaleinsatz zu erhalten und diesen aufgrund der schlechten Qualität korrekt abzulesen. Überhaupt korrelieren die subjektiven Angaben der Messenden zur Signalqualität mit den auftretenden Streubreiten und Abweichungen der Mediane (vgl. Abb. 24 & Anmerkungen in Tabelle 1 im Anhang B.1). Bei HD3 traten die größten Schwierigkeiten in der Messung auf. Sie befindet sich im sogenannten „Eishof“ (vgl. Abb. 21). Hier herrscht durch die Beschattung der umliegenden Gebäudeteile ein überwiegend feuchtes Klima. Die Figur hatte auch den ausgeprägtesten biogenen Belag. Dieser Umstand zusammen mit der Tatsache, dass die bei den Skulpturen aus Ummendorfer Sandstein auftretenden Abweichungen in den Herbst- und Wintermonaten am größten sind, lässt vermuten, dass die Materialfeuchte doch ausschlaggebend für die auftretenden Abweichungen sein könnte. Sie scheint hier

zwar keinen direkten Einfluss auf die Geschwindigkeit des Ultraschallsignals zu haben, sehr wohl aber auf dessen Qualität. Die Abnahme der Signalqualität durch Dämpfung bei durchfeuchteten Proben aus Ummendorfer Sandstein konnte auch bei den Labormessungen beobachtet werden.

Trotz der in der Praxis bei Ummendorfer Sandstein auftretenden, großen Schwankungen, welche die Aussagen über den Gefügestand unmöglich machen, zeigen die Labormessungen jedoch, dass das Ultraschalllaufzeitverfahren eine prinzipiell gut einsetzbare Methode ist. Die durchgeführten Wiederholungsmessungen zeigten auch bei Ummendorfer Sandstein Schwankungen von mehrheitlich unter 3 % (vgl. Abschnitt 6.5.2). Sie bestätigen damit die bereits von Köhler (2014 & 2015) aufgezeigte Tatsache, dass Messgenauigkeiten von 2 bis 5 % mit der vorhandenen Messtechnik erreicht werden können.

7 Ergänzende Empfehlungen für Ultraschalllaufzeitmessungen frei bewitterter Sandsteinobjekte

Das übergeordnete Ziel des DBU-Projektes und der Masterarbeit war es, durch die gewonnenen Erkenntnisse zum Einfluss der Materialfeuchte die Messung der Ultraschalllaufzeit zu verbessern und damit die Möglichkeit des Monitorings von Kunst- und Kulturgütern aus Sandstein zu schaffen. Der folgende Abschnitt fasst zusammen, welche Empfehlungen aufgrund der Ergebnisse des DBU-Projektes und der vorliegenden Masterarbeit für die Messung gegeben werden können. Die allgemeinen Hinweise, die bereits von anderen Autor*innen gegeben wurden (vgl. Abschnitt 3.3), werden hierdurch ergänzt.

Die Untersuchungen und Recherchen haben gezeigt, dass die Materialfeuchte ein nicht zu vernachlässigender aber handhabbarer Einflussfaktor bei Ultraschalllaufzeitmessungen an Sandsteinskulpturen darstellt.

Eine mathematische Korrektur, wie von Köhler (2014 & 2015) für Marmorskulpturen entwickelt, ist für Sandstein nach jetzigem Wissensstand nicht sinnvoll. Eine Korrektur wäre aufgrund des klaren linearen Zusammenhangs zwischen Materialfeuchte und Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit, wie er sich bei Cottaer Sandstein zeigt, prinzipiell möglich (vgl. Abb 6.3.2). Allerdings müssten nach der vorgeschlagenen Methode von Köhler der feuchtebedingte Anstieg der Ultraschallgeschwindigkeit, der Zeitraum der Einflussnahme sowie dessen Luftfeuchte bekannt sein. Zur Berücksichtigung des feuchtebedingten Anstiegs der Ultraschallgeschwindigkeit wären gesteinspezifisch umfangreiche Voruntersuchungen notwendig, vergleichbar mit denen in Abschnitt 6.3. Zwar könnten die so erhobenen Daten für jede Gesteinsvariätet wieder verwendet werden, jedoch ist die hieraus folgende Unsicherheit recht groß. Wie auch andere Studien gezeigt haben (vgl. Abschnitt 3.1 & 4.1), kann es auch innerhalb einer Variätet zu großen Unterschieden in deren Eigenschaften kommen. Auch der Zeitraum der Einflussnahme bleibt zunächst eine unbekannt Variable. Eine mathematische Korrektur wäre aus diesen Gründen fehleranfällig und aufwendig.

Zudem war der beobachtete Einfluss der Materialfeuchte auf die Ultraschallgeschwindigkeit bei den untersuchten Sandsteinen in der Praxis eher gering (vgl. Abschnitt 6.6). Es konnte allerdings ein großer Einfluss der vorhandenen Feuchtigkeit auf die Signalqualität bei Ummendorfer Sandstein beobachtet werden. Eine verminderte Signalqualität durch starke Dämpfung führte zu großen Streuungen der Messwerte (vgl. Abschnitt 6.5.1 & 6.6). Aus diesem Grund und da ein signifikantes Absinken der Ultraschallgeschwindigkeit bei anderen Sandsteinvarietäten bei zunehmender Materialfeuchte nicht ausgeschlossen werden kann (vgl. Abschnitt 6.6), ist bei Ultraschalllaufzeitmessungen die im Gestein vorhandene Feuchtigkeit möglichst gering zu halten. Bei Vergleichsmessungen ist für möglichst ähnliche Messbedingungen zu sorgen. So sollten bei der Planung von Ultraschallmessungen das Klima und der Standort bzw. die Exposition des zu untersuchenden Objektes berücksichtigt werden.

Messungen sollten in den Sommermonaten oder bei warmen und trockenen Bedingungen in den späten Frühlingsmonaten erfolgen. Die Simulation von Snethlage (2022) hat gezeigt, dass bei Skulpturen aus Cottaer Sandstein die Materialfeuchte in den Sommermonaten am geringsten ist (vgl. Abschnitt 5.2). Im Rahmen des DBU-Projektes konnten außerdem bei Messungen an Skulpturen des Neuen Palais Ende Mai überwiegend vergleichbare Ergebnisse wie im Sommer des Vorjahres erzielt werden. Messungen sollten, auch aufgrund der niedrigen Temperaturen $< 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht im Winter durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 3.2.4). Im Herbst ist in Folge von feuchtem Klima, häufigen Niederschlägen und langsamerem Abtrocknen aufgrund von niedrigeren Temperaturen als in den Sommermonaten mit erhöhter Materialfeuchte zu rechnen (vgl. Abschnitt 5.2).

Bei der Planung von Ultraschallmessungen sollte eine zeitliche Flexibilität je nach Witterung möglich sein. Nach Regentagen sollte ausreichend lange gewartet werden. Der abzuwartende Zeitraum hängt ab von den Temperaturen und Sonnenstunden nach dem Niederschlag sowie der Exposition und dem Trocknungsverhalten des jeweiligen Gesteins. Nach den durchgeführten

Untersuchungen im Labor und in situ kann der Feuchteinfluss durch Niederschlag bei den untersuchten Gesteinen 3 Tage nach Niederschlägen als abgetrocknet und vernachlässigbar angenommen werden (vgl. Abschnitt 6.2.2 & 6.5.1). Bei der Untersuchung anderer Gesteinsvarietäten wird empfohlen, das jeweilige Feuchtetransportverhalten der Gesteine zu betrachten, um eine Idee von Feuchteaufnahme und Trocknungszeiten zu erhalten. Einen Eindruck des zu erwartenden Feuchtetransports kann die Porenradienverteilung der zu untersuchenden Gesteine liefern (vgl. Abschnitt 2.1 & 6.6). Für eine ideale Vorbereitung sollten Vorversuche zum Trockenverhalten und der Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit bei Durchtränkung vergleichbar zu den Untersuchungen in Abschnitt 6.2 durchgeführt werden.

Wie bereits oben erwähnt, haben die Messreihen am Neuen Palais gezeigt, dass andere Einflussfaktoren, wie Signaldämpfung, Variation in Anpressdruck und unterschiedliche Ankopplung, die Messgenauigkeit stärker beeinflussen, als die Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit bei der Anwesenheit von Feuchtigkeit (vgl. Abschnitt 6.6). Um in der Praxis aussagekräftige Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit zu erzielen, sind hier Verbesserungen notwendig.

Um den Einfluss der Dämpfung möglichst gering zu halten, kann ein Anpassen der Messfrequenz, über die bereits empfohlene Anpassung in Bezug auf die Länge der Messstrecke (vgl. Abschnitt 3.3) hinaus, sinnvoll sein. Auch hier werden Vorversuche empfohlen.

Wie bereits von anderen Autor*innen beobachtet (vgl. Abschnitt 3.2.3) und bei den Messungen am Neuen Palais bestätigt (vgl. Abschnitt 6.5.1), kann es bei der Variation des Anpressdrucks zu Messfehlern kommen. Da es im Gegensatz zu Messungen im Labor noch keine technische Lösung¹⁹⁴ gibt, wie der Anpressdruck bei in situ Messungen konstant gehalten werden kann, muss das Andrücken der Messköpfe manuell erfolgen. Es ist daher sinnvoll, dass sich die messende Person im Vorfeld der eigentlichen Messung einen Überblick über mögliche auftretende Schwankungen der Ultraschallgeschwindigkeit bei variierendem

¹⁹⁴ Ein konstanter Anpressdruck könnte durch eine vorgespannte Feder mit geringer Federkonstante realisiert werden. (Anmerkung Dipl.-Ing. A. Schultz, 28.02.23).

Anpressdruck verschafft und den Druck bei verschiedenen Messungen möglichst konstant hält.

Wie bereits von anderen Autor*innen empfohlen (vgl. Abschnitt 3.3), sollte, wenn möglich, auf den Einsatz von Kopplungsmitteln verzichtet werden, um diese als mögliche Fehlerquelle auszuschließen. Im Zusammenhang mit starker Signaldämpfung muss im Einzelfall abgewogen werden, ob ein Kopplungsmittel eingesetzt werden sollte. Kommt ein Kopplungsmittel zum Einsatz, muss über Referenzmessungen überprüft werden, wie stark die Kopplungsverzögerung durch das Kopplungsmittel beeinflusst wird und ggf. schwankt. Um den Einfluss von Oberflächenverunreinigungen, wie zum Beispiel biogenen Belägen, auszuschließen, sind solche vor der Messung von den Messpunkten zu entfernen. Die Reinigung sollte trocken oder feucht in ausreichendem zeitlichen Abstand zur Messung erfolgen, damit der Untergrund abtrocknen kann.

Des Weiteren konnten die Labormessungen zeigen, dass bei homogenem Probenmaterial, auch bei kurzen Messdistanzen von 10 cm und weniger, wie sie in der Denkmalpflegepraxis häufiger vorkommen, repräsentative Ergebnisse gewonnen werden können (vgl. Abschnitt 6.5.2). Auch bei den Messungen an den Skulpturen konnte keine signifikante Zunahme von Abweichungen bei kleinen Messdistanzen festgestellt werden. Da vergangene Studien gezeigt haben (vgl. Abschnitt 3.2.2), dass bei kurzen Messstrecken Fehler aufgrund der Kopplungsverzögerung stärker ins Gewicht fallen, ist hier jedoch stets mit besonderer Sorgfalt vorzugehen (vgl. Abschnitt 3.3).

8 Fazit und Ausblick

Im Rahmen des DBU-Projektes und der vorliegenden Masterarbeit konnten fundierte Erkenntnisse zum Feuchtetransportverhalten von Cottaer und Ummendorfer Sandstein und dem damit verbundenen Einfluss auf die Ultraschallgeschwindigkeit gewonnen werden (vgl. Abschnitt 6.6). Die Materialfeuchte stellt demnach bei beiden untersuchten Gesteinen einen beherrschbaren Einflussfaktor bei Ultraschallmessungen dar. Zur Frage, warum es bei Cottaer Sandstein zu Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeit kam und bei Ummendorfer Sandstein nicht, wurden wissenschaftliche Erklärungsmodelle diskutiert. Zur tiefergehenden Klärung der Mechanismen bedarf es jedoch weitreichendere Forschung. Dennoch können anhand der Ergebnisse praxisnahe Empfehlungen für Ultraschallmessungen an Sandsteinobjekten im Allgemeinen gegeben werden (vgl. Abschnitt 7).

Im Rahmen der Laborversuche konnte gezeigt werden, dass mit dem Ultraschalllaufzeitverfahren die für Monitoringmessungen nötige Genauigkeiten bei den beiden untersuchten Probesteinen erreicht werden können (vgl. Abschnitt 6.5.2). Auch aufgrund der geringen Schwankungen der Werte bei den Messungen der Skulpturen aus Cottaer Sandstein (vgl. Abschnitt 6.5.1) ist davon auszugehen, dass Gefügeveränderungen gut erfasst werden können. Das zeigt das Potential der Methode und bestätigt dessen prinzipielle Eignung auch für Messungen an Sandsteinobjekten.

Die Untersuchungen des DBU-Projektes und der darin eingebetteten Masterarbeit machen jedoch auch deutlich, dass sich die Messpraxis verbessern muss, damit Ultraschallmessungen nicht zu einem „aussagelosen Ratespiel“ degradiert werden, wie von Fleischer (2002) angemerkt. Wie auch bereits von anderen Autor*innen gezeigt, kann es bei nicht Beachtung wichtiger Rahmenbedingungen insbesondere bei in situ Messungen zu erheblichen Messfehlern kommen (vgl. Abschnitt 3.2).¹⁹⁵ Auch wenn das Ultraschalllaufzeitverfahren eine vergleichsweise

¹⁹⁵ Auras et al., 2011; Ehling, 2009; Köhler, 2014 & 2018, Snethlage, 2022.

einfache Messmethode in der Anwendung darstellt, wird auch von anderer Autor*innen darauf hingewiesen, dass Erfahrung und zudem Vorversuche für die Messung und Auswertung nötig sind.¹⁹⁶

Um Ultraschalllaufzeitmessungen an Sandsteinobjekten in der Zukunft weiter zu verbessern, sollte zunächst der Frage nachgegangen werden, warum es insbesondere bei Ummendorfer Sandstein unter Praxisbedingungen zu nicht repräsentativen und nicht reproduzierbaren Ergebnissen kam. Wünschenswert wäre es hierzu, in Zukunft den Porenraum verschiedener Sandsteine näher zu betrachten, um zu einem besseren Verständnis der Ultraschallausbreitung und des unterschiedlichen Verhaltens verschiedener Sandsteine unter Feuchteinfluss zu gelangen. Bei den durchgeführten Untersuchungen an den beiden Sandsteinvariäteten war der Einfluss der Signaldämpfung von größerer Bedeutung als die feuchtebedingte Geschwindigkeitsänderung. Daher sollte der Frage nachgegangen werden, warum und unter welchen Rahmenbedingungen diese auftritt und wie hier gesteinspezifisch auftretende Messfehler vermieden werden können.

In Bezug auf die Verbesserung der Signalqualität und Genauigkeit bei der auftretenden Dämpfung sind sicherlich auch Lösungen auf Hardware- und Softwareebene der Messtechnik denkbar.

Die Ergebnisse des DBU-Projektes und der Masterarbeit verdeutlichen, wie wichtig interdisziplinäre Zusammenarbeit bei den komplexen Fragestellungen ist, die bei dem Erhalt von Kunst- und Kulturgütern auftreten. So liefern Naturwissenschaftler*innen einen wesentlichen Beitrag bei der Entwicklung und Verbesserung von Untersuchungs- und Konservierungsmethoden. Der Blick aus der Praxis ist jedoch unersetzlich, um die richtigen Fragen zu stellen, Zusammenhänge zu erfassen und entsprechende Schlussfolgerungen ziehen zu können.

¹⁹⁶ Auras et al., 2011; Ehling, 2009; Köhler, 2014 & 2018, Sneathlage, 2022.

Literaturverzeichnis

AURAS, M., J. MEINHARDT, R. SNETHLAGE, 2011. *Leitfaden Natursteinmonitoring. Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien.* Stuttgart: Frauenhofer IRB Verlag. ISBN 978-3-8167-8407-4

DEUTSCH V., M. PLATTE, W. SCHUSTER, M. VOGT, 2010. *Die Ultraschallprüfung - Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung.* ZfP kompakt und verständlich. Band 1. Wuppertal: Castell-Verlag. ISBN 978-3-934255-52-4

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG, 1999. *Merkblatt für Ultraschallverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile, Merkblatt B4.* Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.

EHLING, A. (Hg.), 2009. *Bausandsteine in Deutschland, Band 1: Grundlagen und Überblick.* Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. ISBN 978-3-510-95982-2

EHLING, A. und H. SIEDEL, 2011. *Bausandsteine in Deutschland, Band 2: SachsenAnhalt, Sachsen und Schlesien (Polen).* Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. ISBN 978-3-510-95985-3

ESBERT R.M., L. VALDEON, J. ORDAZ, FJ. ALONSO, C.M. GROSSI, 1991. *Ultrasonic Velocity and Humidity in Monumental Stone.* In: N.S. BAER, C. SABBIONI, A.I. SORS, Science, Technology and European Cultural Heritage. S. 597- 600. Oxford: Butterworth-Heinemann.

- FLEISCHER, G., 2002.** *Beurteilung von Ultraschalluntersuchungen an Natursteinobjekten in der Denkmalpflege.* Dissertation. Wien: Technische Universität.
- GRIMM W. D., 2018.** *Band II - Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik.* Ulm: Ebner Verlag. ISBN 9783871882470
- GRUNERT, S., 1982.** *Der Sandstein der Sächsischen Schweiz als Naturressource, seine Eigenschaften, seine Gewinnung und Verwendung in Vergangenheit und Gegenwart.* – Diss., TU. Dresden, S. 1–424. In: S. GRUNERT, *Der Elbsandstein: Vorkommen, Verwendung, Eigenschaften.* Geologica Saxonica: Journal of Central European Geology. 52/53. S. 3-22. Dresden: Senckenberg Naturhistorische Sammlungen.
- GRUNERT, S., 2007a.** *Der Elbsandstein: Vorkommen, Verwendung, Eigenschaften.* Geologica Saxonica: Journal of Central European Geology. 52/53. S. 3-22. Dresden: Senckenberg Naturhistorische Sammlungen.
- GRUNERT S., 2007b.** *Statistische Untersuchungen zur Aussagefähigkeit petrophysikalischer Messergebnisse über die Eigenschaften kieslig gebundener Sandsteine aus der Sächsischen Schweiz.* Geologica Saxonica: Journal of Central European Geology. 52/53. S. 23-68. Dresden: Senckenberg Naturhistorische Sammlungen.
- GRUNERT S. und J. SZILAGYI, 2010.** *Petrophysikalische Eigenschaften einer Auswahl von Baugesteinen aus Deutschland und ihr Bezug zur Petrographie dieser Gesteine.* In: GEOLOGICA SAXONICA|, Journal of Central European Geology, 56/1, S. 39 – 82. Dresden: Senckenberg Naturhistorische Sammlungen. ISSN 1617-8467

DRESCHER und BADSTÜBNER-GRÖGER, Hg. 1991. *Das neue Palais in Potsdam. Beiträge zum Spätstil der friderizianischen Architektur und Bauplastik.*

Berlin: Akademie Verlag. ISBN 978-3-05-000314-6

DREWELLO R., Hg. 2018. *Risikoziffer. Umweltschäden an Marmor und Sandsteinskulpturen erfassen und objektiv bewerten.* DBU Project Az 33162.

University of Bamberg Press.

HÜNEKE, S., 2012. „*Net soli cedit*“. *Dekoration und Bauskulptur am Neuen Palais.* In: Generaldirektion der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin–Brandenburg Hg. *Friederisiko. Friedrich der Große. Die Ausstellung.* München 2012, S. 286-293.

HÜTTEL, T., 2002. *Mineralogisch technische Charakterisierung von ausgewählten sächsischen Bausandsteinen.* unveröffentlichte Studienarbeit. Freiberg: TU-Bauakademie. In: EHLING und SEIDEL, Hg. *Bausandsteine in Deutschland, Band 2: SachsenAnhalt, Sachsen und Schlesien (Polen).* S. 218

HUTT, S., 2013. *Tragvermögen von Sandstein – Messung mittels Ultraschalltransmission.* Masterthesis. Potsdam: Fachhochschule Potsdam.

KLOPFER, H., 1985. *Lehrbuch der Bauphysik - Schall Wärme Feuchte Licht Brand Klima.* Stuttgart; Vieweg & Teubner Verlag. ISBN-13: 9783519350149

KLOPFER H., 1994. *Lehrbuch der Bauphysik - Schall Wärme Feuchte Licht Brand Klima.* Stuttgart: Vieweg & Teubner Verlag. ISBN 978-3-322-90565-9

KÖHLER, W., 1988. *Preservation problems of Carrara marble sculptures in Potsdam-Sanssouci- radical structural destructions of the 6th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone.* Torún. S. 653-662

KÖHLER, W., 2014. *Leitfaden für Ultraschallmessungen an Marmorskulpturen.* In: DRACHENBERGER T. und P. BELLENDORF, Hg. *Erhaltung von Marmorskulpturen unter mitteleuropäischen Umweltbedingungen: Beiträge des 8. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin / Brandenburg am 17. Oktober 2014 in Potsdam.* Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums Nr. 32. Brandenburg, S. 37-44. ISBN 978-3-88462-356-5

KÖHLER W., 2015. *Erarbeitung eines Bewertungs-Leitfadens für Ultraschallmessungen an umweltgeschädigten Marmorskulpturen am Beispiel u.a. des Parks Potsdam Sanssouci (UNESCO-Weltkulturerbe).* Abschlussbericht DBU-Projekt 29544-45.

KÖHLER W., 2018. *Ultraschalldiagnostik - ein essentieller Bestandteil bei der Berechnung der Risikoziffer.* In: R. DREWELLO, C. PFEUFFER, W. KÖHLER und R. SNETHLAGE, Hg. *Risikoziffer. Umweltschäden an Marmor und Sandsteinskulpturen erfassen und objektiv bewerten: DBU Projekt Az 33162.* Bamberg: University of Bamberg Press, S. 106 – 121.

KRAUTKRÄMER J. und H. KRAUTKRÄMER. 1986. *Werkstoffprüfung mit Ultraschall.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN: 978-3-662-10910-6

MÜLLER, F., 2008. *INSK kompakt: Die internationale Natursteinkartei.* 2. Auflage. Ulm: Ebner Verlag.

PATITZ, G., 2009. *Zerstörungsfreie Untersuchung an altem Mauerwerk: Radar, Ultraschall und Seismik in der Baupraxis.* Berlin: Beuth Verlag. ISBN 978-3-410-17032-7

SNETHLAGE, R., 2022. *Messungen der Ultraschallgeschwindigkeit an Ummerdorfer und Cottaer Sandstein,* projektinterner Zwischenbericht (unveröff.).

SNETHLAGE, R. & UTZ, R., 2021. *Simulation der Feuchteverteilung im Cottaer und Sander Sandstein unter dem Einfluss von Klimajahren. Berechnungen mit dem Programm WUFI*, projektinterner Zwischenbericht (unveröff.).

SCHÖN. J. H., 2004. *Physical Properties of Rocks – A Workbook*. Oxford: Elsevier B.V. ISBN 9780444537966

WEISS G., 1994. *Zisterzienserinnenkloster Kirchheim am Ries. Zusammenfassung der Untersuchung von 1991-1994*. In: R. SNETHLAGE, Hg. *Denkmalpflege und Naturwissenschaft. Natursteinkonservierung Band II*. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, S. 271-301. ISBN 978-3-8167-4692-8

Willems, W. M., Hg., 2017. *Lehrbuch der Bauphysik*. Wiesbaden: Springer Verlag. ISBN 9783658160746

Wittmann, M., H. Wittmann, 1995. *Zerstörungsfreie Bestimmung der Festigkeit von tragenden Bauteilen aus Naturstein*. In: International Zeitschrift für Bauinstandsetzung [online]. Jahrgang 1, Heft 4, Seiten 281 – 294. [Zugriff 02.02.2023]. ETH Library. Verfügbar unter: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/423033/rbm-1995-5041.pdf;jsessionid=5331FB6A308126A9BA4F30F5713125AB?sequence=1>

UNDERWOOD, N., 2014. *Tomographische Auswertung von Ultraschall-Transmissionsmessungen als zerstörungsfreie Untersuchungsmethode an Objekten aus Carrara Marmor*. Masterthesis. Potsdam: Fachhochschule Potsdam

Online-Ressourcen:

Deutscher Wetterdienst (DWD), 2022. *Daten für Temperatur, relative Feuchte und Niederschlag für Potsdam, Messstation ID: 10379* [Zugriff 10.10.22]

Verfügbar unter:

https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/

SÄCHSISCHE SANDSTEINWERKE GmbH, 2023. *Petrografische Eigenschaften von Cottaer und Postaer Sandstein*, 2023. Pirna: Skilisch Marketing, 2023 [Zugriff 04.01.2023]. Verfügbar unter: <https://www.sandsteine.de/sandsteinarten>

STIFTUNG PREUßISCHER SCHLÖSSER UND GÄRTEN BERLIN-BRANDENBURG, 2023. *Neues Palais- Eine königliche Fanfaronade*, 2023. Potsdam: Stiftung Preußischer Schlösser und Gärten, 19.01.2023 [Zugriff 19.01.2023, 12:00]. Verfügbar unter:

<https://www.spsg.de/schloesser-gaerten/objekt/neues-palais/>

VISIT BERLIN, 2021. *Neues Palais - Prunk und Pracht in Preußen*, 2021. Berlin: Berlin Tourismus & Kongress GmbH, 01.2021 [Zugriff 14.02.2023]. Verfügbar unter: <https://www.visitberlin.de/de/neues-palais>

Normen:

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., 2004. *DIN EN 14579:2004 (2004-10): Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung.* Deutsche Fassung. Berlin: Beuth, 2004-10.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Links: Porosität in Abhängigkeit von der Kornsortierung. Schlechter sortierte Kornaggregate weisen in der Regel geringere Porositäten auf als besser sortierte. Rechts: Vergleichsbilder unterschiedlicher Porositäten. (Grimm, 2018, S. 28 & S. 36 nach Flügel, 1978, Abb. 34 & Abb. 26).....6
- Abb. 2: Feuchtetransportmechanismen in Abhängigkeit der Porenradien. (Grimm, 2018, S.35; in Anlehnung an Klopfer, 1986, Abb. 3.24).....7
- Abb. 3: Adsorptionsisotherme verschiedener Natursteine. Bei hohen Luftfeuchten kommt es zu stärkeren Anstiegen der aufgenommenen Wassermenge. (Willems, 2017, S. 181).....9
- Abb. 4, links: Modell eines elastischen Festkörpers (Krautkrämer, 1986, S. 4). Rechts: Skizze der Wellenausbreitung der Longitudinalwelle und zugehörige Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit v_L .(DGZfP, 1999, Bildanhang S. 1).
..... 10
- Abb. 5: Skizze der Ausbreitung der Dehnwelle mit mathematischem Zusammenhang zwischen Dehnwellengeschwindigkeit und dynamischem E-Modul (DGZfP, 1999, Bildanhang S. 1)..... 12
- Abb. 6: Modell der Wellenübertragung in Anwesenheit von Wasser im Porenraum. Die Schwingungen werden bestimmt durch die Federkonstante des Porenraumes c_P und die Federkonstante der Kornkontakte c_K . (Fleischer, 2002, S. 89)..... 15
- Abb. 7: Verzögerung der Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit gegenüber der absoluten Luftfeuchtigkeit bei der Messung an Skulpturen (Hermen) im Park Sanssouci (Köhler, 2015, S.94)..... 18
- Abb. 8: Messung an Marmorskulpturen (Hermen) im Park Sanssouci. Regressionsgeraden der Mediane mit den 7 Wochen zurückliegenden 15 täglichen Mittelwerten der absoluten Luftfeuchten (Köhler, 2015, S. 95)..... 19
- Abb. 9: Verlauf der Ultraschallgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes des Dogger- β -Sandsteins (Weiss, 1994, S. 298).....20
- Abb. 10: Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeit von spanischem Villamayor Sandstein in Abhängigkeit des Sättigungskoeffizienten (Esbert et al., 1991, S. 600).....21

- Abb. 11: Einfluss verschieden großer Kopplungsverzögerungen d [μs] auf die Ultraschallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Länge der Messstrecke (Fleischer, 2002, S. 67)..... 25
- Abb. 12: Ultraschallgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Anpressdrucks von Sender und Empfänger bei Proben aus St. Margarethener Kalksandstein. (Fleischer, 2002, S. 88)..... 26
- Abb. 13: Cottaer (oben) und Ummendorfer Sandstein (unten). Aufnahmen stammen von den für die Herstellung der Probekörper verwendeten Gesteinsblöcken..... 33
- Abb. 14: Porenradienverteilungen von Cottaer und Ummendorfer Sandstein (nach Siedel, TU Dresden & Grimm, 2018, S. 328)..... 35
- Abb. 15: Gesteinsprismen aus Cottaer und Ummendorfer Sandstein..... 40
- Abb. 16: Cottaer Sandstein: Ultraschallgeschwindigkeiten nach Lagerung in verschiedenen relativen Luftfeuchten, sowie in getrocknetem und wassergesättigtem Zustand. (Snethlage, 2022, S. 13)..... 41
- Abb. 17: Ummendorfer Sandstein: Ultraschallgeschwindigkeiten nach Lagerung in verschiedenen relativen Luftfeuchten, sowie in getrocknetem und wassergesättigtem Zustand. (Snethlage, 2022, S. 13)..... 41
- Abb. 18: Skulpturenmodell aus Cottaer Sandstein (Ausrichtung: Ost links, West rechts). Wassergehalt [kg/m^3] nach einem Regenereignis im Juni. Die Westseite ist durch den von Westen eintreffenden Regen deutlich stärker durchfeuchtet. (Snethlage & Utz, 2021, S. 4)..... 43
- Abb. 19: Wassergehalt im Skulpturenmodell aus Cottaer Sandstein während einer Klimaperiode von einem Jahr. Links: Verlauf des Gesamtwassergehalts [kg/m^3]. Rechts: Wassergehalt im Kernbereich [M.-%]. Die Datierung auf der Abszisse resultieren daraus, dass zum Start des Klimajahres willkürlich der 10.08.2021 gewählt wurde. (Snethlage & Utz, 2021, S. 5f)..... 44
- Abb. 20: Das Neue Palais in Potsdam Sanssouci. (Visit Berlin, 2023)..... 48
- Abb. 21: oben: Stellplan der Skulpturen im Erdgeschoss des Neuen Palais. Die Buchstaben kennzeichnen den zugehörigen Flügel des Gebäudes, die Nummerierung erfolgt chronologisch. Unten: Rot markiert sind die für das

Messprogramm ausgewählte Skulpturen von Hofdamen- und Friedrichflügel. (R. Böhm, Skulpturenrestaurierung SPSG).....	49
Abb. 22: Für die Messreihen ausgewählte Skulpturen. (Hippe, Skulpturenrestaurierung SPSG).....	50
Abb. 23: Temperatur, relative Feuchte und Niederschlag vom 01. Januar 2019 bis 31. Januar 2022. Durch schwarze vertikale Linien sind die Tage der Messungen markiert. Niederschlag gleitender Mittelwert für einen Tag, Temperatur und relative Feuchte: wöchentlicher gleitender Mittelwert (DWD, 2022).....	53
Abb. 24: Box-Wisker-Diagramme der jahreszeitlichen Messreihen an den acht ausgewählten Skulpturen des Neuen Palais.....	55
Abb. 25: Plot der Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeiten im Vergleich zur Sommermessung nach Bereinigung der Daten. Dargestellt sind die Änderungen an den einzelnen Messpunkten in Abhängigkeit ihrer Messstrecke.....	58
Abb. 26: Durchschnittliche Änderung der Ultraschallgeschwindigkeiten bei Messstrecken < 20 cm in Bezug auf die Sommermessung, die zu den unterschiedlichen Jahreszeiten an ausgewählten Skulpturen des Neuen Palais gemessen wurden.....	59
Abb. 27 links: kleine und große Probekörper senkrecht und parallel zur Schichtung entnommen. Cottaer (links) und Ummendorfer Sandstein (rechts). rechts: Skizze der Messpunkte und Maße der kleinen und großen Probekörper..	62
Abb. 28: Wassergehalt von kleinen und großen Probekörpern nach kapillarem Saugen über Standfläche und Wasserlagerung nach 48 Stunden.....	66
Abb. 29: Ultraschallgeschwindigkeiten von trockenen und getränkten Probekörpern. \perp : senkrecht zur Schichtung, \parallel : parallel zur Schichtung.....	67
Abb. 30: Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit zwischen trockenem und getränktem Zustand.....	69
Abb. 31: Dynamischer E-Modul bei Proben aus Cottaer und Ummendorfer Sandstein, sowie Carrara Marmor in trockenem und getränktem Zustand.....	70
Abb. 32: Trocknung über einen Zeitraum von 10 Tagen. Ultraschallgeschwindigkeit und Wassergehalt.....	71

-
- Abb. 33: Vorversuch zur Akklimatisierung der kleinen Probekörper aus Cottaer Sandstein durchgeführt von Dipl.-Ing. Andreas Schultz (M.Sc.). Klimastufen: (10 %, 23 %, 53 %, 75 %, 84 %, 100 % rF)..... 75
- Abb. 34: Vorversuch zur Akklimatisierungsdauer der Probekörper. Die Probekörper befanden sich zuvor in einer Klimakammer bei 50 % relativer Feuchte..... 75
- Abb. 35: Kleine Probekörper: Änderung von Wassergehalt und Ultraschallgeschwindigkeit bei Akklimatisierung auf verschiedene Luftfeuchten.. 80
- Abb. 36: Große Probekörper: Änderung von Wassergehalt und Ultraschallgeschwindigkeit bei Akklimatisierung auf verschiedene Luftfeuchten. .81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchung von Fleischer zur Abhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeit mit steigender Materialfeuchte verschiedener Gesteine. Δv_p : Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit. (Fleischer, 2002, S. 91ff).....	17
Tabelle 2: Überblick über die im Rahmen des DBU-Projektes an Skulpturen des Neuen Palais durchgeführten Messungen.....	47
Tabelle 3: Mediane MD mit mittlerer absoluter Abweichung im Bezug zum Median v der an den Skulpturen zu den unterschiedlichen Jahreszeiten gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten. [MD] = [km/s], [v] = [%], CS: Cottaer Sandstein, US: Ummendorfer Sandstein.....	54
Tabelle 4: Überblick über die durchgeführten Messungen für die Ermittlung des Wertebereiches der Ultraschallgeschwindigkeit zwischen trockenem und gesättigtem Zustand und der Änderungen im Laufe des Trocknungsprozesses..	62
Tabelle 5: Überblick der durchgeführten Messungen für die Ermittlung des dynamischen E-Moduls in trockenen und getränkten Zustand.....	62
Tabelle 6: Übersicht der Probekörper für die Messungen an Trocknung und Tränkung, sowie für die Messungen im Laufe des Trocknungsprozesses. CS: Cottaer Sandstein, US: Ummendorfer Sandstein, M: Carrara Marmor.....	66
Tabelle 7: Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit zwischen trockenem und durchfeuchtetem Zustand. Mittelwerte der an alle Messstrecken ermittelten Differenzen senkrecht (\perp) bzw. parallel (\parallel) zur Schichtung.....	70
Tabelle 8: Überblick über die durchgeführten Messungen bei Akklimatisierung der Probekörper in in den Exsikkatoren.....	73
Tabelle 9: Überblick über die bei der Messung verwendeten Probekörper. CS: Cottaer Sandstein, Us: Ummendorfer Sandstein.....	74
Tabelle 10: Durchschnittliche Änderung der Ultraschallgeschwindigkeiten: Von trockenem Zustand zu Akklimatisierung bei 10 % und 100 % rF und vom Akklimatisierung bei 99 %rF zu wassergesättigtem Zustand.....	79

Anhang A – Petrophysikalische Kennwerte von Cottaer und Ummendorfer Sandstein

A.1 Petrophysikalische Kennwerte aus der Literatur

Tabelle 1: Übersicht von Vergleichswerten für Cottaer und Ummendorfer Sandstein verschiedener Quellen. Alle Werte wurden an unverwitterten und unbehandelten Proben bestimmt.

⊥: senkrecht zur Schichtung gemessen

||: parallel zur Schichtung gemessen

m: Mittelwert

v: Variationskoeffizient

	Mikroskopische Charakterisierung	
	Cottaer Sandstein ¹	Ummendorfer Sandstein ²
Zusammensetzung	Quarz: meist > 90 %, Feldspat 5-10 %, Tonminerale im Bindemittel und in den Poren (Kaolinit und Illit) 86 % Quarz, kohlige Substanzen 6 % Gesteinsbruchstücke 5 %, Feldspat 1 % ³	Quarz: 87-97 %, Feldspat: 0-5 %, Tonminerale: 1-7 % (Kaolinit)
Korngröße	0,05 – 0,25 mm	0,08 -0,26 mm
Kornrundung	schwach gerundet bis gerundet	gut gerundet
Sortierung	1,95 (schlecht)	1,32 -1,45 (gut)
	Gesteintechnische Daten	
	Cottaer Sandstein	Ummendorfer Sandstein
Rohdichte [g/cm³]	2,05 ⁴ 2,03 ⁵ 2,04 ⁶	2,02 ⁷
Offene Porosität [Vol.-%]	22,8 ⁸ 24,1 ⁹ 23,07 ¹⁰ 22,6 ¹¹	23,5 – 25,4 ¹²
Wasseraufnahme [M.-]	8,16 ¹³ 6,8 ¹⁴ 8,5 ¹⁵	7,3 – 8,8 ¹⁶

1 Hüttel, 2002; aus: Ehling & Siedel, 2011, S. 218.

2 Ehling & Siedel, 2011, S. 133f.

3 Grimm, 2018, S. 283.

4 Grunert 1982; aus: Grunert, 2007a, S.8.

5 Grunert & Szilagy, 2010, S. 50.

6 Sächsische Sandsteinwerke, 2023.

7 INSK 1998, Abschnitt 95.6.

8 Grunert 1982; aus Grunert, 2007a, S. 8.

9 Grunert & Szilagy, 2010, S. 50.

10 Grimm, 2018, S. 283.

11 Sächsische Sandsteinwerke, 2023.

12 Ehling & Siedel, 2011, S. 135.

13 Grimm, 2018, S. 283.

14 Sächsische Sandsteinwerke, 2023.

15 Projektinternes Messprotokoll, Labor Köhler.

16 Ehling & Siedel, 2011, S. 135.

%], m(v)		7,4-7,9 ¹⁷ 8,0 ¹⁸
w-Wert [kg/m²·√h], m(v)	0,44 (12,7 %) ¹⁹	1,31 (3,4 %) ²⁰
Ultraschallgeschwindigkeiten [km/s], m(v)	⊥ 2,69 (8,6%) ²¹ ∥ 2,77 (8,4 %) ²²	-
Dynamischer E-Modul	12,9 ²³	-

A.2 Messprotokoll: Porenradienbestimmung von Ummendorfer Sandstein

SOLID REPORTING

Company name: TUD, Institut für Baustoffe
Operator: A, Willomitzer

TEST INFORMATION

Test date: 30-01-23
Sample name: SS_SU 13
Comment: 1, Messung
Sample mass (g): 1,84
Sample skeleton density (g/cm³): 1
Mercury surface tension (N/m): 0,48
Mercury contact angle (°): 140
Test filling volume (mm³): 469
Starting hydr, press, of test (MPa): 0,013
(Dil+Hg+Sample) weight (g): 162,39
Corrected weight (Dil,+Hg+Sample) (g): 162,58

ANALYTICAL CONDITIONS

Maximum test pressure (MPa): 400
Increase speed: 6 - 19 MPa/min
Increase method: Pascal
Decrease speed: 7 - 28 MPa/min
Decrease method: Pascal
Temperature of test (°C): 20,3
Mercury density @ test (g/cm³): 13,5455

PREPARATION

Wait time for filling (min): 5

17 INSK, 1998, Abschnitt 95.6

18 Projektinternes Messprotokoll, Labor Köhler.

19 Projektinternes Messprotokoll, Labor Köhler.

20 Projektinternes Messprotokoll, Labor Köhler.

21 Grunert, 2007b, S. 38.

22 Grunert, 2007b, S. 38.

23 Grunert, 2007a, S. 10.

Air pulses (N):	1
Filling volume (mm ³):	450
Preparation selection:	AutoMatic
Blank Max pressure (MPa):	400
Blank Increase speed:	6 - 19 MPa/min
Blank Increase method:	Pascal
Blank Decrease speed:	9 - 36 MPa/min
Blank Decrease method:	Pascal
Dil, number:	71
Dil, type:	CD3
Dil, Cone length (mm):	26
Dil, Electrode gap (mm):	5
Dil, stem radius (mm):	1,5
Dil, weight (g):	60,71
Temperature of blank (°C):	24,9
Mercury density @ blank (g/cm ³):	13,5342
Blank filling volume (mm ³):	483
Starting hydr, blank press, (MPa):	0,013243
(Dil+Hg) weight (g):	172,56

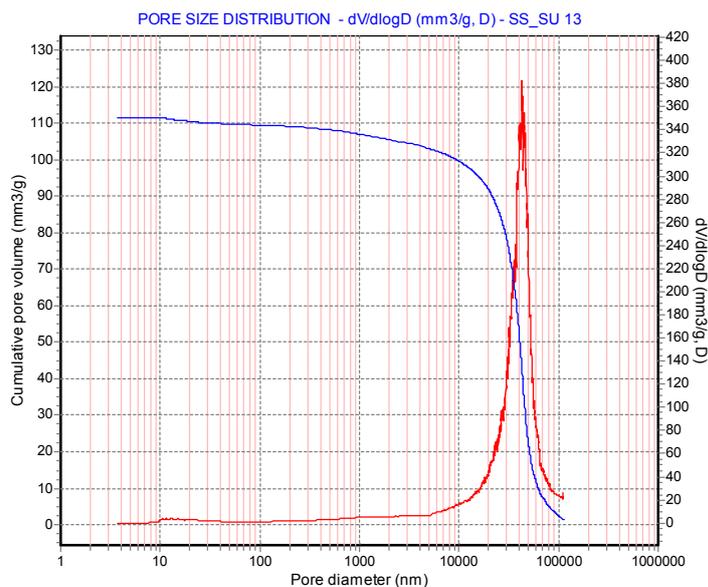
RESULTS WITHOUT COMPRESSIB, CORR,

Total intruded volume (mm ³ /g):	111,54
at pressure of MPa:	400,7123
Bulk density (g/cm ³):	2,092
Envelope density (g/cm ³):	2,0976
at pressure of MPa:	0,013
Intrud, Vol, (mm ³):	2,34
Apparent density (g/cm ³):	2,7287
at pressure of MPa:	400,7123
Spec, Vol, by skeleton dens, (mm ³ /g) Vd:	-521,99
Porosity by skeleton density (%):	-109,2
Porosity by Hg intrusion (%):	23,33
Inaccessible porosity (%):	-132,53

TOTAL PORE SIZE

Calc, press, range (MPa):	0,0 to 400,712
Total pore volume (mm ³ /g):	111,54
Total pore surface area (m ² /g):	0,503
Average pore diameter (µm):	0,8865
Median pore diameter (µm):	39,1077
Modal pore diameter (µm):	41,808

Sandstein SU 13



A.3 Parameter der WUFI Simulation

Tabelle A2: In WUFI Simulation verwendete Parameter von Cottaer Sandstein²⁴

	Cottaer Sandstein
Dichte [kg/m ³]	2050
Porosität [m ³ /m ³]	0,22
Wärmekapazität [J/kgK]	850
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	1,8

²⁴ Snethlage & Utz, 2021, S. 3.

Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

B.1 Allgemeine Messparameter

Tabelle 1: Überblick über die für die Messreihen ausgewählten Skulpturen, deren Material, Fertigungsjahr und Exposition, sowie Datum der Messungen (US: Ummendorfer Sandstein, CS: Cottaer Sandstein).¹

Skulptur	Material	Entstehungs-jahr	Ex-position	Sonne	Datum	Luft-temperatur	rF	Bemerkung der Messenden ²
F21	CS	Original 1769	Süd	Fast ganzer Tag	26.07.19	22 °C	49 %	Sockelmessungen problematisch, kaum Signal bei langen Distanzen
Vestalin mit Opferaltar					12.02.20	2-7 °C	57-65 %	
					27.05.20	27°C	44 %	
					19.10.20	9,8°C	82 %	
					20.01.22	3,5 °C	55 %	
F26	CS	Original 1760	Ost	stark	16.07.19	20 °C	50 %	
Pomona					12.02.20	2-7 °C	57-65 %	
					27.05.20	24°C	46 %	
					19.10.20	11,1°C	73 %	
					20.01.22	9,7°C	48,1 %	
F8a	CS	Original 1769	West	wenig	18.07.19	20 °C	51 %	
Weinende Nympe					12.02.20	2-7 °C	57-65 %	
					27.05.20	25,7°C	33,9 %	

1 Daten aus projektinternen Messprotokollen

2 Notizen von Lale von Baudessin zur Durchführung der Messungen

Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

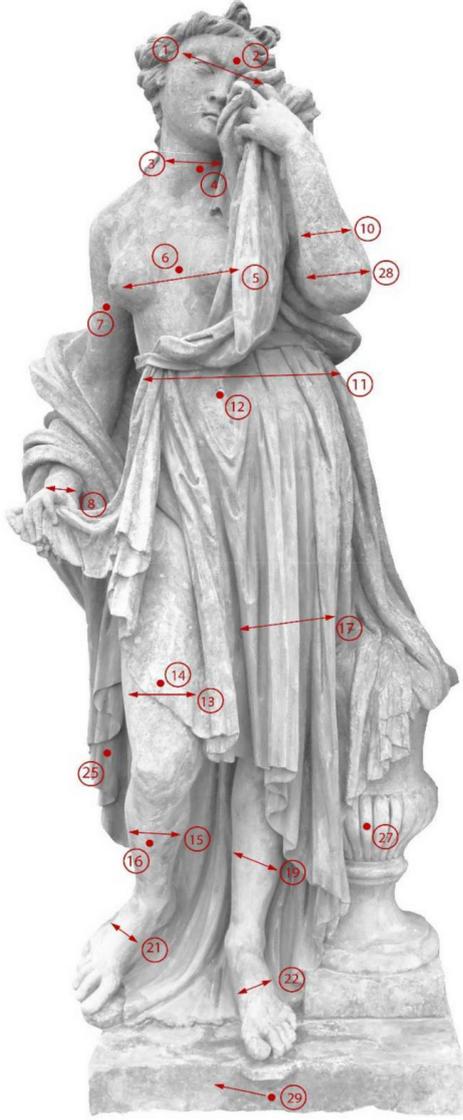
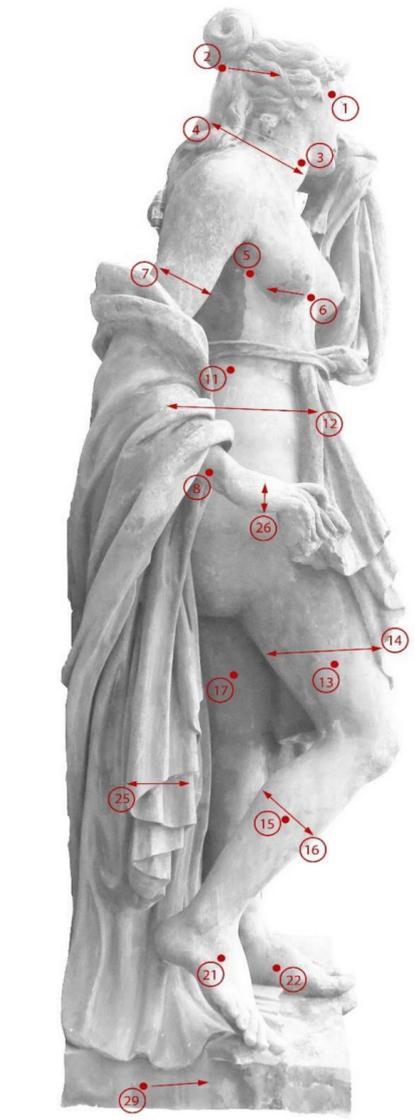
					19.10.20	9,8 °C	82 %	
					19.01.22	4,5 °C	75,7 %	
F8b	CS	Kopie 2015	West	halber Tag	18.07.19	19 °C	54 %	
Nymphe mit Habicht					12.02.20	2-7 °C	57-65 %	
					27.05.20	25,7 °C	33,9 %	
					19.10.20	8,7 °C	94 %	
					20.01.22	1,3 °C	57,3 %	
HD21	US	Original 1769	Nord	wenig	19.07.19	23 °C	54 %	Messung problematisch, Skulptur im Schatten, fast kein Messsignal
Weibliche Gewandfigur					12.02.20	2-7 °C	57-65 %	
					27.05.20	22 °C	30 %	
					19.10.20	10,4 °C	69 %	
					19.01.22	3,8 °C	81,7 %	
HD3	US	Original 1769	West	wenig	19.07.19	24 °C	53 %	Skulptur befindet sich im sogenannten „Eishof“, viel biogener Bewuchs immer feucht, Messsignale zu bekommen war sehr problematisch
Pomona mit Baumstaffage					12.02.20	2-7 °C	57-65 %	
					27.05.20	22 °C	39 %	
					19.10.20	10,6 °C	72 %	
					19.01.22	4,3 °C	83 %	
HD8a	CS	Kopie 2016	West	halber Tag	19.07.19	23 °C	55 %	
Nymphe mit Pfeil					12.02.20	2-7 °C	57-65 %	

Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

					28.05. 20	17 °C	45 %	Messung schwierig umso größer die Abstände umso schwerer
					19.10. 20	9,8°C	82 %	
					19.01. 22	3°C	86%	
HD8b	US	Original 1769	West	wenig	19.07. 19	22 °C	55 %	
Nymphe mit Gewand und Rosen					12.02. 20	2-7 °C	57-65 %	
					28.05. 20	16 °C	46 %	
					19.10. 20	8,7°C	94 %	
					19.01. 22	3,3°C	82 %	

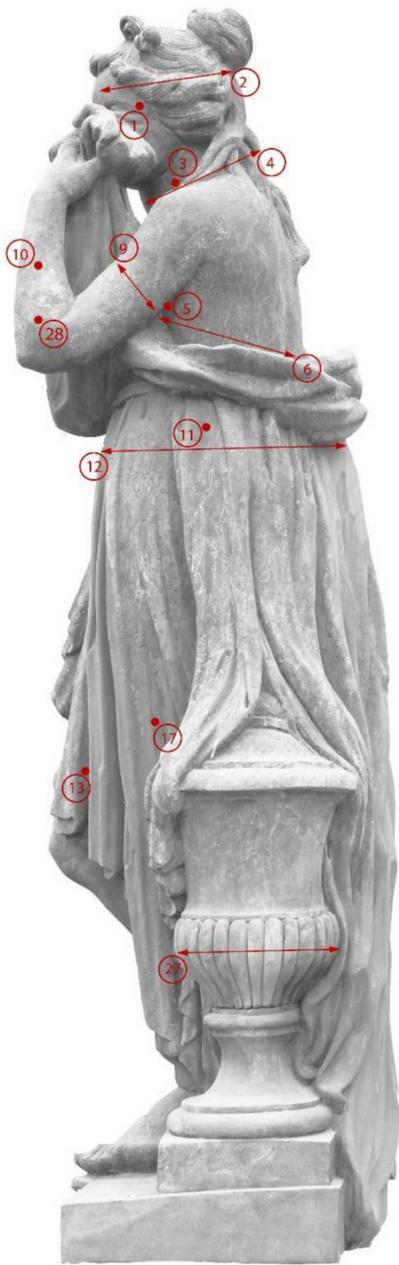
B.2 Messpunkte der Skulpturenmessungen³

Ultraschallmesspunkte:

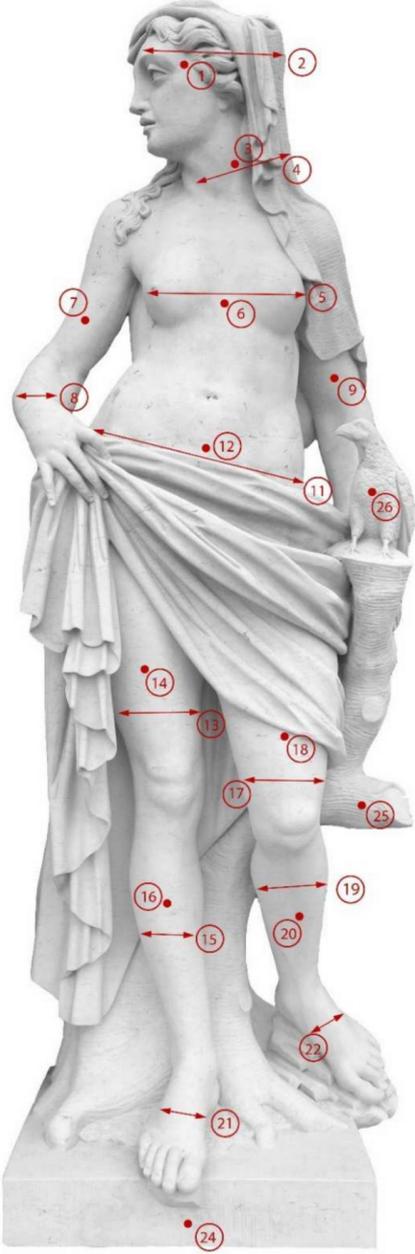
<p>Ultraschallmesspunkte Standort: Potsdam, Neues Palais – Friedrichsflügel - Westseite</p>	<p>Figur: F8a Weinende Nymphe Messungszeitraum: 2019-2020</p>
 <p>Ansicht 1</p>	 <p>Ansicht 2</p>
<p>Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01</p>	<p>Teilnehmende Institutionen:</p> 

3 Projektinternes Messprotokoll, Labor Köhler, 2022.

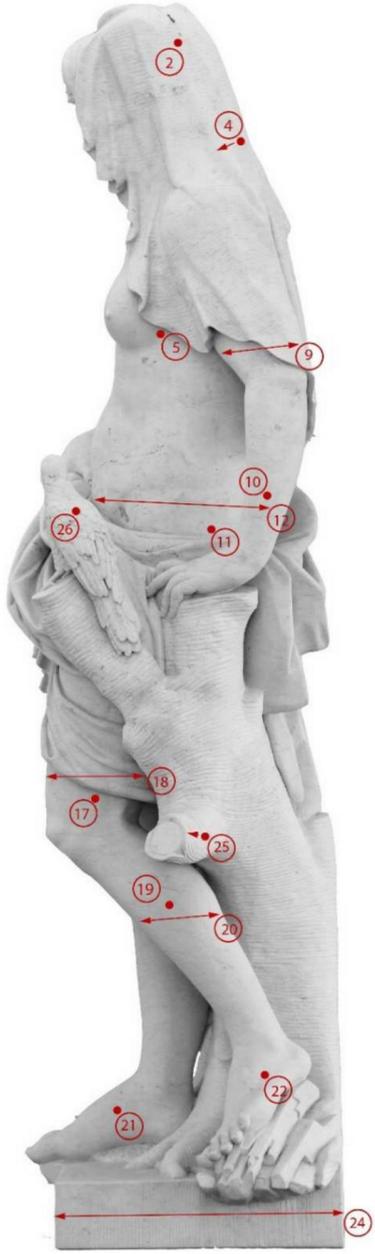
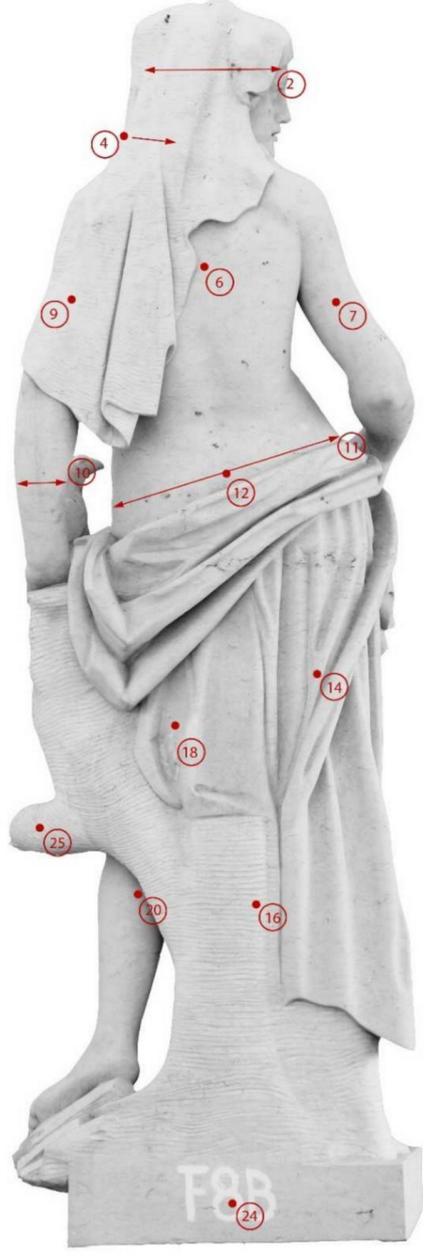
Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

<p>Ultraschallmesspunkte</p> <p>Standort: Potsdam, Neues Palais – Friedrichsflügel - Westseite</p>	<p>Figur: F8a Weinende Nymphe</p> <p>Messungszeitraum: 2019-2020</p>
	
<p>Ansicht 3</p> <p>Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01</p>	<p>Ansicht 4</p> <p>Teilnehmende Institutionen:</p> 

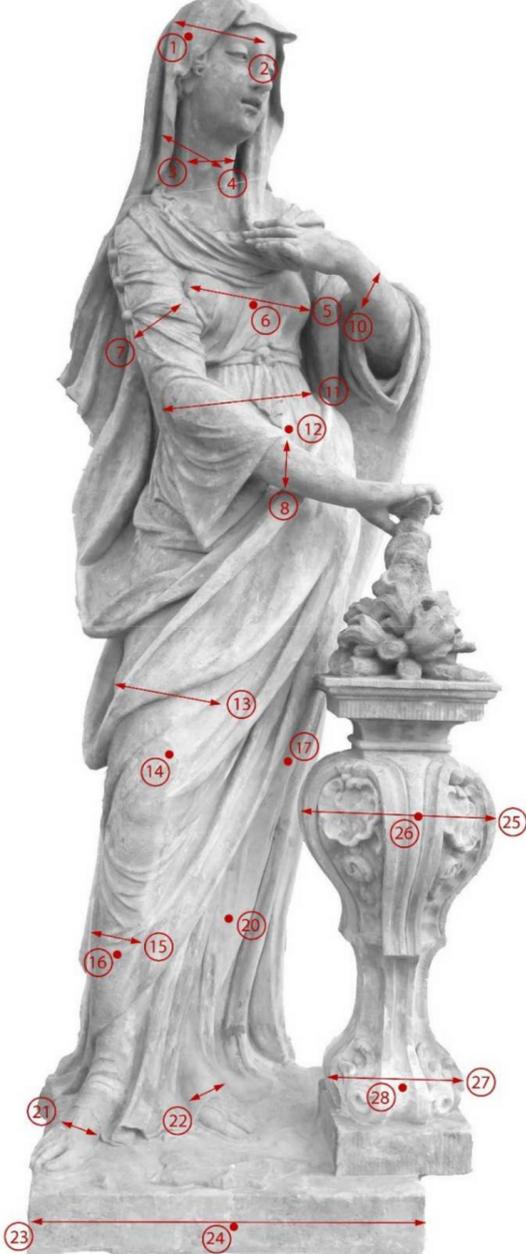
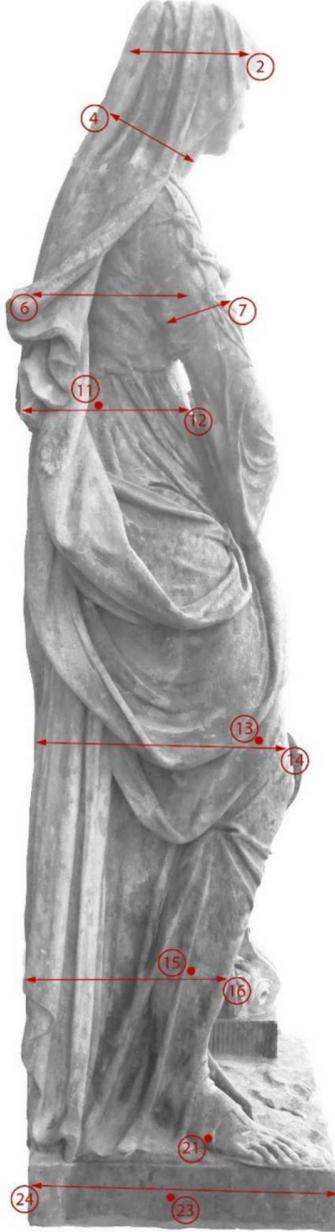
Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

<p>Ultraschallmesspunkte Standort: Potsdam, Neues Palais – Friedrichsflügel - Westseite</p>	<p>Figur: F8b Nympe mit Habicht Messungszeitraum: 2019-2020</p>
	
<p>Ansicht 1 Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01</p>	<p>Ansicht 2 Teilnehmende Institutionen:    </p>

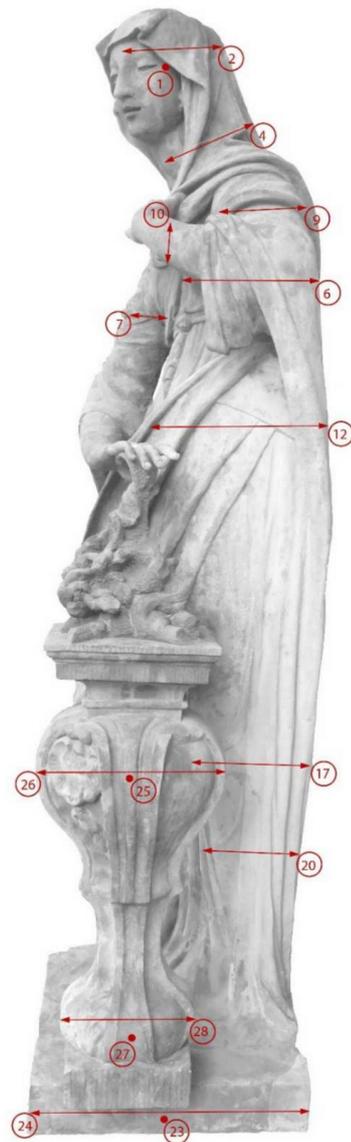
Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

<p>Ultraschallmesspunkte</p>	<p>Figur: F8b Nympe mit Habicht</p>
<p>Standort: Potsdam, Neues Palais – Friedrichsflügel - Westseite</p>	<p>Messungszeitraum: 2019-2020</p>
	
<p>Ansicht 3</p>	<p>Ansicht 4</p>
<p>Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01</p>	<p>Teilnehmende Institutionen:</p> 

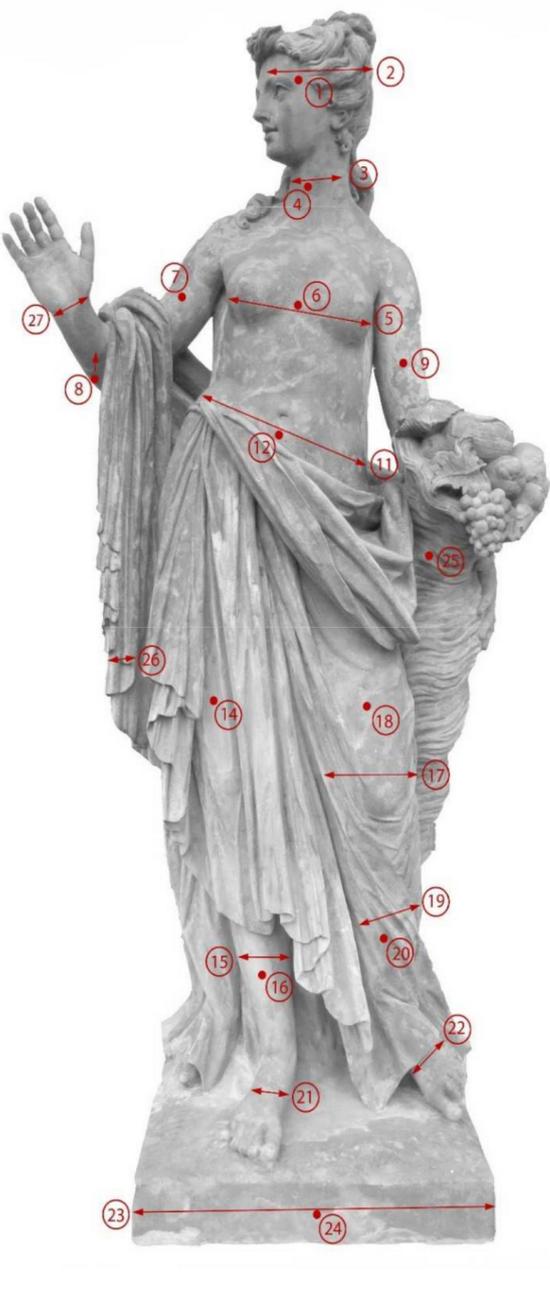
Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

<p>Ultraschallmesspunkte</p> <p>Standort: Potsdam, Neues Palais – Friedrichsflügel- Südseite</p>	<p>Figur: F21 Vestalin mit Opferaltar</p> <p>Messungszeitraum: 2019-2020</p>
 <p>Ansicht 1</p>	 <p>Ansicht 2</p>
<p>Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01</p>	<p>Teilnehmende Institutionen:</p> 

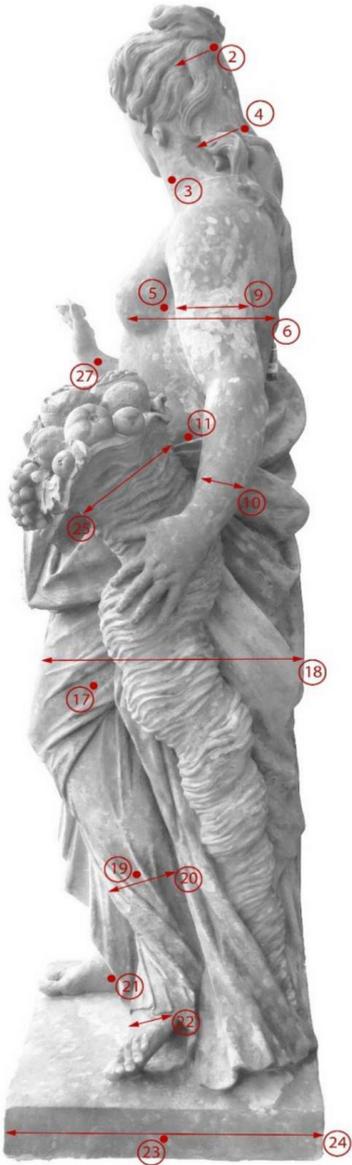
Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

<p>Ultraschallmesspunkte Standort: Potsdam, Neues Palais – Friedrichsflügel-Südseite</p>	<p>Figur: F21 Vestalin mit Opferaltar Messungszeitraum: 2019-2020</p>
 <p>Ansicht 3</p>	 <p>Ansicht 4</p>
<p>Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01</p>	<p>Teilnehmende Institutionen:</p> 

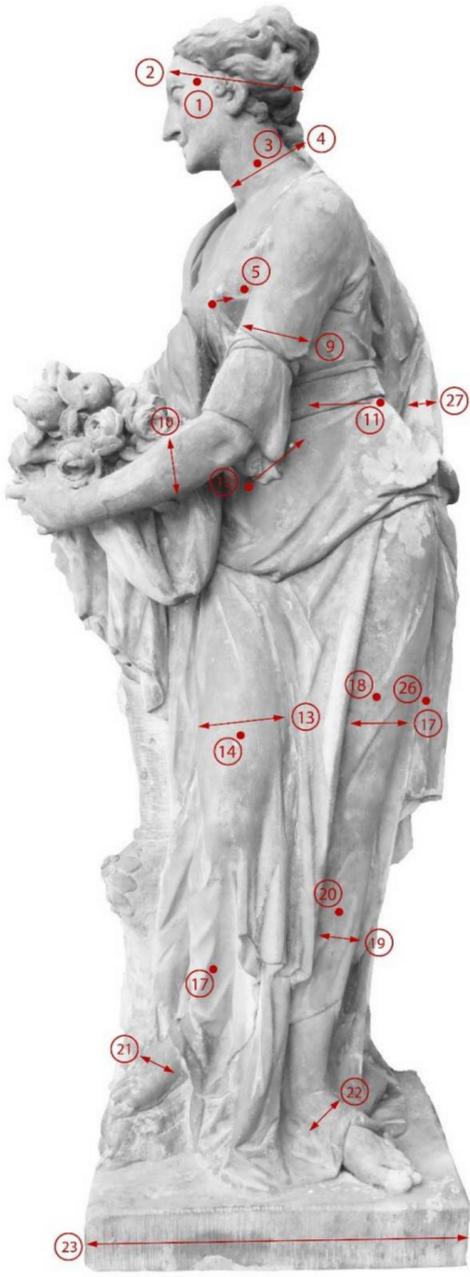
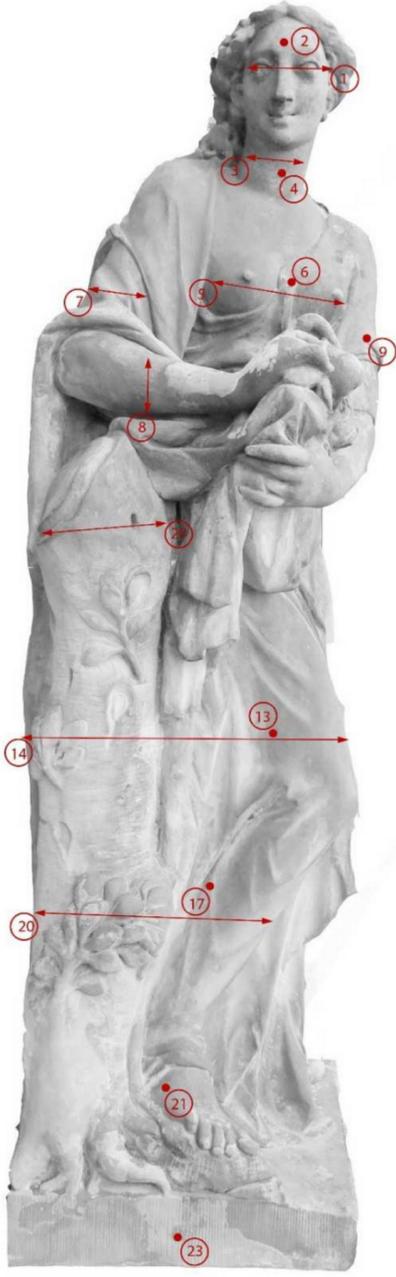
Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

<p>Ultraschallmesspunkte</p> <p>Standort: Potsdam, Neues Palais – Friedrichsflügel- Ostseite</p>	<p>Figur: F26 Pomona</p> <p>Messungszeitraum: 2019-2020</p>
	
<p>Ansicht 1</p> <p>Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01</p>	<p>Ansicht 2</p> <p>Teilnehmende Institutionen:</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">     </div>

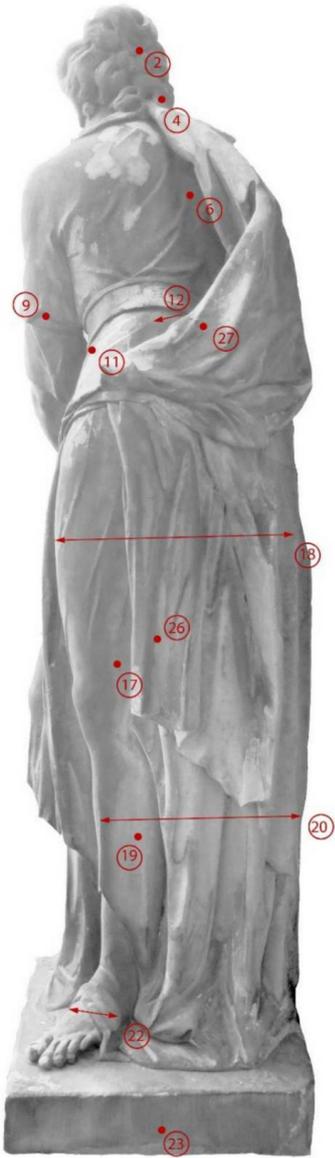
Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

Ultraschallmesspunkte	Figur: F26 Nymphe Gewand Rose
Standort: Potsdam, Neues Palais – Friedrichsflügel-Ostseite	Messungszeitraum: 2019-2020
	
Ansicht 3	Ansicht 4
Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01	Teilnehmende Institutionen:    

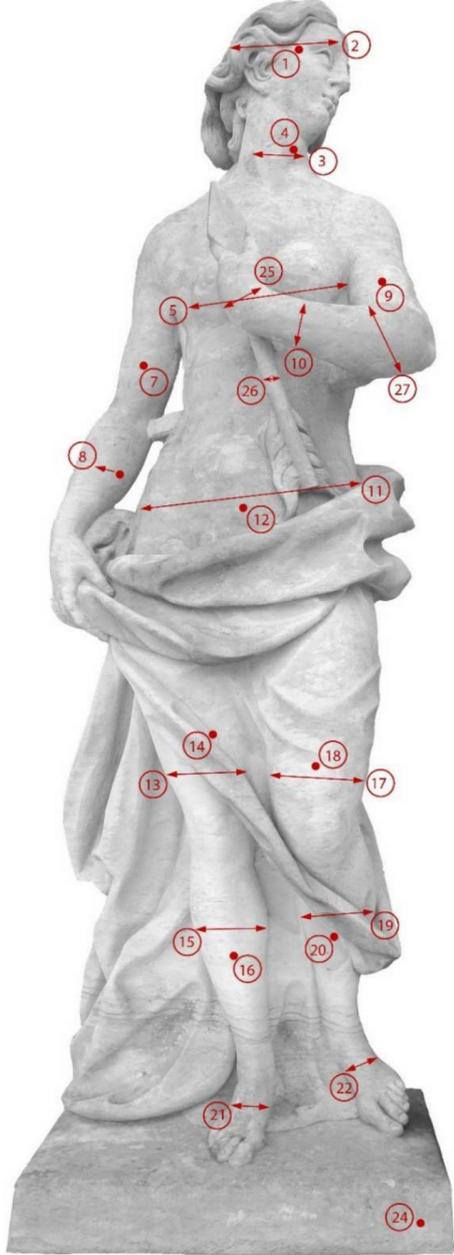
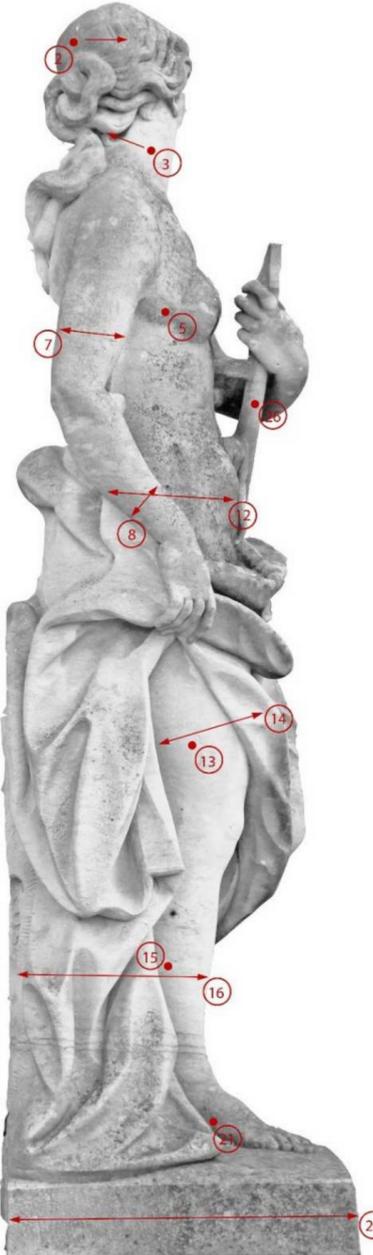
Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

<p>Ultraschallmesspunkte</p> <p>Standort: Potsdam, Neues Palais – Hofdamenflügel-Westseite</p>	<p>Figur: HD3 Pomona mit Baumstaffage</p> <p>Messungszeitraum: 2019-2020</p>
 <p>Ansicht 1</p>	 <p>Ansicht 2</p>
<p>Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01</p>	<p>Teilnehmende Institutionen:</p> 

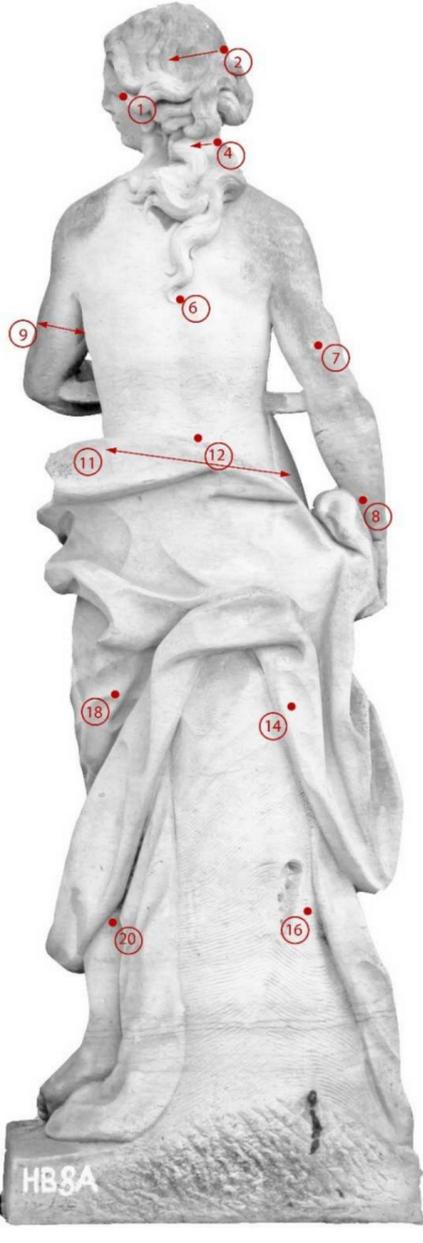
Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

<p>Ultraschallmesspunkte Standort: Potsdam, Neues Palais – Hofdamenflügel-Westseite</p>	<p>Figur: HD3 Pomona mit Baumstaffage Messungszeitraum: 2019-2020</p>
 <p>View 3 of the statue showing measurement points 2, 4, 6, 9, 11, 12, 18, 17, 19, 20, 22, and 23. Red arrows indicate horizontal measurements at points 18 and 20.</p>	 <p>View 4 of the statue showing measurement points 2, 4, 7, 14, 18, 20, 23, and 25. Red arrows indicate horizontal measurements at points 23 and 25.</p>
<p>Ansicht 3 Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01</p>	<p>Ansicht 4 Teilnehmende Institutionen:</p> 

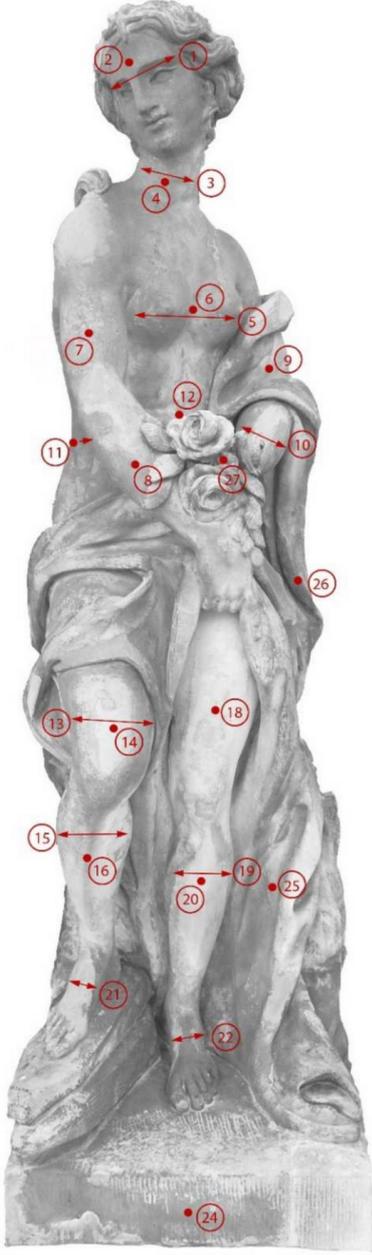
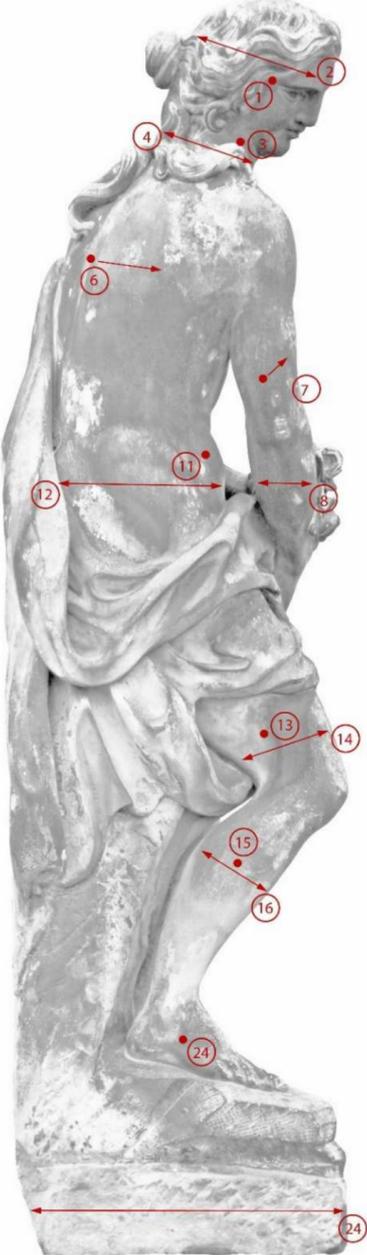
Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

<p>Ultraschallmesspunkte Standort: Potsdam, Neues Palais – Hofdamenflügel - Westseite</p>	<p>Figur: HD8a Nympe mit Pfeil Messungszeitraum: 2019-2020</p>
	
<p>Ansicht 1 Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01</p>	<p>Ansicht 2 Teilnehmende Institutionen:    </p>

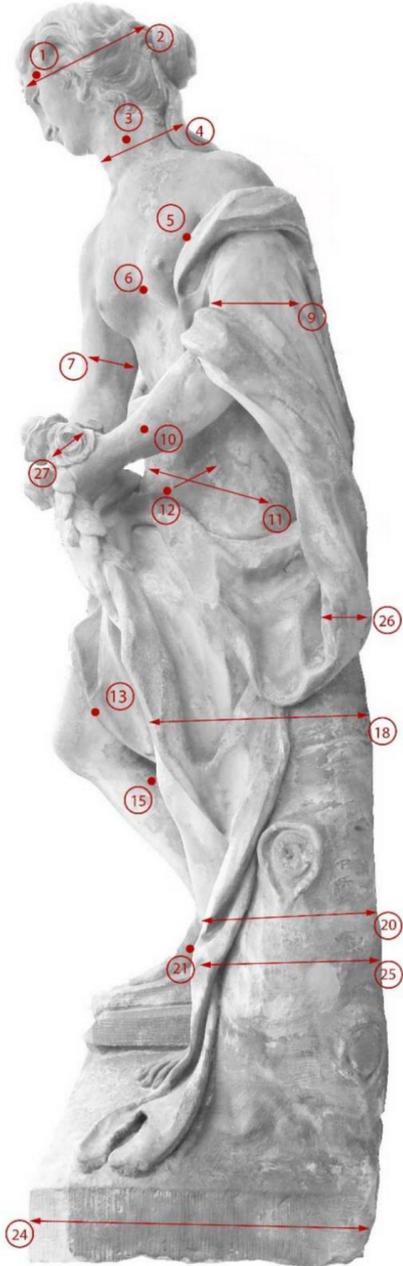
Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

<p>Ultraschallmesspunkte</p> <p>Standort: Potsdam, Neues Palais – Hofdamenflügel - Westseite</p>	<p>Figur: HD8a Nymphe mit Pfeil</p> <p>Messungszeitraum: 2019-2020</p>
 <p>Ansicht 3</p>	 <p>Ansicht 4</p>
<p>Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01</p>	<p>Teilnehmende Institutionen:</p> 

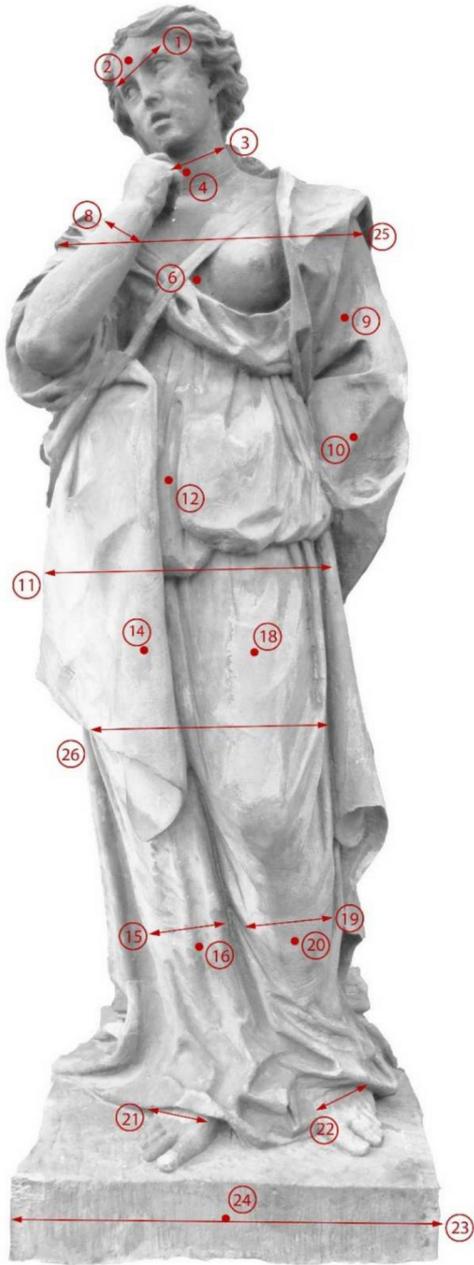
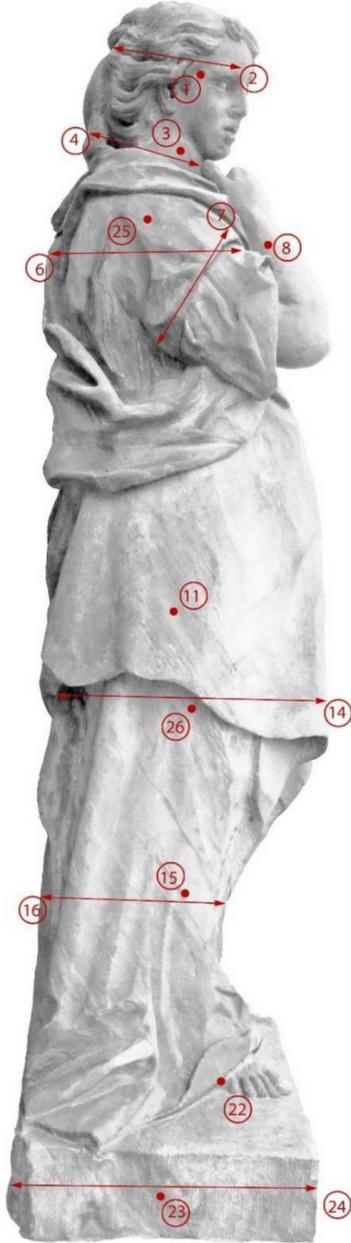
Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

<p>Ultraschallmesspunkte Standort: Potsdam, Neues Palais – Hofdamenflügel - Westseite</p>	<p>Figur: HD8b Nympe Gewand Rose Messungszeitraum: 2019-2020</p>
	
<p>Ansicht 1</p>	<p>Ansicht 2</p>
<p>Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01</p>	<p>Teilnehmende Institutionen:</p> 

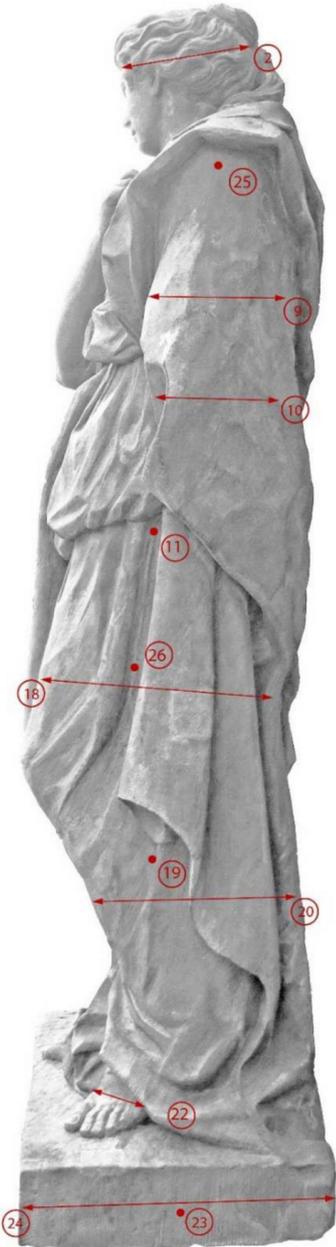
Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

<p>Ultraschallmesspunkte Standort: Potsdam, Neues Palais – Hofdamenflügel - Westseite</p>	<p>Figur: HD8b Nympe Gewand Rose Messungszeitraum: 2019-2020</p>
 <p>Ansicht 3</p>	 <p>Ansicht 4</p>
<p>Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01</p>	<p>Teilnehmende Institutionen:</p> 

Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

<p>Ultraschallmesspunkte Standort: Potsdam, Neues Palais – Hofdamenflügel - Nordseite</p>	<p>Figur: HD21 Weibliche Gewandfigur Messungszeitraum: 2019-2020</p>
 <p>Ansicht 1</p>	 <p>Ansicht 2</p>
<p>Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01</p>	<p>Teilnehmende Institutionen:</p> 

Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

<p>Ultraschallmesspunkte</p> <p>Standort: Potsdam, Neues Palais – Hofdamenflügel - Nordseite</p>	<p>Figur: HD21 Weibliche Gewandfigur</p> <p>Messungszeitraum: 2019-2020</p>
 <p>Ansicht 3</p>	 <p>Ansicht 4</p>
<p>Projektname: DBU Projekt, Feuchtigkeitsabhängigkeit von Ultraschallmessungen AZ 34558/01</p>	<p>Teilnehmende Institutionen:</p> 

B.3 Klimatische Rahmenbedingungen der Skulpturenmessungen

Tabelle 2: Übersicht der Termine der Messungen der Skulpturen des Neuen Palais mit klimatischen Rahmenbedingungen (DWD, 2022).

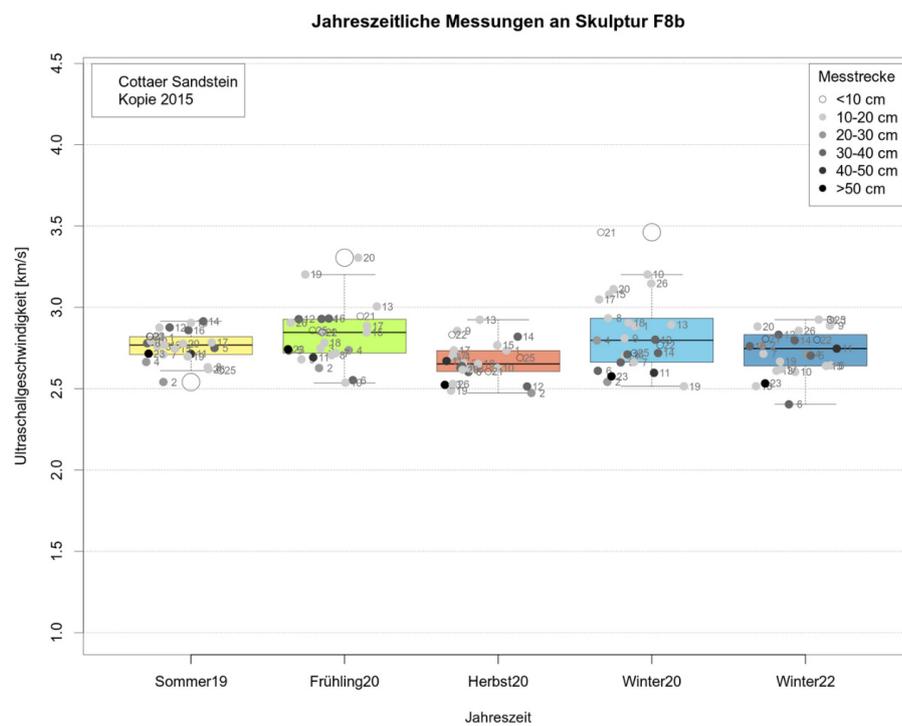
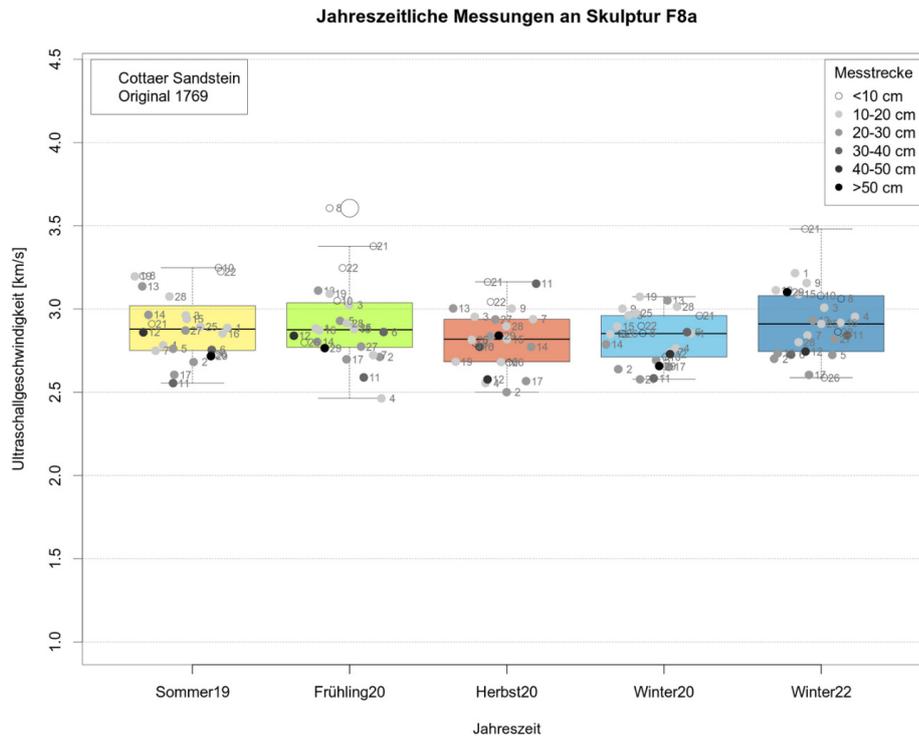
Sommer 2019				
Niederschläge bis 10 Tage vor der Messung: ⁴			<u>06.07.2019</u> 18:00-20:00 Regen bis zu 5.2 mm <u>12.07.2019</u> 17:00 – 18:00 leichter Regen bis zu 2.1 mm <u>13.07.2019</u> 19:00-22:00 Regen bis zu 8.8 mm	
Datum	Skulpturen	Temp. [°C]	Rel. Feuchte [%]	Niederschlag
16.07.2019	F26	20 °C	50 %	leichter Regen 2-6 Uhr bis 0.1 mm
18.07.2019	F8a, F8b	19-20 °C	51-54 %	
19.07.2019	HD3, HD8a, HD8b, HD21	22-24 °C	53-55 %	
20.07.2019			21:00-23:00 Regen bis zu 13 mm	
26.07.2019	F21	22 °C	49 %	
Frühling 2020				
Niederschläge bis zu 10 Tage vor der Messung: ¹			17.05.2020 2:00 bis 3:00 bis zu 0.2 mm 24.05.2020 9:00 -14:00 Regen mit bis zu 2.4 mm	
27.05.2020	F8a, F8b, F21, F26, HD3, HD21	22 - 27°C	30 - 46 %	
28.05.2020	HD8a, HD8b	16 - 17 °C	45 – 46%	
Herbst 2020				

4 Niederschlagsdaten des Deutscher Wetterdienstes:

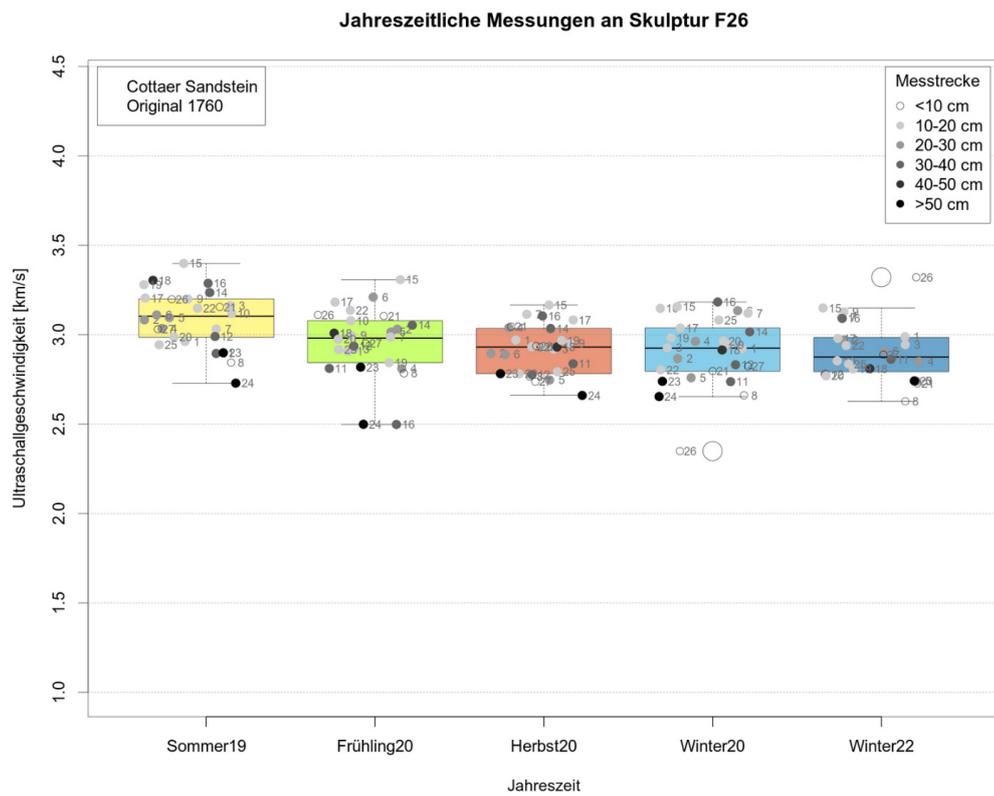
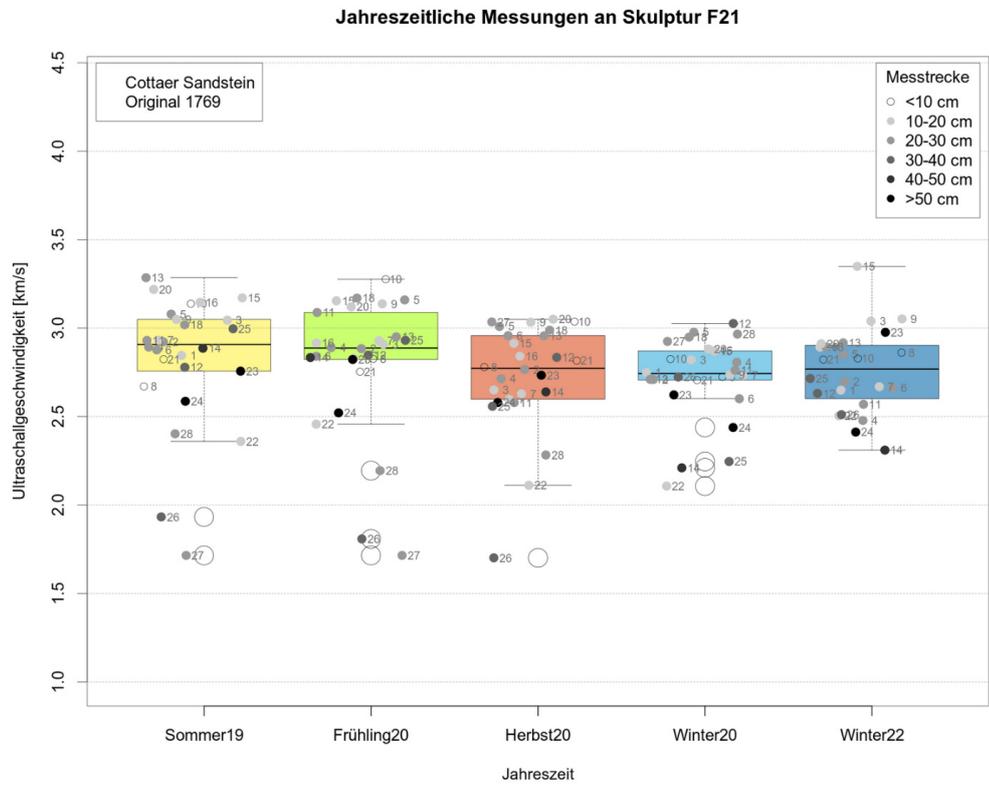
Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

Niederschläge bis zu 10 Tage vor der Messung: ¹			09.10.2020 19-22 Uhr 1.1 mm 1:00-03:00 0.8 14.05.2020 ganzen Tag regnerisch bis zu 2.5 mm 15.10.2020 ganzen Tag leicht regnerisch bis zu 0.6 mm 16.10.2020 13:00, 19:00 0.1 mm 18.10.2020 14 – 15:00 leichter Regen bis zu 2.3 mm	
19.10. 2020	F8a, F8b, F21, F26, HD3, HD8a, HD8b, HD21	8,7- 11,1°C	69-94 %	1:00 -6:00 Regen bis zu 0.1 mm
Winter 2020				
Niederschläge bis 10 Tage vor der Messung: ¹			10.02.2020 regnerisch 3 Uhr 6.5 mm bis 17 Uhr Niederschläge bis 2.1 mm wechselhaft, 11.02.2020 früher morgen 2 Uhr noch leichter Regen mit bis zu 0.4 mm	
12.02. 2020	F8a, F8b, F21, F26, HD3, HD8a, HD8b, HD21	2-7 °C	57-65 %	
Winter 2022				
Niederschläge bis 10 Tage vor der Messung: ¹			16.01.2022 19-23 Uhr, leichter Niederschlag bis zu 0.1 mm 17.01.2022 10-11 Uhr Niederschlag bis 3,4 mm	
19.01. 2022	F8a, HD3, HD8a, HD8b, HD21	3 -4,5°C	75,7-86 %	
20.01. 2022	F8b, F21, F26	1,3 - 9,7°C	48,1 - 57,3 %	

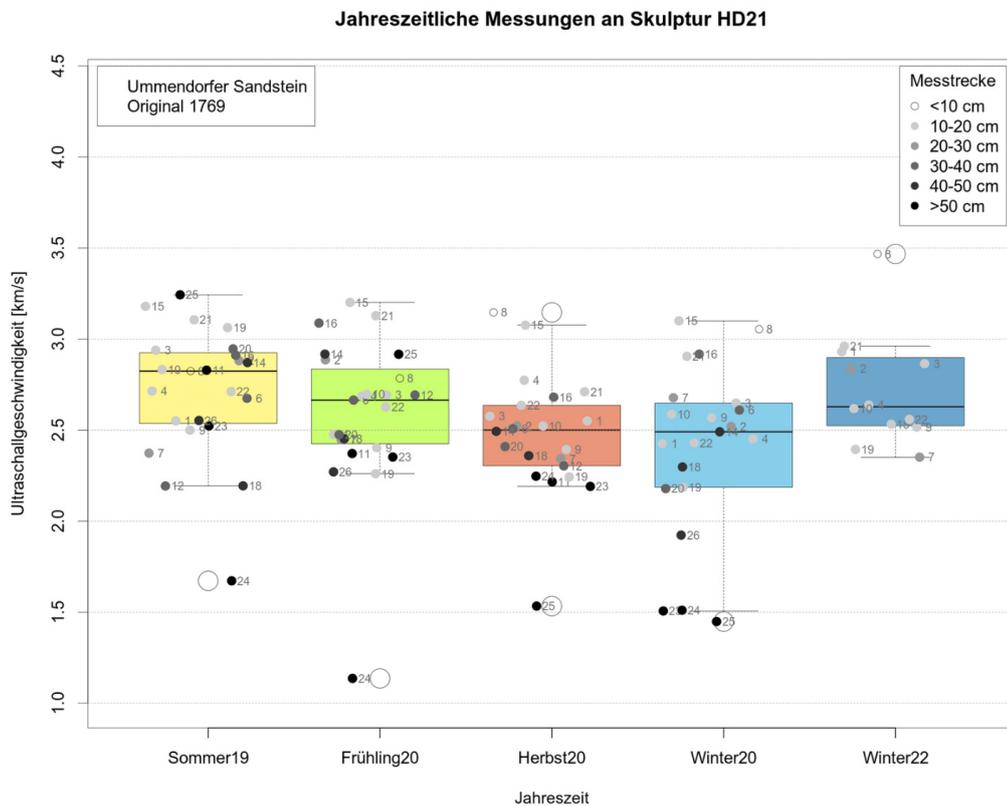
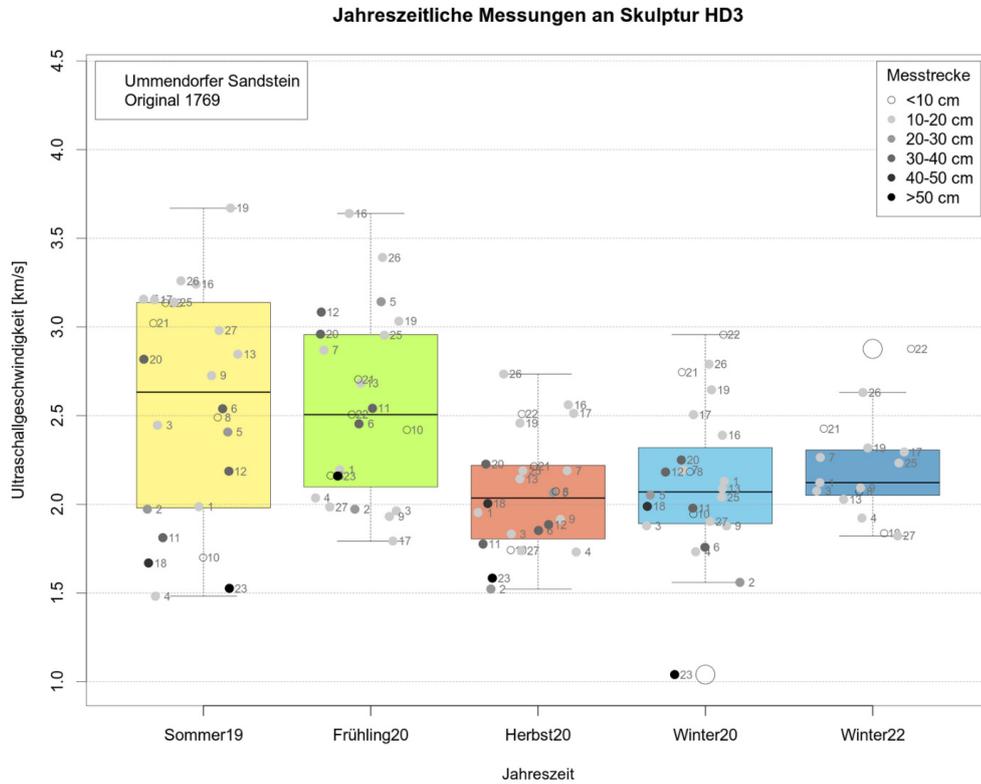
B.4 Box-Whisker-Diagramme der jahreszeitlichen Skulpturenmessungen



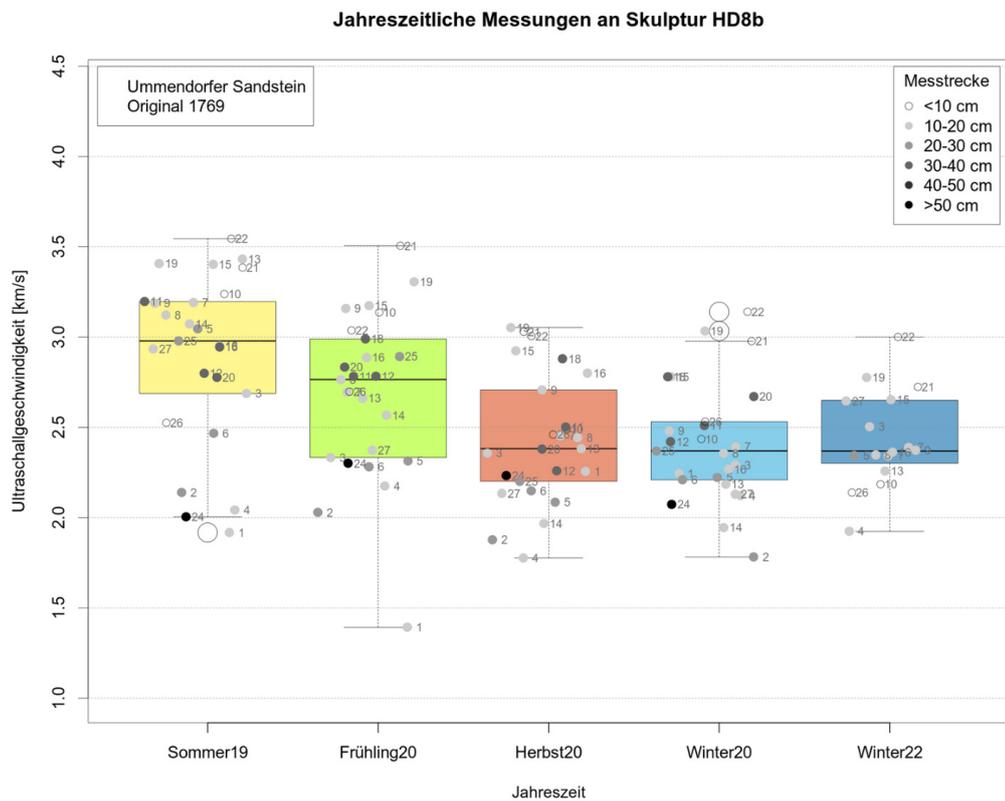
Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais



Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais



Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais



B.5 Ergebnisse der jahreszeitlichen Skulpturenmessungen

Tabelle 3: Messwerte der Messungen für Frühling, Sommer, Herbst und Winter an der Skulptur F21

Messpunkt	Distanz	Sommer19	Frühling20	Herbst20	Winter20	Winter22
1	16,5	2846,32	2829,93	2598,3	2749,94	2649,59
2	25	2922,51	2884,49	2766,44	2709,85	2697,79
3	10,6	3045,34	2909,09	2650,86	2821,41	3039,89
4	20,6	2893,3	2890,63	2714,35	2807,25	2478,22
5	25,7	3079,55	3159,93	3009,76	2977,32	2851,61
6	29,5	2877,31	2841,11	2958,16	2601,4	2662,33
7	13,7	2931,83	2928,98	2628,95	2733,34	2669,29
8	7,7	2670,9	2826,63	2780,39	2724,27	2861,8
9	18,3	3049,67	3137,79	3033,82	2737,1	3052,49
10	7,1	3138,45	3277	3037,3	2825,54	2828,12
11	28	2930,9	3088,68	2579,41	2762,2	2569,87
12	31	2779,33	2847,83	2834,86	3026,63	2631,86
13	21	3285,52	2951,21	2957,21	2711,1	2917,23
14	42	2886,76	2834,09	2639,87	2210,53	2310,83
15	13,6	3171,45	3154,86	2913,95	2869,5	3349,72
16	14,5	3146,01	2915,81	2841,86	2872,31	2893,06
17						
18	22,7	3019,2	3170,36	2988,73	2949,38	2894,54
19						
20	19,6	3219,33	3121,19	3050,68	2882,22	2912,25
21	8	2824,68	2753,94	2817	2706,36	2822,73
22	10,4	2359,91	2457,48	2111,85	2107,18	2504,64
23	65,5	2757	2823,24	2734,09	2622,9	2976,6
24	53	2586,83	2521,52	2579,8	2438,63	2412,81
25	34,5	2996,92	2931,53	2558,51	2246,39	2715,63
26	35	1933,09	1808,89	1702	2724,02	2510,91
27	23	3035	3035	3035,26	2925,32	
28	24,2	2402,88	2194,84	2283,19	2966,55	

Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

Tabelle 4: Messwerte der Messungen für Frühling, Sommer, Herbst und Winter an der Skulptur F26

Messpunkt	Distanz	Sommer19	Frühling20	Herbst20	Winter20	Winter22
1	14,7	2962,34	2907,63	2970,48	2921,96	2989,79
2	24,5	3083,1	3031,41	2895,74	2866,84	2971,29
3	12,8	3162,48	2919,98	2919,97	2927,86	2944,24
4	20,9	3035,14	2810,74	3039,38	2962,92	2851,22
5	29,7	3096,31	3015,72	2747,15	2759,72	2740,42
6	29	3110,68	3210,9	2889,66	3134,86	2909,41
7	12,5	3031,43	2987,52	3114,41	3120,39	3097,51
8	9	2844,68	2784,31	2766	2661,08	2627,88
9	13,7	3200,45	2995,41	2953,1	2944,99	3127,97
10	10,4	3118,88	3078,64	2931,56	3147,68	2854,25
11	39,1	2895,37	2812,09	2837,86	2737,75	2862,83
12	35,4	2990,73	2936,48	2777,17	2832,41	2779,48
13						
14	37	3236,22	3053,74	3035,15	3016,31	
15	11,1	3398,57	3308,24	3166,27	3157,22	3149,69
16	34,9	3287,81	2498,55	3105,26	3183,43	3091,42
17	19,7	3205,18	3182,69	3082,32	3038,04	2979,6
18	49,2	3304,56	3008,75	2931,45	2915,13	2810,45
19	15,7	3280,48	2843,93	2968,26	2982,99	2808,49
20	13,2	2986,38	2974,9	2782,17	2965,47	2770,42
21	7,2	3155,12	3104,78	3045,04	2796,42	2727,24
22	10,1	3148,52	3137,03	2932,55	2804,15	2939,65
23	66,5	2899,27	2819,15	2782,46	2739,75	2742,3
24	53,5	2729,34	2499,46	2660,8	2654,42	
25	18,1	2944,03	2916,55	2793,04	3082,13	2836,59
26	4,3	3198,8	3110,76	2936,16	2349,69	3321,61
27	7,4	3031,3	2951,91	2737,8	2823,62	2889,07

Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

Tabelle 5: Messwerte der Messungen für Frühling, Sommer, Herbst und Winter an der Skulptur F8a

Messpunkt	Distanz	Sommer19	Frühling20	Herbst20	Winter20	Winter22
1	17,2	2887,46	2884,74	2837,53	2853,26	3215,98
2	28	2681,9	2712,45	2501,32	2638,96	2701,66
3	14	2962,53	3025,24	2953,96	2963,02	3008,79
4	18,3	2782,33	2463,83	2555,87	2764,55	2953,83
5	28,4	2761,77	2929,53	2837,64	2693	2724,93
6	31,5	2755,09	2862,29	2773,47	2861,61	2726,93
7	12	2749,96	2723,74	2939,38	2740,35	2842,28
8	8,2	3199,5	3606,64	2794,15	2855,18	3062,43
9	12			3003,6	3002,93	3157,29
10	8,2	3248,39	3050,06	2774,11	2712,71	3080,9
11	34,5	2555,28	2589,7	3152,99	2584,19	2843,61
12	41,7	2860,51	2840,12	2577,72	2729,74	2745,25
13	21,7	3136,68	3111,43	3004,58	3052,35	2932,31
14	22,4	2965,76	2803,37	2773,31	2788,02	2735,09
15	13,2	2940,91	2879,96	2818,95	2895,92	3089
16	14,5	2854,12	2872,38	2681,86	2850	2918,14
17	24,4	2605,56	2698,48	2567,53	2653,05	2604,79
18						
19	12,4	3196,78	3092,54	2683,87	3074,21	3113,49
20						
21	7,3	2911,38	3377,93	3163,32	2961,01	3481,79
22	8,4	3225,31	3247,13	3043,92	2898,97	2863,05
23						
24						
25	12,8	2894,72	2887,65	2815,66	2975,78	2911,21
26	5,8	2728,5	2799,22	2679,11	2852,88	2588,13
27	28,3	2871,4	2774,81	2938,09	2578,26	2820,01
28	12,4	3075,93	2914,62	2897,06	3015,03	2801,25
29	62	2717,43	2765,89	2841,04	2658,18	3102,06

Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

Tabelle 6: Messwerte der Messungen für Frühling, Sommer, Herbst und Winter an der Skulptur F8b

Messpunkt	Distanz	Sommer19	Frühling20	Herbst20	Winter20	Winter22
1	16,5	2814,7	2847,99	2735,18	2884,72	2916,96
2	27,5	2541,14	2627,49	2474,02	2542,04	2768,3
3	12,8	2760,5	2747,19	2657,7	2700,48	2925,33
4	23,3	2664,41	2736,62	2698,38	2797,54	2712,32
5	30,8	2750,83	2734,8	2627,9	2661,57	2703,87
6	32,5	2779,74	2553,08	2603,17	2610,24	2404,3
7	11,9	2709,96	2718,95	2703,69	2662,87	2715,44
8	11,8	2632,91	2706,51	2621,87	2933,49	2643,77
9	15,3	2876,11	2680,62	2856,02	2810,29	2887,52
10	10,6	2793,76	2536,8	2628,58	3202,44	2603,91
11	44	2714,5	2692,55	2670,86	2598,09	2747,02
12	33,8	2876,9	2927,82	2514,1	2801,63	2832,62
13	12,1	2768,83	3005,99	2923,91	2893,98	2610,53
14	39	2914,8	2929,32	2819,81	2719,85	2797,57
15	13,7	2745,78	2846,34	2767,12	3080,34	2640,78
16	37,8	2860,14	2931,55	2639,61	2710,96	2761,67
17	16,1	2784,66	2885,78	2736,28	3048,9	2620,07
18	19,8	2905,32	2782,25	2653,09	2906,23	2515,52
19	13,4	2697,6	3202,62	2488,58	2515,08	2667,53
20	13,1	2777,14	3306,02	2616,91	3112,88	2882,55
21	9,4	2820,35	2946,27	2606,41	3462,31	2806,48
22	7,65	2822,54	2846,37	2832,28	2768,03	2801,43
23	51,6	2716,13	2742,58	2524,03	2576,12	2532,75
24						
25	9,85	2611,81	2859,03	2690,23	2719,85	2923,45
26	11,7	2619,48	2906,27	2529,4	3146,83	2856,99

Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

Tabelle 7: Messwerte der Messungen für Frühling, Sommer, Herbst und Winter an der Skulptur HD21

Messpunkt	Distanz	Sommer19	Frühling20	Herbst20	Winter20	Winter22
1	13,1	2550,92	2476,92	2550,92	2425,31	2930,97
2	27	2881,43	2886,06	2523,18	2520,2	2837,3
3	13	2939,59	2693,64	2576,86	2648,66	2865,33
4	14,2	2714,63	2686,41	2774,14	2451,84	2638,39
5						
6	35	2674,91	2665,08	2507,94	2610,27	
7	20,8	2373,87	2447,62	2342,45	2678	2351,6
8	8,9	2824,5	2784,31	3146,99	3054,43	3468,25
9	17,6	2499,96	2403,78	2393,78	2568,26	2516,44
10	16,3	2832,96	2696,58	2522,79	2587,1	2618,42
11	59,9	2829,53	2371,75	2215,7		
12	37,6	2193,47	2693,22	2303,79		
13						
14	44,2	2871,35	2917,46	2493,43	2490,89	
15	16,7	3180,53	3201,83	3077,09	3100,66	2532,48
16	33,6	2911,74	3088,24	2681,35	2917,47	
17						
18	45,3	2194,22	2452,39	2359,58	2297,88	
19	16,8	3063,07	2260,6	2243,29	2186,46	2394,08
20	38	2946,57	2475,33	2409,85	2178,82	
21	12,2	3106,3	3128,75	2710,57	2905,73	2962,07
22	12,8	2712,16	2626,25	2636,57	2428,8	2558,98
23	71	2523,53	2352,19	2191,15	1506,52	
24	53	1672,17	1136,13	2246,9	1510,81	
25	58,5	3243,48	2916,84	1533,5	1448,61	
26	40	2553,04	2270,83		1923	

Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

Tabelle 8: Messwerte der Messungen für Frühling, Sommer, Herbst und Winter an der Skulptur HD3

Messpunkt	Distanz	Sommer19	Frühling20	Herbst20	Winter20	Winter22
1	12,4	1986,38	2194,78	1953,49	2130,45	2122,43
2	24,4	1972,69	1972,69	1522,54	1559,95	
3	11,5	2446,66	1963,19	1832,82	1879,55	2074,24
4	12,1	1482,17	2036,04	1731,69	1732,7	1922,63
5	24	2407,96	3142,88	2066,61	2052,63	
6	31,6	2539,17	2454,03	1852,5	1758,08	
7	13,6	3156,84	2870,31	2189,8	2194,18	2264,78
8	7,8	2490,46	2162,88	2072,87	2183,47	2071,97
9	12	2725,92	1931,4	1916,05	1878,65	2092,84
10	6,3	1700,34	2420,36	1741,97	1945,58	1837,28
11	30	1812,1	2541,55	1776,18	1978,51	
12	36	2186,88	3084,15	1885,7	2182,11	
13	17,4	2846,72	2683,32	2143,52	2088,32	2028,22
14						
15						
16	11,5	3241,86	3640,23	2561,42	2389,68	
17	15,2	3153,56	1793,34	2512,94	2505,64	2295,05
18	45,8	1669,31		2004,44	1988,81	
19	12,7	3670,84	3032,87	2458,48	2646	2318,08
20	39	2818,51	2960	2226,85	2250,09	
21	9	3021,35	2705,05	2213,97	2745,7	2427,12
22	9,8	3136,06	2506,46	2509,47	2957,34	2876,7
23	66	1526,27	2160,03	1584,12	1040,29	
24						
25	18,7	3140,14	2954	2189,62	2040,47	2233,36
26	12,7	3260,56	3392,39	2734,6	2790,43	2630,86
27	10,4	2980,63	1985,33	1739,42	1903,82	1822,47
28						

Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

Tabelle 9: Messwerte der Messungen für Frühling, Sommer, Herbst und Winter an der Skulptur HD8a

Messpunkt	Distanz	Sommer19	Frühling20	Herbst20	Winter20	Winter22
1	12,5	3035,85	2938,61	2795,92	2723,3	2719,54
2	23,6	3041,97	3015,57	2719,93	2679,21	2763,76
3	11,6	3123,22	3002,3	2694,48	2738,74	2744,37
4	12,8	3006,43	2968,72	2713,59	2692,3	2739,84
5	24,8	3101,4	3046,09	2597,48	2548,88	2582,65
6	29	3051,92	2963,06	2853,15	2764,91	2664,55
7	12,5	2995,81	2886,24	2779,69	2767,51	2517,77
8	8,3	2778,81	2982,32	2806,42	2553,88	2864,13
9	11,8	2846,51	2811,32	2608,83	2562,19	2735,76
10	8,6	2861,71	3078,13	2595,68	2673,88	2837,27
11	38,1	2889,03	2718,59	2637,63	2654,06	2546,33
12	35	2947,94	2705,69	2641,37	2763,58	2562,85
13	16	2796,57	2903,01	2669,56	2525,04	2586,61
14	19	2827,93	3118,63	2596,3	2487,69	2722,98
15	12	2821,54	2891,83	2803,74	2538,42	2636,81
16	37,9	2831,23	2809,78	2685,33	2582,07	2633,48
17	17,3	3034,72	2949,25	2534,24	2548,48	2701,8
18	18,4	2748,82	2762,11	2239,94	2523,08	2432,59
19	14	2954,01	2852,14	2497,24	2681,38	2566,36
20	10,4	2397,97	2552,45	1970,41	2833,86	2499,52
21	7	3036,88	3019,32	2760,47	2634,45	2623,59
22	6,8	2921,21	2936,6	2676,74	2736,57	2727,87
23						
24	60	2770,24	2687	2309,41	1698,09	
25	6,2	2747,5	2919,02	2599,04	2898,95	2761,43
26	3	2971,31	3116,94	2636,44	3000,3	3568,14
27	11	2749,7	2685,74	2656,04	2644,26	2625,06
28						

Anhang B – Parameter und Ergebnisse der Messreihen an Skulpturen des Neues Palais

Tabelle 10: Messwerte der Messungen für Frühling, Sommer, Herbst und Winter an der Skulptur HD8b

Messpunkt	Distanz	Sommer19	Frühling20	Herbst20	Winter20	Winter22
1	13,6	1917,81	1393,35	2256,66	2245,03	2342,65
2	25,7	2139,65	2029,28	1877,68	1782,46	
3	12,2	2688	2333,25	2357,35	2292,35	2504,24
4	19,3	2042,57	2175,57	1777,03	2122,52	1924,71
5	27	3046,3	2314,35	2085,81	2222,72	2344,02
6	29	2467,57	2281,8	2148,69	2209,81	
7	12,8	3191,86	2695,22	2453,75	2392,34	2389,78
8	12,1	3122,6	2764,85	2443,56	2356,68	2347,46
9	18,5	3188,22	3158,75	2707,85	2480,1	2373,9
10	8	3238,74	3136,76	2490,35	2435,91	2185,04
11	35,7	3197,52	2782,5	2502,19	2510,81	
12	32,5	2800,02	2783,53	2259,82	2420,9	
13	15,4	3432,98	2661,36	2382,28	2185,31	2258,17
14	17,4	3073,38	2567,39	1967,9	1944,98	
15	14,1	3403,21	3174,6	2924,16	2781,21	2653,71
16	13,9	2951,89	2886,87	2800,84	2269,09	2363,03
17						
18	39	2945,73	2990,14	2880,52	2780,53	
19	13,3	3407,48	3306,78	3052,84	3034,02	2776,68
20	32,6	2776,92	2834,12	2380,05	2670,95	
21	6,7	3385,33	3506,5	3029,34	2977,94	2724,68
22	6,8	3545,55	3037,42	3006,06	3140,59	3000,75
23						
24	55	2004,88	2301,56	2233,4	2073,64	
25	24,9	2979,13	2892,57	2201,24	2369,34	
26	8,4	2525,25	2697,84	2460,02	2531,65	2139,04
27	13,3	2935,03	2374,15	2134,66	2129,45	2646,5
28						

Anhang C – Parameter und Ergebnisse der Labormessungen

C.1 Gerätebezeichnung und Versuchsaufbau

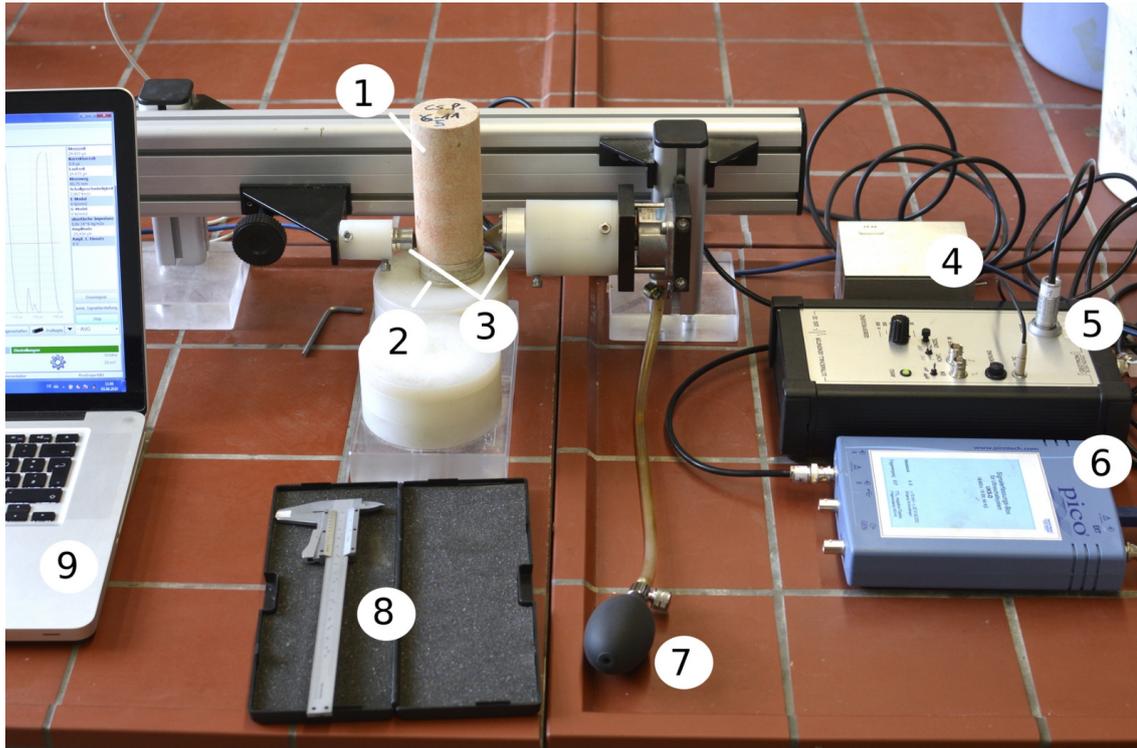


Abbildung 1: Messaufbau zur Messung der Transmissionsgeschwindigkeit.

- 1 Probekörper
- 2 Scheiben mit genormter Dicke zur leichteren Variation der Messpunkte in vertikaler Richtung
- 3 Messköpfe (Sender rechts, Empfänger links), 350 kHz
- 4 Verstärker VV42, Geotron Elektronik
- 5 Ultraschallgenerator USG 30 Geotron Elektronik
- 6 Signalerfassungs-Box für Ultraschallsystem UKS-D 10 MS/s, 16 bit, 64 KS, Geotron Elektronik
- 7 Druckluftgestützte Apparatur zum Einspannen der Probe
- 8 Messschieber zur Bestimmung der Messtrecke
- 9 Software: Lighthouse UMPC Version 1.0.3.4.

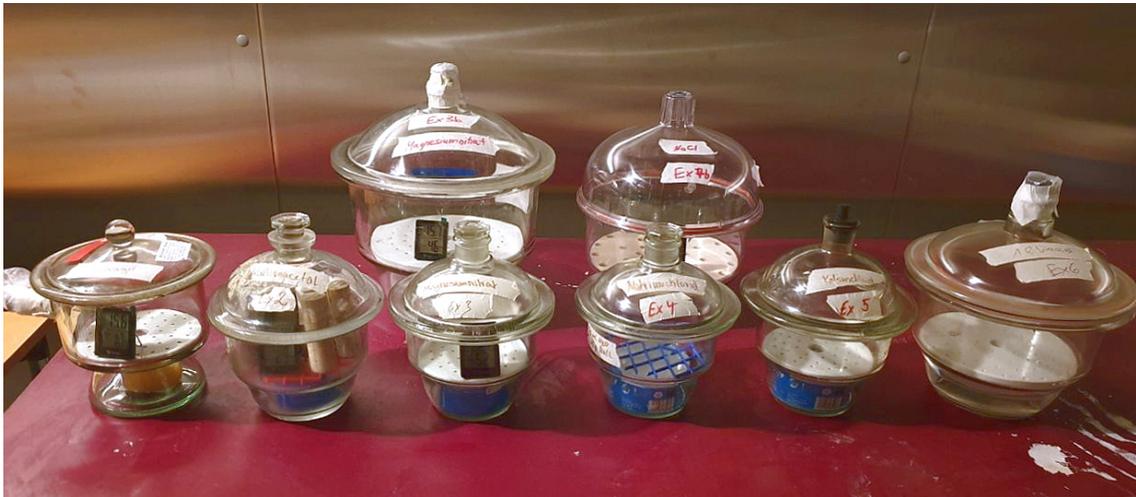


Abbildung 2: Exsikkatoren zur Akklimatisierung bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten.

Verwendete Salzlösungen und Materialien:

- Kaliumacetat (23 % rF)
- Magnesiumnitrat (53 %)
- Natriumchlorid (75 %)
- Kaliumchlorid (84 %)
- Silica Gel Orange, Carl Roth GmbH

Waagen:

- Kleine Probekörper: Mettler PE 360
- Große Probekörper: Mettler Toledo XS6002S

Hygrometer:

- Doqaus, Indoor Humidity & Temperature Monitor

C.2 Messergebnisse von Durchfeuchtung und Trocknung

Die im Folgenden aufgeführten Messwerte enthalten zum Teil bereits über mehrere Messungen gebildete Mittelwerte. Die detaillierten Messdaten können bei der Fachhochschule Potsdam, Studiengang Steinrestaurierung oder der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten angefragt werden.

Die Messungen an den kleinen Probekörper erfolgten durch die Studierenden Lale von Baudessin und Tamara Niedtner, die Messungen an den großen Probekörpern durch die Autorin.

Tabelle 1: Durchschnittliche aufgenommene Wassermenge der Probekörper bei Saugen über Standfläche und nach Lagerung im Wasserbad

Aufgenommene Wassermenge [M.-%]				
	Cottaer Sandstein		Ummendorfer Sandstein	
	Ø 3 cm	Ø 5cm	Ø 3 cm	Ø 5cm
Saugen über Standfläche [M.-%]	7,90 %	5,96 %	6,94 %	6,55 %
48 Std Wasserbad [M.-%]	9,01 %	-	8,65 %	-

Tabelle 2: Ergebnisse der Ultraschallmessungen der trockenen Probekörper entlang der verschiedenen Messachsen.

Trocken Ultraschallgeschwindigkeit in [km/s]								
	Cottaer Sandstein ⊥		Cottaer Sandstein ∥		Ummendorfer Sandstein ⊥		Ummendorfer Sandstein ∥	
	Ø 3 cm	Ø 5cm	Ø 3 cm	Ø 5cm	Ø 3 cm	Ø 5cm	Ø 3 cm	Ø 5cm
1	3,19 (2,4 %)	3,15 (2,4 %)	2,92 (2,8 %)	2,87 (1,1 %)	3,67 (4,7 %)	3,56 (4,6 %)	3,45 (2,8 %)	3,44 (4,2 %)
2	3,15 (1,9 %)	3,14 (1,7 %)	3,14 (2,6 %)	3,12 (1,8%)	3,54 (5.1 %)	3,63 (5,2 %)	3,70 (3,2 %)	3,54 (3,4 %)
3	2,76 (1,5 %)	2,72 (1,0 %)	3,06 (1,9 %)	3,05 (1,8%)	2,99 (4.1 %)	3,22 (3,6 %)	3,38 (2,4 %)	3,49 (4,2 %)

Tabelle 3: Ergebnisse der Ultraschallmessung der trockenen Probekörper. Mittelwerte aller Messstrecken senkrecht bzw. parallel zur Schichtung.

	Cottaer Sandstein		Ummendorfer Sandstein	
	Ø 3 cm	Ø 5cm	Ø 3 cm	Ø 5cm
Durchschnitt aller \perp	2,88 (3,5 %)	2,66 (22,53 %)	3,34 (6,75 %)	3,28 (4,89 %)
Durchschnitt aller \parallel	3,15 (2,6 %)	3,05 (15,77%)	3,61 (5,02 %)	3,56 (4,68 %)

Tabelle 4: Ergebnisse der Ultraschallmessungen der durchfeuchteten Probekörper entlang der verschiedenen Messachsen.

Getränkte Probekörper: Ultraschallgeschwindigkeit in [km/s]								
	Cottaer Sandstein \perp		Cottaer Sandstein \parallel		Ummendorfer Sandstein \perp		Ummendorfer Sandstein \parallel	
	Ø 3 cm	Ø 5cm	Ø 3 cm	Ø 5cm	Ø 3 cm	Ø 5cm	Ø 3 cm	Ø 5cm
1	2,66 (4,0 %)	2,58 (3,0 %)	2,59 (2,4 %)	2,57 (3,2 %)	3,53 (4,2 %)	3,27 (3,9 %)	3,54 (3,6 %)	3,30 (4,2 %)
2	2,59 (2,8 %)	2,61 (3,1 %)	2,61 (4,0 %)	2,65 (4,3 %)	3,36 (4,9 %)	3,33 (4,5 %)	3,47 (3,7 %)	3,34 (4,2 %)
3	2,39 (1,0 %)	2,33 (2,4 %)	2,44 (1,1 %)	2,49 (4,6 %)	2,98 (1,2 %)	3,04 (3,4 %)	3,02 (1,8 %)	3,02 (2,9 %)

Tabelle 5: Ergebnisse der Ultraschallmessung der durchfeuchteten Probekörper. Mittelwerte aller Messstrecken senkrecht bzw. parallel zur Schichtung.

	Cottaer Sandstein		Ummendorfer Sandstein	
	Ø 3 cm	Ø 5cm	Ø 3 cm	Ø 5cm
Durchschnitt aller \perp [km/s]	2,54 (4 %)	2,32 (23,14 %)	3,4 (7,96 %)	3,14 (5,21 %)
Durchschnitt aller \parallel [km/s]	2,61 (4,2 %)	2,52 (16,11 %)	3,41 (5,91 %)	3,26 (5,31 %)

Tabelle 6: Mittelwerte der Differenzen zwischen Ultraschallgeschwindigkeit der trockenen und nassen Probekörper

Differenz der Ultraschallgeschwindigkeit nass-getränkt in [km/s]								
	Cottaer Sandstein ⊥		Cottaer Sandstein ∥		Ummendorfer Sandstein ⊥		Ummendorfer Sandstein ∥	
	Ø 3 cm	Ø 5cm	Ø 3 cm	Ø 5cm	Ø 3 cm	Ø 5cm	Ø 3 cm	Ø 5cm
1	0,53 (22,0 %)	0,57 (16 %)	0,33 (20,8 %)	0,30 (27,0 %)	0,14 (116,5 %)	0,28 (33,4 %)	-0,09 (130,7 %)	0,15 (51,2 %)
2	0,56 (12,7 %)	0,53 (15,0 %)	0,53 (14,5 %)	0,48 (26,6 %)	0,18 (59,9 %)	0,30 (22,0 %)	0,23 (39,5 %)	0,15 (104,9 %)
3	0,37 (13,8 %)	0,40 (14,2 %)	0,60 (10,7 %)	0,56 (13,1 %)	0,01 (102,5 %)	0,18 (54,1 %)	0,36 (22,8 %)	0,51 (21,0 %)

Tabelle 7: Ergebnisse der Messung des dynamischen E-Moduls in trockenem und getränktem Zustand.

	Cottaer Sandstein	Ummendorfer Sandstein	Carrara Marmor
Mittelwert E-Modul [kN/mm ²] trocken	17,95	22,26	49,55
Mittelwert E-Modul [kN/mm ²] getränkt	10,73	13,56	21,34
Standardabweichung trocken [kN/mm ²]	0,54	1,99	4,55
Standardabweichung getränkt[kN/mm ²]	0,04	1,78	2,34
Prozentuale Änderung trocken zu getränkt [%]	-40,23 %	-39,08 %	-56,93 %

Tabelle 8: Gewicht der großen Probekörper im Laufe des Trocknungsprozesses.

Probekörper	Gewicht [g]							
	Cottaer Sandstein \perp		Cottaer Sandstein \parallel		Ummendorfer Sandstein \perp		Ummendorfer Sandstein \parallel	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Tag 0	0,0671	0,0637	0,0606	0,0469	0,0628	0,0647	0,0696	0,0649
Tag 1	0,0402	0,0372	0,0334	0,0249	0,0337	0,035	0,0422	0,0367
Tag 2	0,0147	0,0136	0,0122	0,0111	0,0104	0,0082	0,0093	0,0062
Tag 3	0,008	0,0075	0,0073	0,0072	0,0014	0,0012	0,0009	0,0011
Tag 4	0,0068	0,0065	0,0063	0,0065	0,0009	0,0008	0,0005	0,0009
Tag 5	0,0058	0,0056	0,0056	0,0057	0,0009	0,0007	0,0004	0,0008
Tag 6	0,004	0,0036	0,0035	0,0039	0,0005	0,0004	0,0002	0,0004
Tag 7	0,0037	0,0036	0,0035	0,0038	0,0002	0,0001	0	0,0001
Tag 8	0,0035	0,0034	0,0034	0,0036	0,0002	0	0	0,0001
Tag 10	0,0037	0,003	0,0035	0,0037	0,0001	0	-0,0001	0

Tabelle 9: Ultraschallgeschwindigkeiten der großen Probekörper im Laufe des Trocknungsprozesses.

Probekörper	Ultraschallgeschwindigkeit [km/h]							
	Cottaer Sandstein \perp		Cottaer Sandstein \parallel		Ummendorfer Sandstein \perp		Ummendorfer Sandstein \parallel	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Tag 0	2,41	2,41	2,46	2,57	3,21	3,23	3,08	3,05
Tag 1	2,36	2,37	2,62	2,63	3,26	3,19	3,26	3,12
Tag 2	2,35	2,4	2,64	2,69	3,28	2,99	3,23	3,35
Tag 3	2,42	2,44	2,68	2,76	3,15	2,99	3,3	3,35
Tag 4					3,15	2,98	3,31	3,34
Tag 5								
Tag 6	2,43	2,5	2,76	2,82	3,13	3,11	3,27	3,3
Tag 7	2,52	2,55	2,81	2,85	3,15	3,1	3,34	3,39
Tag 8								
Tag 10	2,49	2,55	2,78	2,83	3,16	3,07	3,35	3,36

C.3 Messergebnisse der Akklimatisierung in Exsikkatoren

Die im Folgenden aufgeführten Messwerte enthalten zum Teil bereits über mehrere Messungen gebildete Mittelwerte. Die detaillierten Messdaten können bei der Fachhochschule Potsdam, Studiengang Steinrestaurierung oder der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten angefragt werden.

Die Messungen wurden von Marlene Boshold (MB), Leon Wilke (LW), Tamara Niedtner (TN) und Sarah-Theresa Becker (SB).

Exsikkatoren (Soll-Feuchten):

Ex. 1: Exsikkator 1, Luftfeuchte 10 % rF

Ex. 2: Exsikkator 2, Luftfeuchte , 23 % rF

Ex. 3: Exsikkator 3, Luftfeuchte 53 % rF

Ex. 4: Exsikkator 4, Luftfeuchte 75 % rF

Ex. 5: Exsikkator 5, Luftfeuchte 84 % rF

Ex. 6: Exsikkator 6, Luftfeuchte 100 % rF

Tabelle 10: Wiederholungsmessung an drei aufeinander folgenden Tagen an kleinen Probekörper in Exsikkator 2.

Exsikkator 2 (21 %, 24 %, 23 % rF), Ø 3 cm, Mittelwerte [km/s] und Variationskoeffizient [%] der Wiederholungsmessungen (TN, SB, SB)								
	Cottaer Sandstein ⊥		Cottaer Sandstein 		Ummendorfer Sandstein ⊥		Ummendorfer Sandstein	
Probekörper →	1	2	1	2	1	2	1	2
Messpunkt ↓								
1	2,63 (0,6 %)	2,63 (0,8 %)	2,84 (0,6 %)	2,91 (0,8 %)	2,96 (1,1 %)	2,97 (1,1 %)	3,48 (2,6 %)	3,42 (4,0 %)
2	2,6 (1,6 %)	2,61 (1,3 %)	2,83 (0,3 %)	2,9 (1,2 %)	2,97 (2,6 %)	3,00 (0,2 %)	3,54 (2,6 %)	3,45 (3,9 %)

					%)			
3	2,61 (1,3 %)	2,61 (3,1 %)	2,88 (1,8 %)	2,88 (0,7 %)	2,97 (2,2 %)	2,91 (7 %)	3,50 (4,1 %)	3,43 (3,6 %)

Tabelle 11: Wiederholungsmessung an drei aufeinanderfolgenden Tagen an großen und kleinen Probekörpern in Exsikkator 3.

Exsikkator 3 (38, 43, 45 % rF), Ø 5 cm Mittelwerte [km/s] und Variationskoeffizient der Wiederholungsmessungen [%] TN, MB, TN								
	Cottaer Sandstein ⊥		Cottaer Sandstein ∥		Ummendorfer Sandstein ⊥		Ummendorfer Sandstein ∥	
Probekörper →	1	2	1	2	1	2	1	2
Messpunkt ↓								
1	2,56 (0,3 %)	2,57 (0,8 %)	2,85 (0,7 %)	2,86 (0,9 %)	3,05 (0,9 %)	3,13 (0,6 %)	3,27 (0,3 %)	3,21 (0,6 %)
2	2,52 (0,9 %)	2,59 (0,6 %)	2,83 (1,0 %)	2,92 (0,8 %)	3,11 (0,7 %)	2,86 (1,3 %)	3,26 (0,8 %)	3,27 (0,6 %)
3	2,53 (0,9 %)	2,61 (0,2 %)	2,85 (0,6 %)	2,88 (1,0 %)	3,10 (1,6 %)	2,90 (1,4 %)	3,30 (1,1 %)	3,40 (0,5 %)
Exsikkator 3 (47, 49, 50 % rF), Ø 3 cm, Mittelwerte und Variationskoeffizient der Wiederholungsmessungen (MB, SB, TN)								
	Cottaer Sandstein ⊥		Cottaer Sandstein ∥		Ummendorfer Sandstein ⊥		Ummendorfer Sandstein ∥	
Probekörper →	1	2	1	2	1	2	1	2
Messpunkt ↓								
1	2,53 1,0 %	2,5 (0,9 %)	2,77 (1,4 %)	2,79 (1,8 %)	2,94 (1,3 %)	2,93 (0,8 %)	3,48 (0,7 %)	3,4 (1,8 %)
2	2,48 1,8 %	2,51 (0,8 %)	2,8 (0,9 %)	2,78 (1,8 %)	2,97 (0,8 %)	2,94 (1,8 %)	3,43 (0,5 %)	3,41 (1,4 %)

3	2,47 2,2 %	2,5 (1,0 %)	2,78 (0,8 %)	2,78 (0,4 %)	2,95 (0,8 %)	2,96 (1,5 %)	3,45 (0,4 %)	3,39 (1,9 %)
---	---------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

Tabelle 12: Wiederholungsmessung an drei aufeinanderfolgenden Tagen an großen und kleinen Probekörpern in Exsikkator 3.

Exsikkator 5 (79, 75, 84 % rF), Ø 5 cm, Mittelwerte [km/s] und Variationskoeffizient [%] der Wiederholungsmessungen (TN, MB, SB)								
	Cottaer Sandstein ⊥		Cottaer Sandstein ∥		Ummendorfer Sandstein ⊥		Ummendorfer Sandstein ∥	
Probe- körper →	1	2	1	2	1	2	1	2
Mess- punkt ↓								
1	2,33 (1,6 %)	2,35 (1,9 %)	2,61 (1,2 %)	2,65 (1,6 %)	2,99 (1,8 %)	3,03 (1,4 %)	3,25 (0,7 %)	3,15 (1,9 %)
2	2,31 (2,3 %)	2,37 (1,3 %)	2,60 (1,7 %)	2,69 (1,1 %)	3,02 (1,4 %)	2,79 (1,8 %)	3,23 (0,6 %)	3,19 (0,6 %)
3	2,35 (1,88 %)	2,40 (0,9 %)	2,63 (0,3 %)	2,67 (2,0 %)	3,03 (1,2 %)	2,87 (1,2 %)	3,27 (0,8 %)	3,29 (2,1 %)
Exsikkator 5 (77, 76, 71 % rF), Ø 3 cm, Mittelwerte und Variationskoeffizient [%] der Wiederholungsmessungen (TN, SB, TN)								
	Cottaer Sandstein ⊥		Cottaer Sandstein ∥		Ummendorfer Sandstein ⊥		Ummendorfer Sandstein ∥	
Probe- körper →	1	2	1	2	1	2	1	2
Mess- punkt ↓								
1	3,45 (1,5 %)	3,33 (2,02 %)	2,98 (1,3 %)	2,89 (1,3 %)	2,62 (1,11 %)	2,70 (1,3 %)	2,43 (3,4 %)	2,39 (1,3 %)
2	3,36 (0,6 %)	3,34 (1,7 %)	2,96 (0,6 %)	2,87 (1,7 %)	2,69 (0,6 %)	2,68 (2,7 %)	2,40 (1,3 %)	2,44 (2,7 %)
3	3,39 (1,7 %)	3,35 (0,7 %)	2,91 (1,5 %)	2,91 (0,7 %)	2,67 (1,4 %)	2,68 (1,7 %)	2,39 (1,5 %)	2,40 (1,7 %)

Tabelle 13: Gewicht der kleinen Probekörper bei Akklimatisierung in den verschiedenen Exsikkatoren.

		Gewicht der kleinen Probekörper in den verschiedenen Exsikkatoren [g]							
		Cottaer Sandstein		Cottaer Sandstein ⊥		Ummendorfer Sandstein ⊥		Ummendorfer Sandstein	
Messende Person		1	2	1	2	1	2	1	2
	trocken	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TN	Ex 1	0,0021	0,0020	0,0015	0,0018	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006
TN,SB,SB	Ex 2	0,0029	0,0028	0,0029	0,0028	0,0007	0,0007	0,0008	0,0007
MB, SB, TN	Ex 3	0,0042	0,0041	0,0042	0,0041	0,0008	0,0007	0,0008	0,0007
TN, MB	Ex 4	0,0065	0,0062	0,0062	0,0062	0,0009	0,0009	0,0010	0,0009
TN, SB, TN	Ex 5	0,0065	0,0063	0,0064	0,0064	0,0008	0,0008	0,0010	0,0008
SB, LW	Ex 6	0,0097	0,0095	0,0094	0,0092	0,0012	0,0011	0,0012	0,0011
TN	Ex. 5	0,0080	0,0077	0,0078	0,0078	0,0009	0,0010	0,0011	0,0009
LW	Ex. 4	0,0072	0,0070	0,0070	0,0070	0,0008	0,0009	0,0009	0,0008
MB	Ex. 3	0,0056	0,0055	0,0055	0,0054	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
TN	Ex. 2	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033	0,0006	0,0005	0,0006	0,0006
TN	Ex. 1	0,0024	0,0024	0,0023	0,0024	0,0005	0,0005	0,0006	0,0005
MB	Ex. 2	0,0025	0,0025	0,0025	0,0024	0,0006	0,0006	0,0007	0,0006
LW	Ex. 3	0,0031	0,0032	0,0031	0,0030	0,0006	0,0006	0,0006	0,0005
TN	Ex. 4	0,0057	0,0055	0,0055	0,0055	0,0007	0,0007	0,0008	0,0007
MB	Ex. 5	0,0064	0,0064	0,0063	0,0063	0,0007	0,0007	0,0008	0,0007
LW	Ex. 6	0,0084	0,0080	0,0081	0,0083	0,0008	0,0009	0,0010	0,0008
TN	Ex. 5	0,0074	0,0072	0,0072	0,0072	0,0007	0,0007	0,0008	0,0007
MB	Ex. 4	0,0068	0,0067	0,0067	0,0067	0,0007	0,0007	0,0008	0,0007
TN	Ex. 3	0,0057	0,0056	0,0057	0,0057	0,0005	0,0007	0,0007	0,0007
TN	Ex. 2	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002
TN	Ex. 1	0,0013	0,0012	0,0012	0,0012	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002
LW	Ex 6	0,0126	0,0121	0,0121	0,0124	0,0010	0,0011	0,0012	0,0011
	ge-sättigt	0,0924	0,0932	0,0937	0,0922	0,0911	0,0897	0,0845	0,0863

Tabelle 14: Ultraschallgeschwindigkeiten der kleinen Probekörper bei Akklimatisierung in den verschiedenen Exsikkatoren

	Ultraschallgeschwindigkeit [km/s] der kleinen Probekörper in den verschiedenen Exsikkatoren								
	Cottaer Sandstein		Cottaer Sandstein ⊥		Ummendorfer Sandstein ⊥		Ummendorfer Sandstein		Gemessene Luftfeuchte
	1	2	1	2	1	2	1	2	
trocken	3,06	3,03	2,77	2,77	3,16	3,10	3,56	3,52	
Ex 1	2,99	3,03	2,74	2,72	2,97	3,03	3,46	3,42	10 %
Ex 2	2,85	2,90	2,61	2,61	2,97	2,96	3,51	3,43	23 %
Ex 3	2,78	2,78	2,49	2,50	2,95	2,95	3,45	3,40	49 %
Ex 4	2,65	2,67	2,41	2,40	2,94	2,95	3,42	3,31	73 %
Ex 5	2,66	2,69	2,41	2,41	2,95	2,89	3,40	3,31	75 %
Ex 6	2,56	2,55	2,32	2,28	2,97	2,88	3,37	3,37	99 %
Ex 5	2,66	2,65	2,37	2,35	2,99	2,91	3,41	3,38	83 %
Ex 4	2,74	2,76	2,51	2,45	3,07	2,99	3,50	3,44	76 %
Ex 3	2,78	2,80	2,51	2,49	3,01	2,89	3,43	3,39	57 %
Ex 2	2,90	2,92	2,62	2,60	3,11	3,03	3,57	3,45	34 %
Ex 1	2,92	2,94	2,65	2,65	3,04	3,03	3,55	3,45	16 %
Ex 2	2,92	2,94	2,68	2,65	3,07	3,07	3,55	3,48	26 %
Ex 3	2,92	2,92	2,64	2,66	3,07	2,99	3,50	3,44	36 %
Ex 4	2,70	2,72	2,45	2,42	3,00	2,95	3,44	3,40	68 %
Ex 5	2,63	2,68	2,39	2,38	3,01	2,91	3,40	3,37	77 %
Ex 6	2,65	2,80	2,43	2,42	3,07	3,03	3,51	3,47	95 %
Ex 5	2,62	2,68	2,42	2,39	3,07	2,99	3,46	3,43	82 %
Ex 4	2,71	2,72	2,47	2,42	3,06	2,95	3,42	3,39	75 %
Ex 3	2,80	2,80	2,53	2,53	3,05	2,96	3,46	3,41	61 %
Ex 2	2,98	2,99	2,72	2,72	3,09	3,04	3,50	3,41	17 %
Ex 1	2,98	3,01	2,73	2,72	3,10	3,03	3,53	3,45	15 %
Ex 6	2,46	2,48	2,22	2,21	3,010	2,89	3,39	3,40	99 %
gesättigt	2,41	2,48	2,41	2,39	2,96	2,97	3,49	3,44	

Tabelle 15 Gewicht der großen Probekörper bei Akklimatisierung in den verschiedenen Exsikkatoren

		Gewicht [g] der großen Probekörper in den verschiedenen Exsikkatoren							
		Cottaer Sandstein		Cottaer Sandstein ⊥		Ummendorfer Sandstein ⊥		Ummendorfer Sandstein	
		1	2	1	2	1	2	1	2
	trocken	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
MB	Ex. 1	0,0023	0,0022	0,0021	0,0023	0,0004	0,0003	0,0002	0,0004
TN	Ex. 2	0,0024	0,0023	0,0023	0,0025	0,0005	0,0004	0,0002	0,0004
TN, MB, TN	Ex. 3	0,0034	0,0032	0,0032	0,0034	0,0005	0,0004	0,0002	0,0005
TN	Ex. 4	0,0045	0,0045	0,0043	0,0045	0,0007	0,0005	0,0003	0,0006
SB, TN, MB	Ex. 5	0,0075	0,0074	0,0071	0,0075	0,0012	0,0011	0,0007	0,0012
SB	Ex. 6	0,0089	0,0087	0,0086	0,0090	0,0014	0,0013	0,0008	0,0014
TN	Ex. 5	0,0084	0,0081	0,0079	0,0083	0,0013	0,0012	0,0007	0,0012
MB	Ex. 4	0,0076	0,0074	0,0072	0,0077	0,0012	0,0010	0,0006	0,0011
TN	Ex. 3	0,0070	0,0068	0,0066	0,0071	0,0011	0,0010	0,0006	0,0010
MB	Ex. 2	0,0063	0,0060	0,0060	0,0064	0,0010	0,0009	0,0005	0,0009
TN	Ex. 1	0,0032	0,0030	0,0030	0,0032	0,0005	0,0004	0,0003	0,0005
LW	Ex. 9	0,0076	0,0073	0,0072	0,0074	0,0012	0,0011	0,0006	0,0011
	gesättigt	0,0693	0,0657	0,0625	0,0662	0,0637	0,0656	0,0704	0,0658

Tabelle 16: Ultraschallgeschwindigkeit [km/s] der großen Probekörper bei Akklimationierung in den verschiedenen Exsikkatoren.

	Ultraschallgeschwindigkeiten [km/s] der großen Probekörper in den verschiedenen Exsikkatoren								
	Cottaer Sandstein		Cottaer Sandstein ⊥		Ummendorfer Sandstein ⊥		Ummendorfer Sandstein		Gemessene Luftfeuchte
	1	2	1	2	1	2	1	2	
trocken	2,76	2,80	3,07	3,11	3,31	3,11	3,39	3,40	
Ex 1	2,64	2,67	2,93	2,99	3,24	3,11	3,35	3,34	16 %
Ex 2	2,61	2,66	2,91	2,96	3,15	3,01	3,31	3,28	23 %
Ex 3	2,54	2,59	2,84	2,89	3,09	2,96	3,28	3,29	42 %
Ex 4	2,46	2,49	2,77	2,81	3,03	2,93	3,22	3,23	59 %
Ex 5	2,33	2,37	2,61	2,67	3,01	2,90	3,25	3,21	80 %
Ex 6	2,26	2,30	2,57	2,61	3,00	2,92	3,24	3,25	93 %
Ex 5	2,32	2,35	2,60	2,67	3,02	2,97	3,27	3,24	83 %
Ex 4	2,38	2,411	2,67	2,72	3,09	3,00	3,29	3,26	76 %
Ex 3	2,43	2,47	2,72	2,72	3,09	2,99	3,31	3,32	67 %
Ex 2	2,45	2,51	2,81	2,75	3,15	3,01	3,33	3,33	60 %
Ex 1	2,61	2,65	2,91	2,96	3,29	3,15	3,42	3,46	25 %
Ex 6	2,29	2,35	2,61	2,65	3,02	2,94	3,26	3,26	85 %
gesättigt	2,33	2,37	2,46	2,57	3,21	3,23	3,08	3,05	

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet wurden.

Potsdam, 8. März 2023



Ort, Datum, Unterschrift