



Potsdam, am 29.04.2015

DBU-Projekt



Aktenzeichen: **29544-45**

**„Erarbeitung eines Bewertungs-Leitfadens für
Ultraschallmessungen an umweltgeschädigten
Marmorskulpturen am Beispiel u.a. des Parks Potsdam
Sanssouci (UNESCO-Weltkulturerbe)“**

Abschlussbericht

01.07.2011 bis 08.11.2014

Wolfram Köhler
Geschwister-Scholl-Straße 48
14471 Potsdam

Inhalt

1.	Projektziele	4
2.	Projektablauf, -probleme und Konsequenzen	5
3.	Projektergebnisse	9
3.1.	Sorptionsisothermen	9
3.1.1.	Untersuchungsziel	9
3.1.2.	Bohrkerne	9
3.1.2.1.	Dünnschliffe	9
3.1.2.2.	Ultraschallmessungen	23
3.1.2.3.	Salzanalysen	24
3.1.3.	Untersuchungsmethode	24
3.1.4.	Messergebnisse.....	25
3.1.5.	Pore Aspect Ratio - Modell	26
3.2.	Standortklimamessungen	31
3.2.1.	Untersuchungsziel	31
3.2.2.	Datenbasis	31
3.2.2.1.	TRY-Datensätze	31
3.2.2.2.	DWD-Potsdam	36
3.2.2.3.	Datenlogger	42
3.2.2.4.	Messstand	70
3.2.3.	Auswertung	78
3.2.4.	Standortbewertung	87
3.3.	Stelenmessungen	88
3.3.1.	Untersuchungsziel	88
3.3.2.	Dichterstelen.....	88
3.3.3.	Untersuchungsprogramm	89
3.3.4.	Messergebnisse.....	93

3.4.	Objektmessungen.....	101
3.4.1.	Fontänenrondell in Sanssouci	101
3.4.1.1.	Götterskulpturen	101
3.4.1.2.	Untersuchungsprogramm	102
3.4.1.3.	Untersuchungsergebnisse.....	102
3.4.2.	Vergleichsmessungen.....	103
3.4.2.1.	München-Nymphenburg - Vergleichsmessungen	103
3.4.2.2.	Potsdam-Sanssouci - Bewertungskriterien	111
3.4.2.3.	Dresden-Großer Garten - Methodenkombinationen.....	118
3.5.	Oberflächenbeurteilung	122
3.5.1.	Untersuchungsziel	122
3.5.2.	Untersuchungsmethoden	122
3.5.2.1.	Rauhigkeitsmessungen	122
3.5.2.2.	Kantenabwitterung.....	126
3.5.3.	Ergebnisbeurteilung	129
3.6.	Leitfaden.....	131
3.6.1.	Fehlerbetrachtung	131
3.6.2.	Bewertungs-Leitfaden für Ultraschallmessungen an umweltgeschädigten Marmorskulpturen	134
4.	Probleme und Perspektiven	136
5.	Veröffentlichungen und Öffentlichkeitsarbeit.....	138
6.	Zusammenfassung	139
7.	Quellen und Literatur	140
8.	Danksagung	142

1. Projektziele

Wichtigste Zielsetzung des Projektes war es, eine Verbesserung der zerstörungsfreien Ultraschalldiagnostik zu erlangen, um auch geringe Zustandsveränderungen der Marmorskulpturen in Parkanlagen objektiv beurteilen zu können. Besonderes Augenmerk galt dabei der Erfassung der feuchtebedingten Klimaeinflüsse auf die Ultraschallgeschwindigkeit. Diese Ergebnisse sollten in einem „Leitfaden für Ultraschalluntersuchungen an Marmorskulpturen“ zusammengefasst werden, um die Vergleichbarkeit von Ultraschallmessungen zu gewährleisten.

Neben den aus der Ultraschalldiagnostik gewonnenen Aussagen über den aktuellen Gefügestand des Marmors sollte eine Möglichkeit gefunden werden, quantifizierbare Aussagen über den witterungsbedingten Oberflächenzustand und den Materialverlust zu erhalten.

Die quantifizierbaren Aussagen des Gefüge- und des Oberflächenzustandes der Marmorskulpturen sollten dann mit der jeweiligen Standortbeschreibung der Skulpturen, sowie deren quantitativen restauratorischen und kunsthistorischen Beschreibungen verknüpft werden. Als Zusammenfassung aller Aussagen war die Formulierung von „Bewertungskriterien für umweltgeschädigte Marmorskulpturen“ angestrebt.

Diese Projektergebnisse sollten an Parkskulpturen aus Marmor einer Erprobung unter Praxisbedingungen unterzogen werden.

Zur Erreichung der Projektziele sah das Programm eine Mischung aus Laboruntersuchungen an Bohrkernen, Messungen an einem exponierten Probekörper, Klimamessungen und Objektuntersuchungen vor. Ergänzend waren mathematische Modellierungen der zeitlichen Änderungen der Temperatur- und Feuchteverteilung im Gesteinsinneren angestrebt.

2. Projektablauf, -probleme und Konsequenzen

Das ursprünglich auf dieser Grundlage formulierte detaillierte Arbeitsprogramm wurde bis zum Sommer 2013 ohne größere Änderungen beibehalten (siehe 4.Zwischenbericht). Bei einer weiteren Auswertung der zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Projektergebnisse zeigte sich, dass es für die Erreichung der Projektziele besser wäre, die Wichtung der einzelnen Punkte des Arbeitsprogrammes von den theoretischen Betrachtungen und den Laboruntersuchungen zu den Objektuntersuchungen hin zu verschieben.

Ein wichtiger Grund für diese Überlegungen lag in der aus den häufigen Wiederholungsmessungen der Stelen am Schloss Charlottenhof gewonnene Erkenntnis, dass die Ultraschallgeschwindigkeit des Marmors direkt von der absoluten Gesteinsfeuchte und nur indirekt von der relativen Feuchtigkeit und der Temperatur im Porenraum abhängig ist. Damit waren z.B. die begonnenen Messungen der Sorptionsisothermen wenig zielführend, da sie Temperaturänderungen unberücksichtigt lassen. Zwischenergebnisse dieser Messungen, Ultraschallgeschwindigkeiten nach mehrmonatiger Trocknung, konnten für theoretische Betrachtungen genutzt werden. Damit war eine Einordnung der Projektergebnisse in das Pore Aspect Ratio-Modell möglich.

Die kontinuierlichen Messungen der zeitlichen Änderungen der Temperaturen und der Relativen Feuchtigkeit im Inneren des zur Verfügung stehenden Ausbausteines, zeigten extrem voneinander abweichende Dynamiken der Temperatur- und Feuchtigkeitstransportprozesse. Während äußere Temperatureinflüsse in wenigen Stunden im Gesteinsinneren (13cm) messbar sind, ist das bei Feuchteänderungen erst nach mehreren Wochen nachweisbar. Dies würde dann auch für die Bestimmung der für eine Modellierung dieser Prozesse notwendigen Transportparameter gelten. Ihre Bestimmung würde sehr lange dauern und wäre entsprechend kostspielig. Beides ist im laufenden Projekt nicht zu leisten.

Als Konsequenz aus dieser Erkenntnis und unter Berücksichtigung des Projektzieles wurde versucht, die Ergebnisse der Wiederholungsmessungen an den Stelen am Schloss Charlottenhof mit den Klimamessungen am Standort Potsdam zu korrelieren. Dabei zeigte sich, dass das wahrscheinlich möglich ist, wenn man für diese Berechnungen die zeitliche Verzögerung der Feuchtigkeitstransportprozesse berücksichtigt und nicht die aktuellen Klimabedingungen zum Zeitpunkt der Ultraschallmessungen. Mehrere Wochen zurückliegende Klimasituationen und die damit zusammenhängenden absoluten Feuchten liefern verwertbare Ergebnisse, um den Klimaeinfluss auf die Ultraschallmessungen hinreichend genau zu beschreiben.

Die systematischen Klimamessungen an exemplarischen Skulpturenstandorten konnten im Herbst 2013 erfolgreich abgeschlossen werden. Nun liegen für alle

acht Standorte Messserien vor, die sowohl eine Winter- wie auch eine Sommerperiode umfassen. Damit ist es möglich abzuschätzen, ob und wie sich unterschiedliche Skulpturenstandorte auf die Ultraschallgeschwindigkeiten auswirken und bei der Zustandsbeurteilung der einzelnen Marmorskulpturen berücksichtigt werden müssen.

Damit sind die Voraussetzungen für die Erstellung des „Leitfadens für Ultraschalluntersuchungen an Marmorskulpturen“ gegeben.

Im Rahmen der Bachelorarbeit von Frau Sandra Damjanovic mit dem Thema *„Sehen, Fühlen, Messen - Erprobung der Profilmessmethode zur Einschätzung der Kantenabwitterung und der Beurteilung von Oberflächenrauheiten mit Hilfe von Sandpapieren sowie die messtechnische Ermittlung von Rauheitskenngrößen mit Hilfe des TRACEIT-System an Carrara-Marmorproben“* an der FH-Potsdam konnten die Grundlagen für eine quantifizierbare Beurteilung der Einflüsse von Umwelteinflüssen auf den Oberflächenzustand von Marmorskulpturen gelegt werden. Mit dem R_z -Wert, der absoluten Rauheit, und der Kantenabwitterung stehen nun zwei Messgrößen zur Verfügung, die den aktuellen Oberflächenzustand und den Materialverlust beschreiben. Dabei eignet sich besonders die einfach und preiswert durchführbare Methode der Messung der Kantenabwitterung zum Monitoring der verwitterungsbedingten Veränderung des Oberflächenzustandes von Marmorskulpturen. Eine Anleitung zur Messung liegt als Entwurf vor, so dass damit die angestrebten quantifizierbaren Aussagen über den witterungsbedingten Oberflächenzustand und den Materialverlust möglich sind. Diese Arbeiten wurden durch Professor Rolf Snethlages Gedanken *„Die Rückwitterung von Marmor an Kanten und Ecken – Quantitative Messmethoden“* angeregt.

Auf der Grundlage der Arbeit *„Rationales Entscheiden in der Erhaltung von Marmordenkmalen - Reale Möglichkeit oder Fiktion?“* von Professor Rolf Snethlage wurde ein Kriterienkatalog erstellt, der die quantifizierbaren Aussagen des Gefüge- und des Oberflächenzustandes der Marmorskulpturen mit den jeweiligen Standortbeschreibungen der Skulpturen, sowie deren quantitativen restauratorischen und kunsthistorischen Beschreibungen zusammenführt. Die Bewertungskriterien für umweltgeschädigte Marmorskulpturen wurden in einer dreiseitigen Tabelle verdichtet. Ziel ist es, möglichst viele Kriterien quantifizierbar zu gestalten, um damit einen Zustands- bzw. Risikofaktor einzelner Skulpturen berechnen zu können.

Dieser Kriterienkatalog wurde im Mai 2013 an zwei Parkskulpturen aus Marmor im Park von Potsdam-Sanssouci einer Erprobung unter Praxisbedingungen unterzogen. Dabei zeigten sich die prinzipielle Eignung dieser Bewertungsform und Ansätze für eine Verbesserung der gewählten Vorgehensweise.

Die bisherigen Projektergebnisse zeigten, dass die Laboruntersuchungen das Gesamtbild der Vorstellungen zur Marmorverwitterung zwar stützen konnten, aber nicht zu grundsätzlich neuen Erkenntnissen geführt haben. Weitaus

interessanter waren für das Projektziel die Messungen an dem exponierten Probekörper und an den Skulpturen selbst.

Daher werden im Labor nur noch ergänzende Messungen an wassergesättigten Bohrkernen durchgeführt. Diese Messungen sind noch nicht abgeschlossen, da die Wassersättigung mehrere Monate dauert und sich noch kein Gewichtsgleichgewicht eingestellt hat.

Das sehr umfangreiche Datenmaterial der Monitoringmessungen an dem exponierten Probekörper wurden systematisch ausgewertet. Es wurde eine zusätzliche kontinuierliche Ultraschallmessung installiert, um den Zusammenhang zwischen der inneren Gesteinsfeuchtigkeit und der Ultraschallgeschwindigkeit durch eine weitere Versuchsreihe abzusichern. Diese Messungen laufen erst wenige Wochen, da vielfältige technische Probleme zu Verzögerungen geführt haben. Die bisherigen Auswertungen zeigen die erhofften Ergebnisse. Diese Messserie wird über die Sommerperiode hinaus fortgesetzt.

Für eine Standortcharakterisierung wurden die Datenreihen der acht Datenlogger systematisch ausgewertet. Dabei zeigte sich ein generelles Problem, wenn unterschiedliche, zeitbasierte Messreihen miteinander verknüpft werden sollen. Es musste ein einheitliches Datensystem unterschiedlicher eigener Messungen und Messungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) realisiert werden. Dabei mussten einerseits die sehr unterschiedlichen Messintervalle vereinheitlicht und andererseits die Zeitformate aufeinander abgestimmt werden. Während unsere Messungen an dem Probestein und die Messungen des DWD im europäischen Datums- und Zeitformat vorlagen, lieferten die Datenlogger die Messergebnisse mit einem amerikanischen Datums- und Zeitformat. Allein die Konvertierung der Daten in ein einheitliches Format hat einen sehr hohen Zeitaufwand erfordert. Alle unterschiedlichen Klimadatenreihen liegen jetzt im europäischen Zeitformat als stündliche und tägliche Daten vor und konnten so miteinander in Beziehung gesetzt werden.

Die Ultraschallmessungen an den Stelen am Schloss Charlottenhof wurden um weitere Messungen ergänzt, um eine repräsentative Anzahl von Messungen zu erhalten. Die endgültigen Auswertungen lieferten abgesicherte Aussagen zur Feuchtigkeitsabhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeit und konnten in den Leitfaden zur Ultraschallmessung an Marmorskulpturen eingearbeitet werden.

Der überarbeitete Kriterienkatalog zur Bewertung von Marmorskulpturen wurde im Mai 2014 an zwei weiteren Skulpturen in Dresden im Großen Garten getestet.

Die vier, noch nicht vermessenen Marmorkopien an der großen Fontäne im Park von Potsdam-Sanssouci können erst im Sommer 2015 mit Ultraschall untersucht werden, um die Schaffung der Basis für ein späteres Monitoringprogramm abzuschließen.

Im Laufe der Ergebnisauswertung zeigte sich ein Untersuchungsdefizit, das zu einer nicht tolerierbaren Interpretationsunsicherheit der Untersuchungsergebnisse führte. Es lagen keine Messungen zum Tagesgang der

Messungen vor, so dass es nicht möglich war, den eventuell damit zusammenhängenden Messfehler abzuschätzen. Diese Messungen waren im ursprünglichen Untersuchungsprogramm nicht vorgesehen. Daher haben wir uns entschlossen, diese Messungen zusätzlich durchzuführen, obwohl deren Realisierung einen erheblichen zeitlichen und finanziellen Mehraufwand zur Folge hatte. Diese Messungen konnten aus klimatischen Ursachen erst Mitte April 2015, also erheblich nach Projektende, durchgeführt werden, was die Ergebnisauswertung und Berichtsfertigstellung verzögert hat.

3. Projektergebnisse

3.1. Sorptionsisothermen

3.1.1. Untersuchungsziel

Der ursprüngliche Gedanke war, anhand von Sorptionsisothermen unterschiedlich verwitterter Marmorbohrkerne aus „Carrara-Statuario“ und „Carrara-Ordinario“ durch begleitende Ultraschalltransmissionsmessungen die Korrelation zwischen den Feuchtezuständen des Marmors und der Ultraschallgeschwindigkeit zu finden.

3.1.2. Bohrkerne

Gemeinsam mit den Restauratoren der Schlösserstiftung wurden acht verwitterte und unverwitterte Marmorstücke zur Beprobung ausgewählt. Diese Stücke bestehen aus „Carrara-Statuario“ und „Carrara-Ordinario“. Die Proben sind Bohrkerne von Durchmessern zwischen 10 ... 40mm, die durch die Restauratoren der Schlösserstiftung hergestellt wurden. Insgesamt standen über 60 Bohrkerne zur Verfügung.

3.1.2.1. Dünnschliffe

Zur Charakterisierung der Marmorvarietäten der einzelnen Bohrkernserien und des Probesteines (Kleiner Stein) wurden Herrn Dipl.-Geol. Michael Krempler Dünnschliffe hergestellt und ausgewertet.

Photo_Nr.	Mikroskopie	Text
Probe Nr. 01/1/2		
01-0	II POL, untere BK 10mm	Statuario, neu, Übersicht
01	II POL, untere BK 2,3mm	Statuario, neu, „Parkettgefüge, relativ gleichmäßige KG-Verteilung, glatte o. geschwungene KoGG, keine deutliche Einregelung d. KLA
02	II POL, untere BK 1,5 mm	deutlich gerade oder nur leicht geschwungene Korngrenzen
03-1	II POL, untere BK 0,6mm	Korngrenzen mit feinen Spaltporen, Lösungserscheinungen ?
03-2	II POL, untere BK 0,6mm	untere Bildhälfte Korngrenzflächen geschlossen (im Lichtmikroskop), obere Bildhälfte Korngrenzflächen nicht geschlossen-deutliches Relief

Probe Nr. 02/1/2		
04-0	II POL, untere BK 10mm	Ordinario, neuÜbersicht
04	II POL, untere BK 2,3mm	Ordinario, neu, weites KG-Spektrum (auch viele sehr kleine Kristalle), KoGG häufig buchtig oder verzahnt, schwache Einregelung der KLA
05	II POL, untere Bk 1,5mm	häufig kleine Subkristalle oder völlig xenomorpher Kalzit in den Zwickeln zwischen größeren Kristallen
06	X POL, untere BK 0,5mm	kalzitisches (?) Zwischenmittel zwischen größeren Kristallen
Probe Nr. 03/1/2		
07-0	II POL, untere BK 10mm	Statuario, alt, Übersicht, deutlicher Korngrößenunterschied zu „Statuario neu“ kleine Punkte sind wahrscheinlich Schleifmittel
07	II POL, untere BK 2,3mm	Statuario, alt, „Parkettgefüge“, gleichmäßige KG-Verteilung, KoGG glatt bis geschwungen, Korngrenzflächen nicht geschlossen, keine deutliche Einregelung der KLA, deutliche Zwillingsstreifung im ganzen Schliff
08	II POL, untere BK 1,5mm	gerade KoGG, Kristallgrenzflächen mit deutlichem Relief (--> Spaltporen ?)
09	II POL, untere BK 0,6mm	Spaltporen
Probe Nr. 03/1/3		
10-0	II POL, untere BK 10mm	Statuario, alt, Übersicht, deutlicher Korngrößenunterschied zu „Statuario neu“ häufige Verzwilligung, blau freier Porenraum (in der Übersicht deutlicher als in größerer Vergrößerung)
10	II POL, untere BK 2,3mm	Statuario, alt, „Parkettgefüge“, deutliche Zwillingslamellierung, keine deutliche Einregelung der KLA, Kristallgrenzflächen oft nicht geschlossen
11	II POL, untere BK 1,5mm	KoGG gerade oder geschwungen, Spaltporen
12-1	II POL, untere BK 0,6mm	Spaltporen, Lösung an Kristallgrenzflächen (?)
12-2	II POL, untere BK 0,6mm	offene Spaltporen mit blau eingefärbtem Einbettungsmittel

Probe Nr. 04/1/2		
13-0	II POL, untere BK 10mm	Statuario, alt, Übersicht, deutlicher Korngrößenunterschied zu „Statuario neu“ mit „Ader“ (meist opake Bestandteile)
13-1	II POL, untere BK 2,3mm	Statuario, alt, „Parkettgefüge“, gleichmäßige KG- verteilung, KoGG gerade bis geschwungen, keine deutliche Einregelung der KLA
13-2	II POL, untere BK 2,3mm	schwarze „Adern“ durch meist opake Kristallite
14	II POL, untere BK 1,5mm	meist gerade KoGG, Kristallgrenzflächen nicht geschlossen (Spaltporen ?)
15	II POL, untere BK 0,6mm	Kristallgrenzflächen geschlossen (rechte Bildhälfte) oder leicht angelöst (?)
Probe Nr. 05/1/2		
16-0	II POL, untere BK 10mm	Ordinario (aber auch mit Statuario-ähnlichen Bereichen), alt, Übersicht,
16	II POL, untere BK 2,3mm	Ordinario (aber auch mit Statuario-ähnlichen Bereichen), alt, relativ ungleichmäßige KG- verteilung, KoGG geschwungen-buchtig bis verzahnt, undeutliche Einregelung d. KLA
17	II POL, untere BK 1,5 mm	weites KG-Spektrum (große Kristalle neben sehr kleinen Kr.)
18	II POL, untere BK 0,6mm	Kristallgrenzflächen mit Lösungserscheinungen ?
Probe Nr. 06/1/2		
19-0	II POL, untere BK 10mm	Ordinario, alt, Übersicht, häufig engständige Verzwilligung
19	II POL, untere BK 2,3mm	Ordinario, alt, ungleichmäßige KG-verteilung, sehr viele kleine Kristalle in den Zwickeln größerer Kristalle, keine deutliche Einregelung der KLA, deutliche Zwillinglamellierung
20	II POL, untere BK 1,5mm	sehr kleine Kristalle und/oder ein anderes Zwischenmittel zwischen größeren Kristallen
21	X POL, untere BK 0,6mm	Zwischenmittel (kein amorphes Kunstharz der Einbettung, dieses ist eingefärbt)

Probe Nr. 07/1/2		
22-0	II POL, untere BK 10mm	Statuario, alt, Übersicht waagerechte Risse in der rechten Bildhälfte (blau eingefärbt)
22	II POL, untere BK 2,3mm	Statuario, alt, „Parkettgefüge“, gleichmäßige KG- verteilung, KoGG gerade bis geschwungen, intergranulare Risse, keine deutliche Einregelung der KLA
23	II POL, untere BK 1,5mm	gerade bis geschwungene Kornkontakte, intergranulare Risse
24	II POL, untere BK 0,6mm	Gefügeentfestigung durch intergranulare Risse
Probe Nr. 08/1/2		
25-0	II POL, untere BK 10mm	Ordinario (aber auch mit Statuario-ähnlichen Bereichen), alt, Übersicht
25	II POL, untere BK 2,3mm	Ordinario (aber auch mit Statuario-ähnlichen Bereichen), alt, relativ ungleichmäßige KG- verteilung, schwache Einregelung der KLA, KoGG gerade-geschwungen-gebuchtet-verzahnt, viele kleine Subkörner in den Zwickeln
26	II POL, untere BK 1,5mm	gebuchtete bis verzahnte KoGG, Subkörner
27	II POL, untere BK 0,6mm	Spaltporen, angelöste Kristallgrenzflächen (?)
Probe Nr. 10/1/2		„Kleiner Stein“ mit Meßfühlern
28-0	II POL, untere BK 10mm	Ordinario (aber auch mit Statuario-ähnlichen Bereichen), Übersicht
28	II POL, untere BK 2,3mm	Ordinario (aber auch mit Statuario-ähnlichen Bereichen), relativ ungleichmäßige KG-verteilung, relativ deutliche Einregelung der KLA (im Bild re. – li.)
29	II POL, untere BK 1,5mm	viele kleine Subkörner zwischen größeren Kristallen (Merkmal für Ordinario)
30	II POL, untere BK 0,6mm	Subkörner rund um einen größeren Kristall, KoGG gebuchtet bis verzahnt

KG – Korn(=Kristall)größe(n)

KoGG – Korn(=Kristall)grenzengeometrie

KLA – Kornlängsachsen

II POL – parallele Polarisatoren

XPOL – gekreuzte Polarisatoren

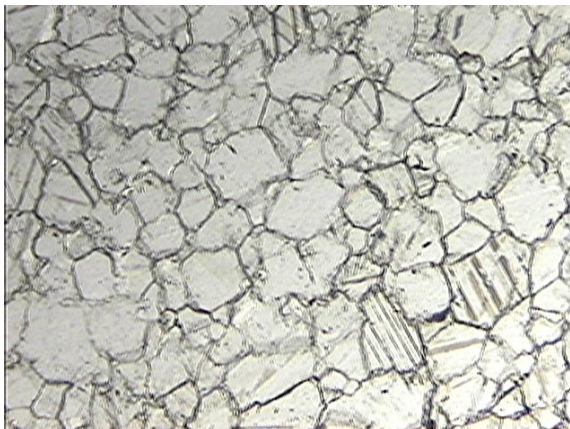
BK - Bildkante

Probe 01/1/2

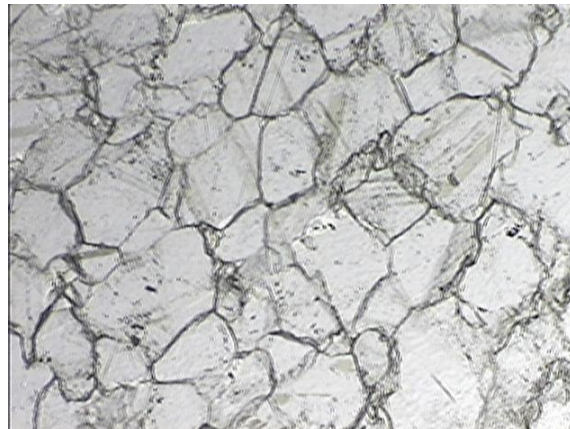


01-0-Pr_01-1-2-untBK10mm

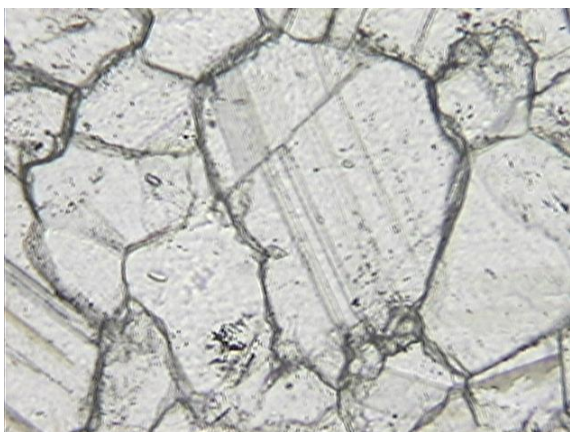
Statuario, neu
5151 m/s



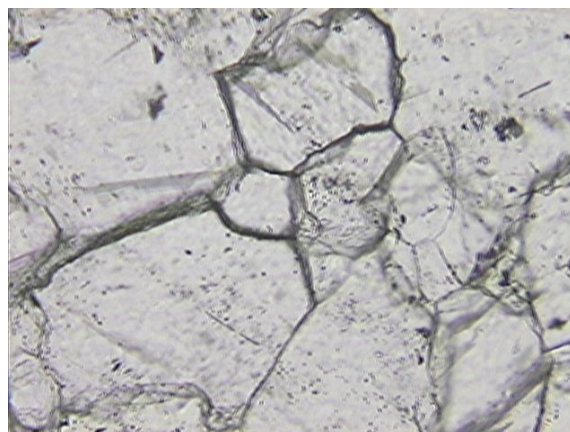
01-Pr_01-1-2-untBK2,3mm-13_34_22



02-Pr_01-1-2-untBk1,5mm-13_35_21



03-1-Pr_01-1-2-untBk0,6mm-13_37_46



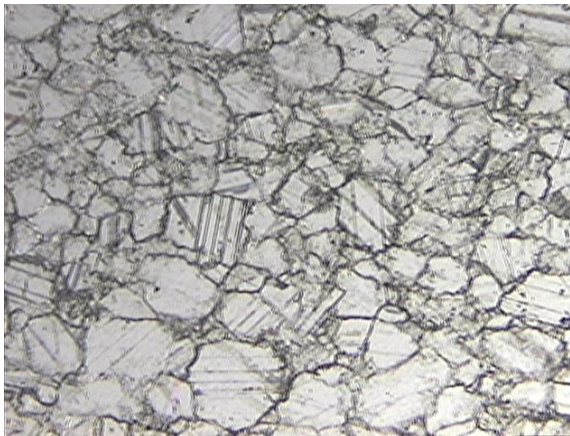
03-2-Pr_01-1-2-untBk0,6mm-13_48_32

Probe 02/1/2

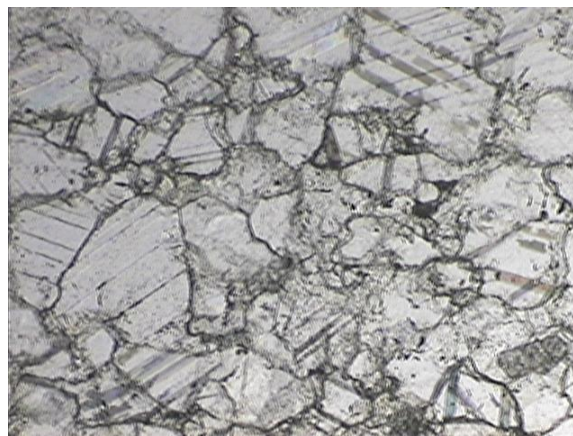


04-0-Pr_02-1-1-untBk10mm

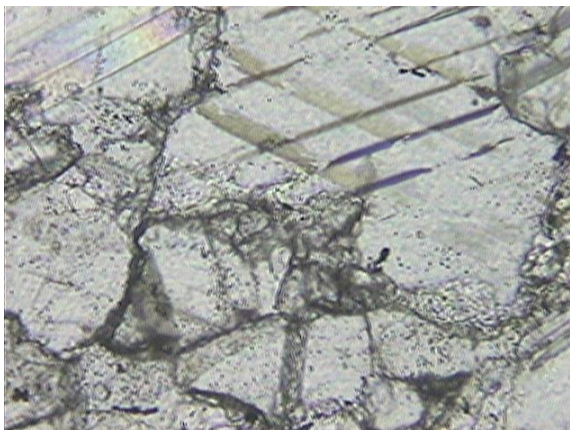
Ordinario, neu
5911 m/s



04-Pr_02-1-1-untBk2,3mm-13_39_26



05-Pr_02-1-2-untBk1,5mm-13_40_54



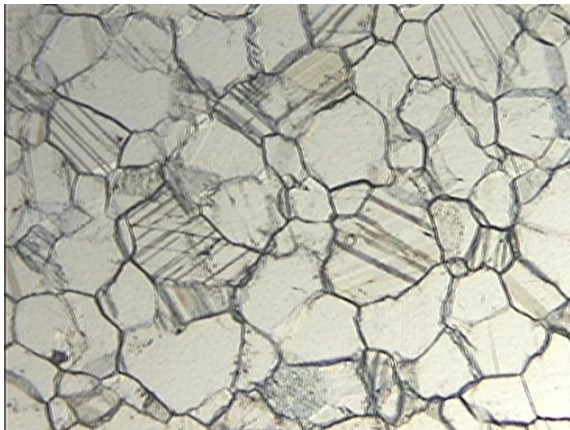
06-Pr_02-1-2-untBK0,6mm-XPOL-13_41_49

Probe 03/1/2

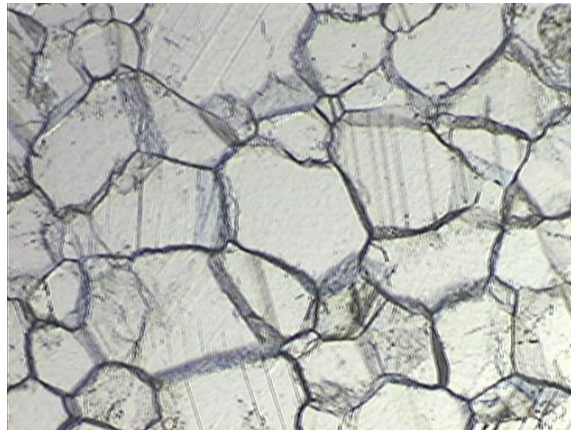


07-0-Pr_03-1-2-untBk10mm

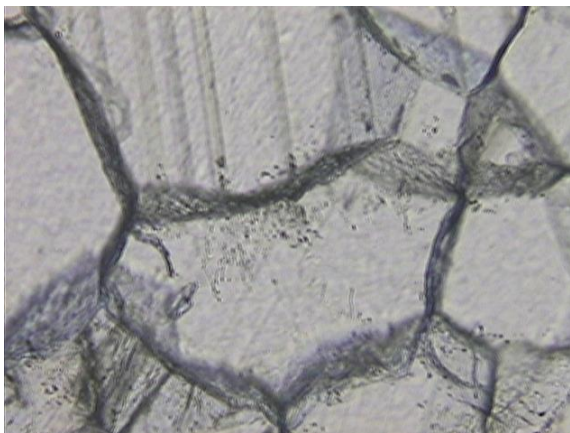
Statuario, alt
1770 m/s



07-Pr_03-1-2-untBk2,3mm-13_44_25



08-Pr_03-1-2-untBk1,5mm-13_45_42



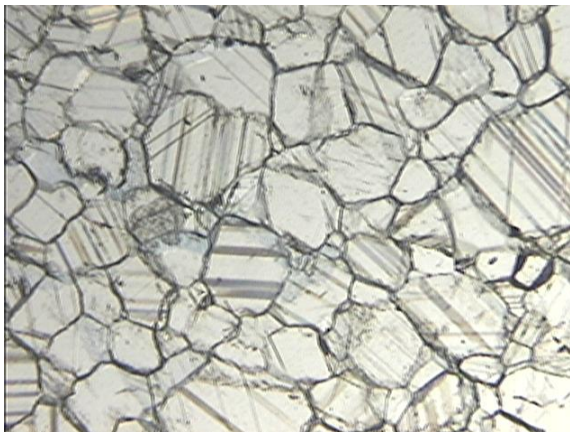
09-Pr_03-1-2-untBk0,6mm-13_46_12

Probe 03/1/3

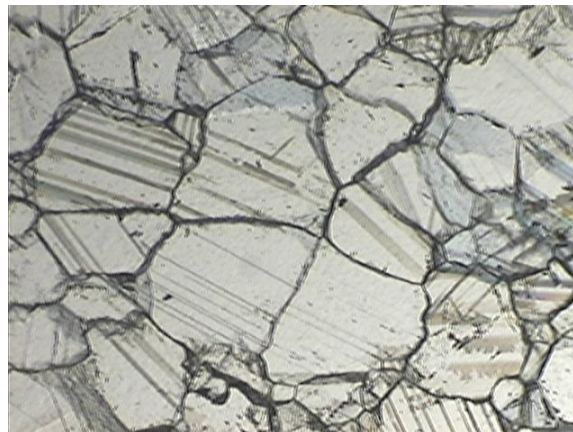


10-0-Pr_03-1-3-untBk10mm

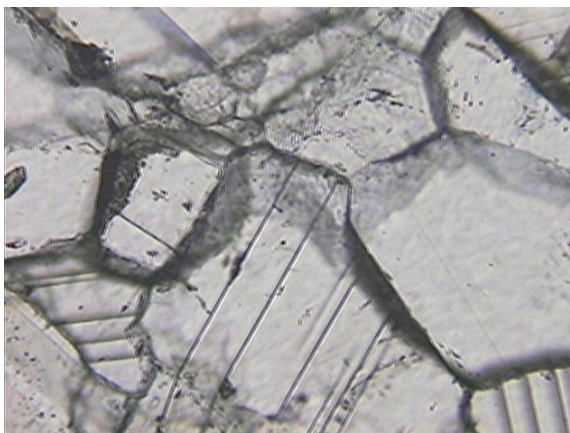
Statuario, alt
1770 m/s



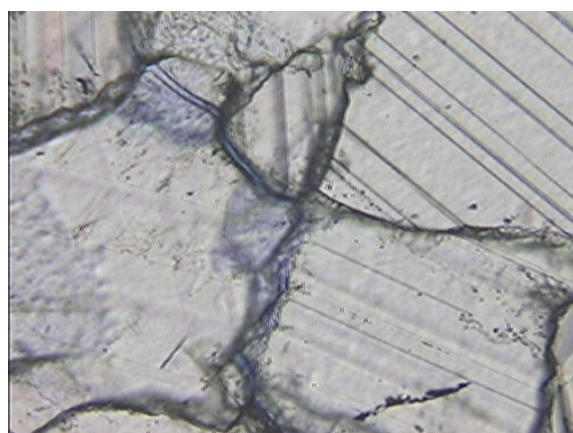
10-Pr_03-1-3-untBk2,3mm-13_50_50



11-Pr_03-1-3-untBk1,5mm-13_51_12



12-1-Pr_03-1-3-untBk0,6mm-13_52_04



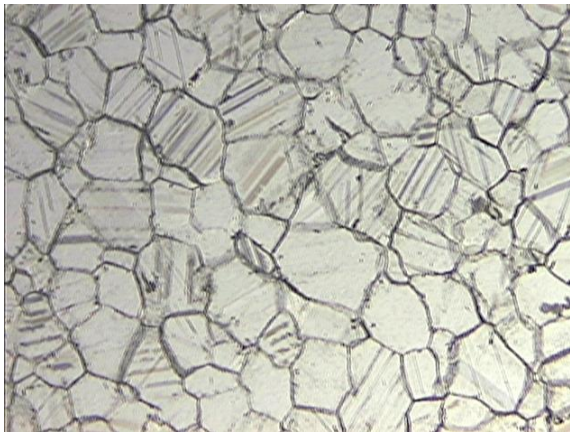
12-2-Pr_03-1-3-untBk0,6mm-
13_55_18

Probe 04/1/2

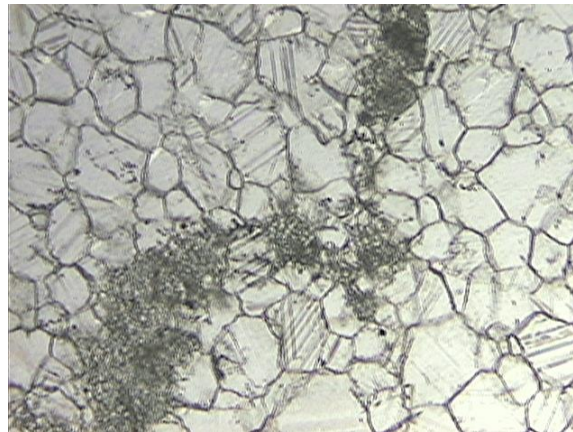


13-0-1-Pr_04-1-2-untBk10mm

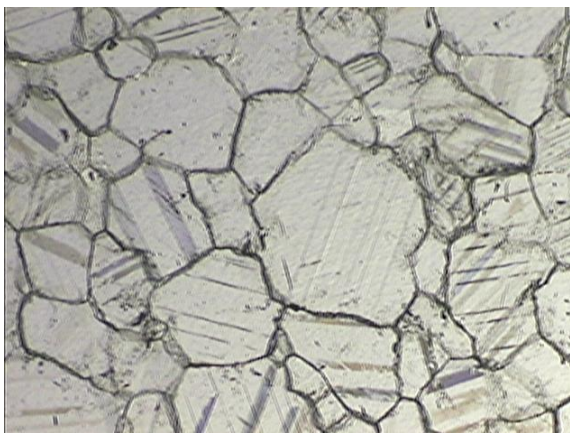
Statuario, alt
2703 m/s



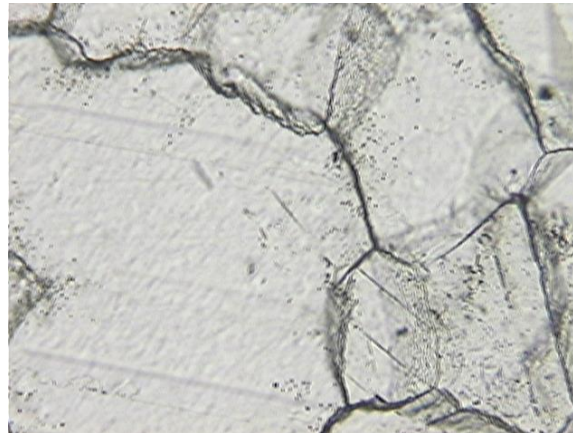
13-1-Pr_04-1-2-untBk2,3mm-13_56_34



13-2-Pr_04-1-2-untBk2,3mm-
13_57_22



14-Pr_04-1-2-untBk1,5mm-13_57_59



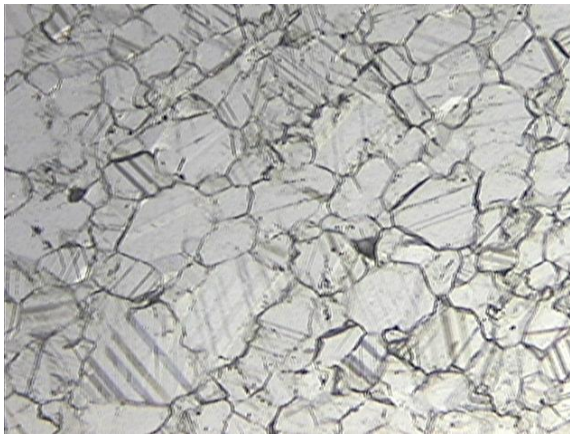
15-Pr_04-01-2-untBk0,6mm-13_59_00

Probe 05/1/2

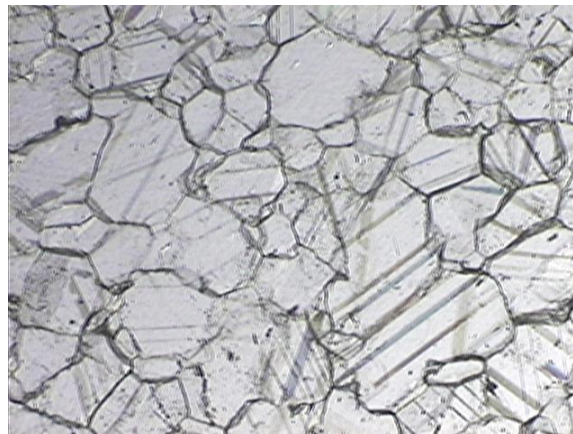


16-0-Pr_05-1-2-untBk10mm

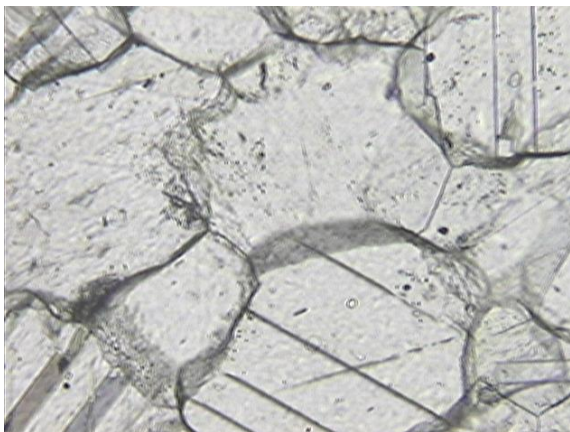
Ordinario, alt
3208 m/s



16-Pr_05-1-2-untBk2,3mm-16_27_01

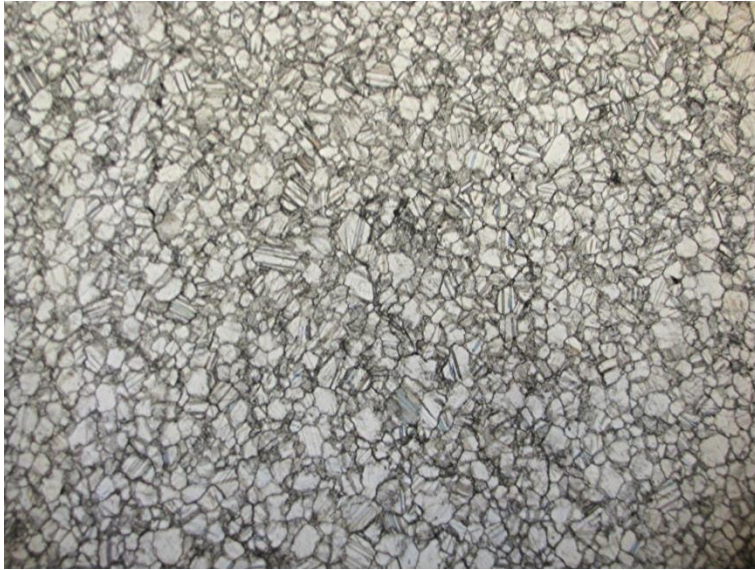


17-Pr_05-1-2-untBk1,5mm-16_27_38



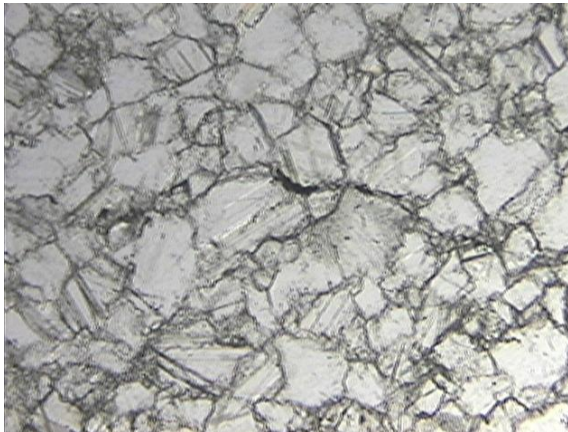
18-Pr_05-1-2-untBk0,6mm-16_28_39

Probe 06/1/2



19-0-Pr_06-1-2-untBk10mm

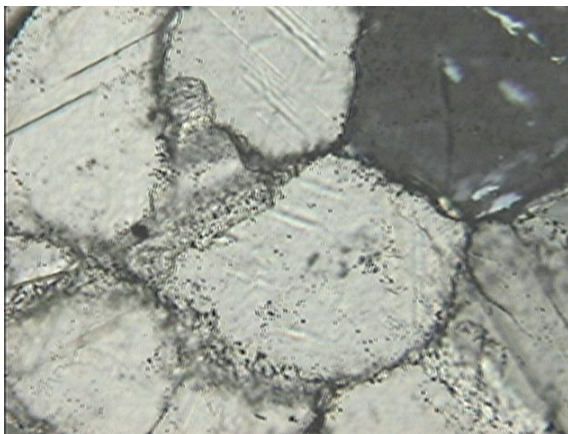
Ordinario, alt
3966 m/s



19-Pr_06-1-2-untBk2,3mm-16_32_20



20-Pr_06-1-2-untBk1,5mm-16_32_53



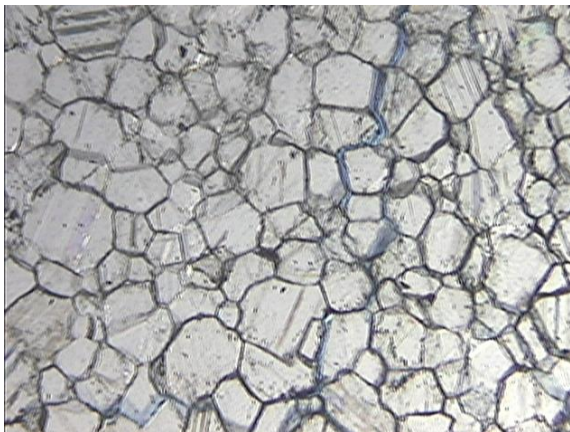
21-Pr_06-1-2-untBk0,6mm-XPOL-16_34_45

Probe 07/1/2

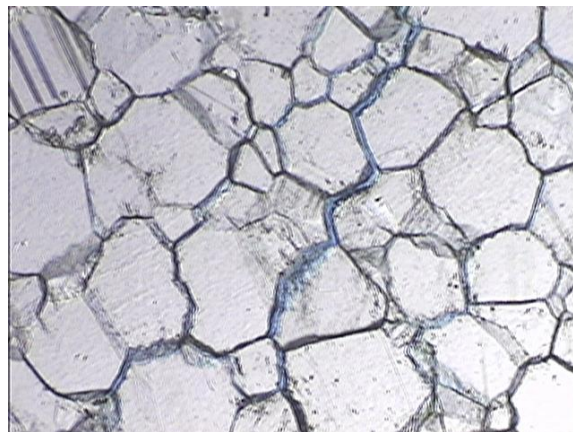


22-0-Pr_07-1-2-untBk10mm

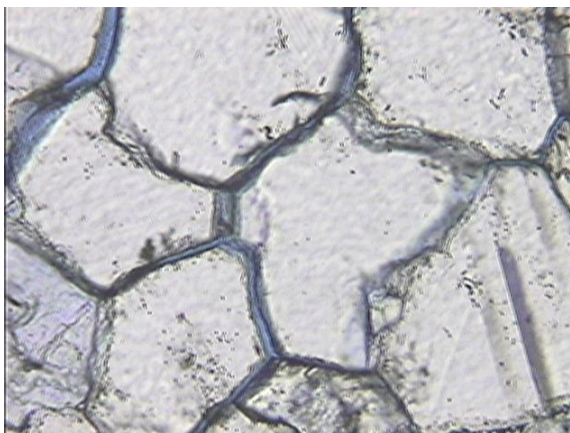
Statuario, alt
1567 m/s



22-Pr_07-1-2-untBk2,3mm-16_36_26



23-Pr_07-1-2-untBk1,5mm-16_37_07



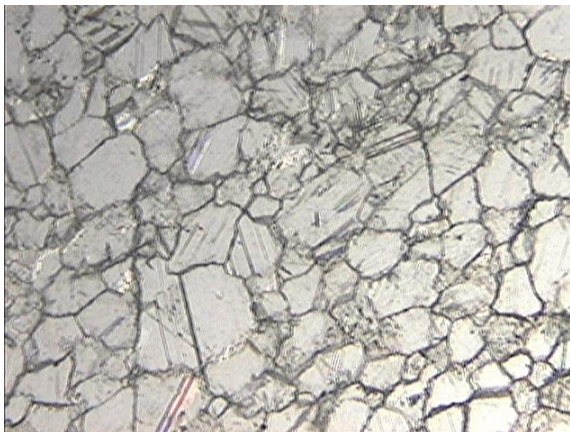
24-Pr_07-1-2-untBk0,6mm-16_37_41

Probe 08/1/2

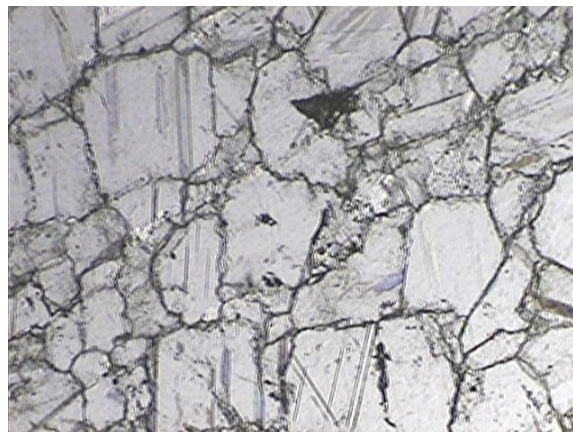


25-0-Pr_08-1-2-untBk10mm

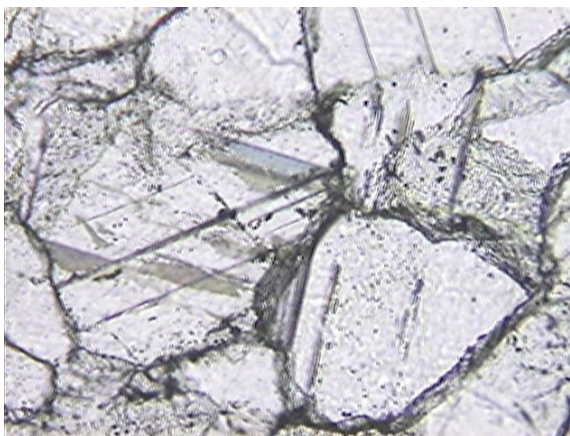
Ordinario, alt
4287 m/s



25-Pr_08-1-2-untBk2,3mm-16_40_02



26-Pr_08-1-2-untBk1,5mm-16_40_36

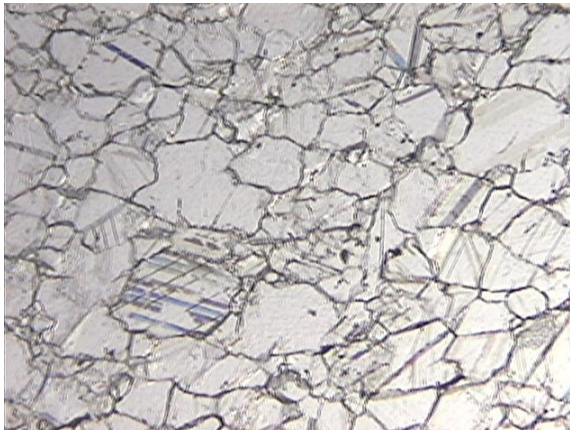


27-Pr_08-1-2-untBk0,6mm-16_42_13

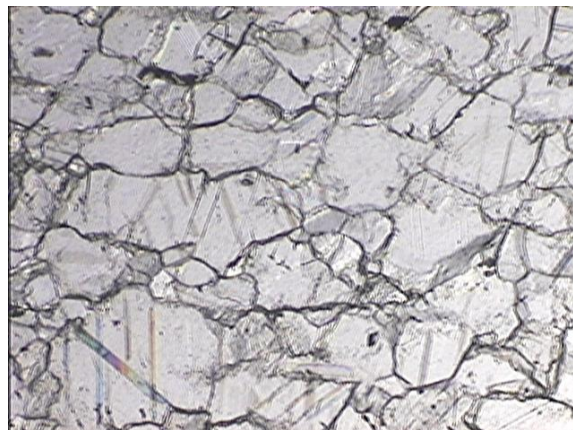
Probe 10/1/2 – „Kleiner Stein“



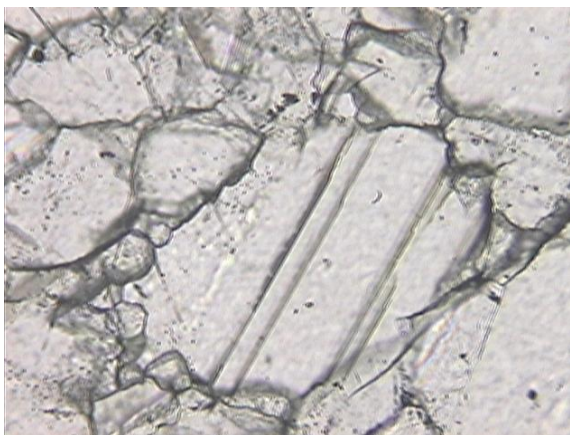
28-0-Pr_10-1-2-untBk10mm

Ordinario, alt
2930 m/s

28-Pr_10-1-2-untBk2,3mm-16_43_36



29-Pr_10-1-2-untBk1,5mm-16_43_58

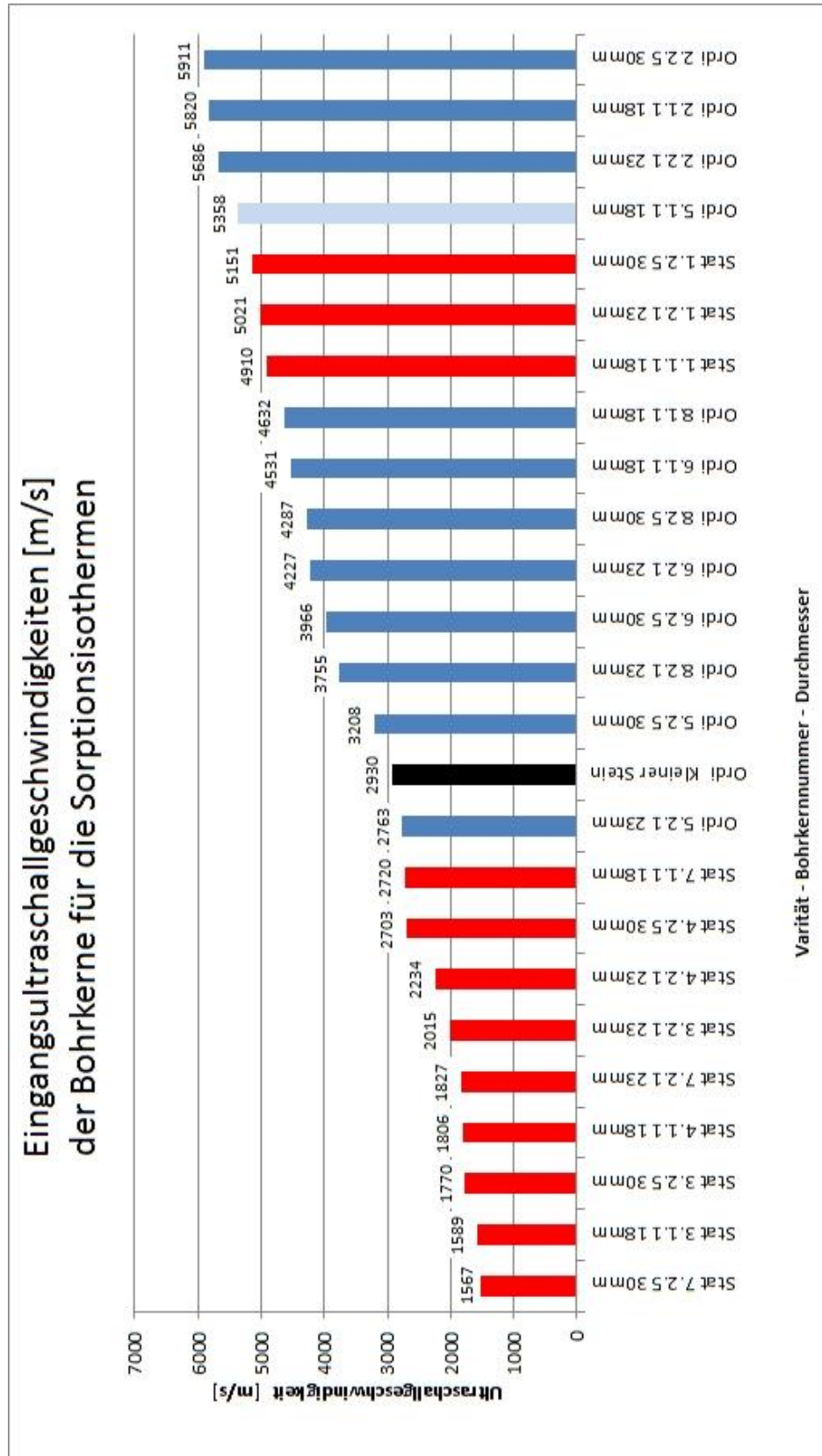


30-Pr_10-1-2-untBk0,6mm-16_44_17

Die Bohrkern stellen eine gute Auswahl der Marmorvarietäten „Statuario Carrara“ und „Ordinario Carrara“ mit sehr unterschiedlichen Gefügeständen dar.

3.1.2.2. Ultraschallmessungen

Alle ausgewählten Bohrkernes wurden mit Ultraschall vermessen, um ihre Gefügestände grob miteinander vergleichen zu können.



Es zeigt sich, dass eine nahezu vollständige Abstufung unterschiedlicher Gefügestände der Marmorbohrkerne zu finden ist.

3.1.2.3. Salzanalysen

Da das Probenmaterial unter nicht vollständig nachvollziehbaren Bedingungen in den vergangenen Jahren gelagert war, musste sichergestellt werden, dass dessen Salzbelastung vernachlässigbar ist und die hygrischen Eigenschaften der Marmorproben dadurch nicht beeinflusst werden.

Die Salzuntersuchungen an den Bohrkernen wurden im Labor Ettl&Schuh (München) durchgeführt.

Die Proben sind salzfrei. Daher war es nicht notwendig, die Kationen zu bestimmen.

Probe-Nr.	Sulfat-Gehalt [M.-%]	Nitrat-Gehalt [M.-%]	Chlorid-Gehalt [M.-%]	Calcium-Gehalt [M.-%]	Magnesium-Gehalt [M.-%]	Natrium-Gehalt [M.-%]	Kalium-Gehalt [M.-%]
1	< 0,01	0,003	0,004	-	-	-	-
2	< 0,01	0,003	0,004	-	-	-	-
3	< 0,01	< 0,001	0,002	-	-	-	-
4	< 0,01	< 0,001	0,003	-	-	-	-
5	< 0,01	0,001	0,002	-	-	-	-
6	< 0,01	0,001	0,003	-	-	-	-
7	< 0,01	0,001	0,002	-	-	-	-
8	< 0,01	0,002	0,004	-	-	-	-

Somit können die Bohrkern für weitere Untersuchungen bedenkenlos verwendet werden

3.1.3. Untersuchungsmethode

Die Sorptionsisothermen sollten in Exsikkatoren über gesättigten unterschiedlichen Salzlösungen bei möglichst gleichmäßigen Temperaturen durch regelmäßige Wägungen mittels einer Analysenwaage aufgenommen werden. Diese Wägungen wurden durch Ultraschallmessungen begleitet.

Es war vorgesehen, eine Feuchtestufung der Atmosphären über den Salzlösungen von etwa 10% zu erreichen. Die Trockenphase wurde mit Kieselgel (3% RH) und Molekularsieben (0,1% RH) durchgeführt, um eine Temperaturbelastung und Probenveränderungen durch thermische Trocknung zu vermeiden.

Die Temperatur- und Feuchtekontrolle erfolgte mittels entsprechenden Sensoren, die sich im Exsikkator befanden.



Messanordnung für Sorptionsmessungen

3.1.4. Messergebnisse

Es zeigte sich, dass der Trocknungsprozess sehr lange dauerte und nach 18 Monaten noch nicht vollständig abgeschlossen war. Temperaturschwankungen beeinflussten die Messungen erheblich. Daher war abzusehen, dass es rein zeitlich den Projektzeitraum erheblich überschreiten würde, diese Messungen fortzusetzen.

Gleichzeitig zeichnete sich nach den Messungen an den Dichterstellen ab, dass der relativen Luftfeuchtigkeit nur eine untergeordnete Rolle zukommt, wenn man den Einfluss von Feuchtigkeit im Porenraum auf die Ultraschallgeschwindigkeit betrachten will.

Um dieses Ziel mittels Sorptionsisothermen zu erreichen, müsste man diese bei sehr unterschiedlichen und sehr konstanten Temperaturen messen und mittels Ultraschallmessungen begleiten. Da die temperaturabhängige absolute Feuchte im Porenraum einen wesentlichen Beitrag zur Ultraschallgeschwindigkeit eines porösen Marmors leistet, mussten andere Möglichkeiten gesucht werden, diesen Einfluss zu messen.

Der eingeleitete Trockenvorgang der Bohrkerne wurde bis zur Gewichtskonstanz fortgesetzt, um nach Projektende zu entscheiden, was mit diesen Proben geschehen soll. Denkbar wäre eine nachfolgende Wassersättigung, um weitere Porenraumaussagen zu erhalten.

Serie	Bohrkern	Carrara	Durchmesser [cm]	Porosität 09-2013 [Vol-%]	Eingangsgeschw. US-Geschw. 2012 [m/s]	US-Geschw. 08-2015 [m/s]	US-Geschw.diff. [m/s]
	1.1.1	Statuario	1,772	1,3296	4910	4807	103
	2.1.1	Ordinario	1,770	0,6637	5820	5775	45
	3.1.1	Statuario	1,771	8,4428	1589	957	632
	4.1.1	Statuario	1,766	3,0772	1806	1204	602
	5.1.1	Ordinario	1,779	1,7145	3144	3061	83
	6.1.1	Ordinario	1,778	2,6646	4531	4435	96
	7.1.1	Statuario	1,782	2,2916	2720	2559	161
	8.1.1	Ordinario	1,780	1,5192	4632	4531	101
	1.2.1	Statuario	2,299	1,8890	4989	5134	-145
	2.2.1	Ordinario	2,301	3,1987	5686	6036	-350
	3.2.1	Statuario	2,285	0,9620	1884	1757	127
	4.2.1	Statuario	2,272	2,0997	2303	2115	188
	5.2.1	Ordinario	2,298	4,6256	2763	3034	-271
	6.2.1	Ordinario	2,275	1,4280	4227	4483	-256
	7.2.1	Statuario	2,264	5,7374	1811	1737	74
	8.2.1	Ordinario	2,256	0,9024	3728	3830	-102
	1.3.1	Statuario	2,972	0,7753	5151	4926	225
	2.3.1	Ordinario	2,969	0,7834	5911	5875	36
	3.3.1	Statuario	2,978	2,1385	1770	1595	175
	4.3.1	Statuario	2,970	1,7141	2703	2593	110
	5.3.1	Ordinario	2,974	1,2524	3208	3158	50
	6.3.1	Ordinario	2,970	0,8965	3966	4016	-50
	7.3.1	Statuario	2,971	2,5599	1567	1755	-188
	8.3.1	Ordinario	2,968	0,8330	4287	4446	-159

Bemerkenswert sind in diesem Zusammenhang die negativen Differenzen, die bei einigen größeren Bohrkernen anzutreffen sind. Diese resultieren meist aus Schallgeschwindigkeitsanstiegen am Ende der Trocknungsphase. Dieser Effekt wurde bei Messungen in den 80iger Jahren schon beobachtet und kann noch nicht zufriedenstellend interpretiert werden. Als Erklärung könnte das Verschwinden der die Kristalle umschließenden und trennenden Wasserfilme dienen, so dass dann wieder direkte Festkörperkontakte zwischen den Calcitkristallen möglich sind, die wiederum eine bessere Schallleitung und damit höhere Schallgeschwindigkeiten ermöglichen.

3.1.5. Pore Aspect Ratio - Modell

Professor Rolf Snethlage hat im Rahmen seiner Projektarbeit die gemessenen Zusammenhänge zwischen der Abnahme der P-Wellengeschwindigkeit und der Porosität des Marmors in das geophysikalische Pore Aspect Ratio – Modell eingearbeitet.

Im Folgenden werden Passagen aus seiner Ausarbeitung „Ultraschallgeschwindigkeit von Marmor in Abhängigkeit von der Rissporosität“ zitiert.

Einleitung

Der Einfluss von Poren auf die Geschwindigkeit von elastischen Wellen in Gesteinen ist seit geraumer Zeit Gegenstand vielfältiger Untersuchungen. Überwiegend stammen diese Untersuchungen aus der Geophysik und befassen sich mit seismischen Wellen, um bessere Vorhersagen über die Geschwindigkeitsverteilung von Erdbebenwellen mit der Tiefe machen zu können. Beispielhaft seien genannt: O'Connell & Budiansky (1974), KUSTER & Toksöz (1974), Toksöz et al. (1976), LEE (2008). Diese Untersuchungen zeigen, dass bei jeweils konstanter Gesamtporosität Mikrorisse die seismische Geschwindigkeit viel mehr senken als Kugelporen oder Zylinderporen. Der Effekt wird dadurch hervorgerufen, dass Mikrorisse die elastischen Konstanten von Gesteinen viel stärker mindern als Kugelporen. TOKSÖZ et al (1976) referieren das Beispiel, dass bei einem Basalt mit 5% Porenraum Kugelporen die p-Wellengeschwindigkeit um 4 %, Mikrorisse diese jedoch um 13 % reduzieren. Siehe zu diesen Ausführungen

http://www-odp.tamu.edu/publications/163_SR/chap_03/ch3.htm3.htm

Um die starke Abnahme der p-Wellengeschwindigkeit schon bei geringen Porositäten formelmäßig beschreiben zu können, führen die oben genannten Autoren das sog. pore aspect ratio ein. Diese Zahl beschreibt das Verhältnis von Breite zu Länge eines Risses, der als ellipsenförmig betrachtet wird, und beträgt in den meisten Fällen 0,1 oder 0,01, mitunter sogar 0.001.

Siegesmund und Mitarbeiter (Koch & Siegesmund 2004, Ruedrich j (2003), Shushakova et al. 2013, Siegesmund et al. 2010, Siegesmund et al. 2000, Strohmeyer2003, Weiss et al. 2000, Weiss et al. 2002a, Weiss et al. 2002b, SIEGESMUND et al. 2004) haben das pore aspect ratio in ihre Untersuchungen zur Ultraschallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Porosität bei Marmor eingeführt. Es gelingt ihnen dadurch, die starke Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeit schon im Bereich geringer Porositäten zu erklären. Das pore aspect ratio bewegt sich bei ihren Messungen überwiegend im Bereich zwischen 0,01 und 0.005.

Ultraschallgeschwindigkeit und unterschiedliche pore aspect ratios.

Die folgende Abbildung 2 basiert auf einer Abbildung in SCHÖN (2004). Sie beschreibt die Abhängigkeit des Quality Index bzw. der normierten Ultraschallgeschwindigkeit der p-Welle in Abhängigkeit der Porosität und unterschiedlichen pore aspect ratios. Für trockene und Wasser gesättigte Bedingungen existieren unterschiedliche Kurvenverläufe. Der Quality Index auf der Abszisse entspricht hier wie gesagt einer normierten p-Wellengeschwindigkeit.

Eingetragen sind die Messpunkte von Carrara Marmorproben aus Untersuchungen von Köhler mit unterschiedlichem Verwitterungsgrad, d.h. unterschiedlichem Porenvolumen und unterschiedlicher p-Wellengeschwindigkeit. Dazu wurden die gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten durch Division mit

der mittleren p -Wellengeschwindigkeit des Calcitkristalls $v_p = 6,54 \text{ km/s}$ normiert. Verwendet wurde das sog. VRH-Mittel nach Voigt-Reuss-Hill (siehe Shushakova 2013).

In Abbildung 2 ist zu erkennen, dass die Mehrzahl der Messwerte ziemlich dicht in einem Feld zwischen einem pore aspect ratio 0,01 und 0,005 für trockene Bedingungen liegen. Damit kann gezeigt werden, dass die Abnahme der p -Wellengeschwindigkeit durch Mikrorissbildung verursacht wird. Diejenigen Proben, welche Porositätswerte höher als 4 Vol % erreichen, fallen aus dem Rahmen. Für ihr Verhalten kann gegenwärtig keine Erklärung abgegeben werden.

Für das DBU Projekt ist die Übereinstimmung mit den Messungen von Siegesmund und Mitarbeitern als erfreulich zu bezeichnen (Koch & Siegesmund 2004, Siegesmund et al. 2010, Siegesmund et al. 2000, Weiss et al. 2000, Weiss et al. 2002a, Weiss et al. 2002b, SIEGSMUND et al. 2004). Auch deren Messwerte liegen vorherrschend im Bereich der pore aspect ratios 0,01 und 0,005.

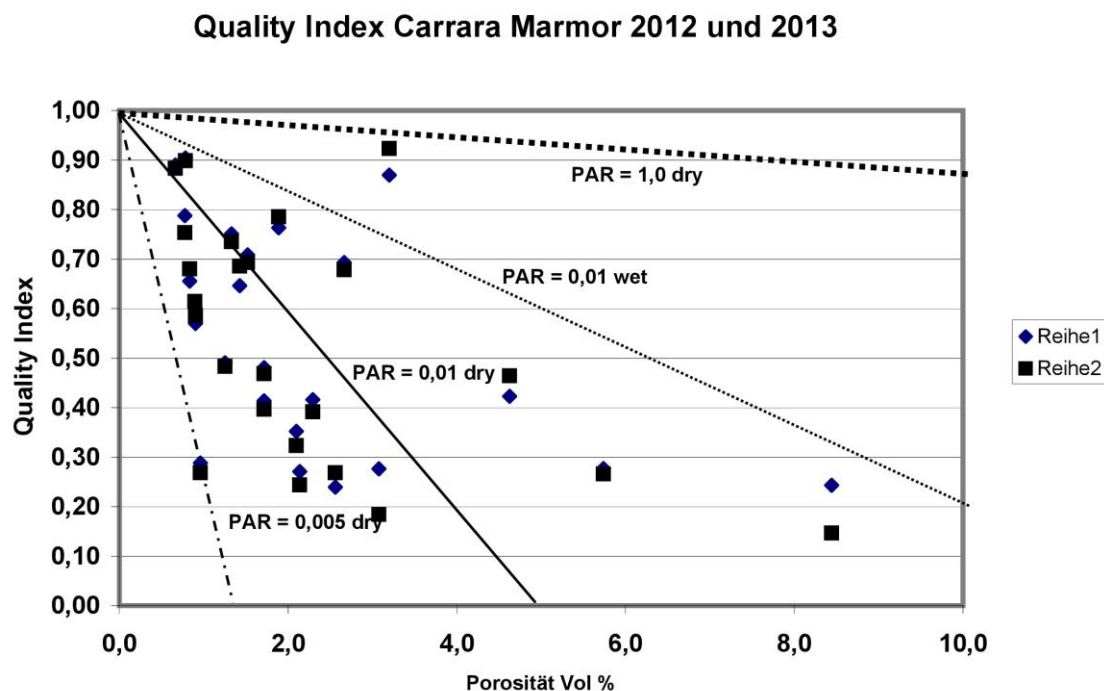


Abbildung 2: Quality Index von Marmorproben aus den Untersuchungen von Köhler. Die Messpunkte liegen im Bereich der pore aspect ratios 0,01 und 0,005.

Pore aspect ratio und Marmorgefüge

KUSTER & TOKSÖZ (1974) haben in ihren Ableitungen ellipsenförmige Rissformen und deren aspect ratio, d. h. das Verhältnis von maximaler Breite zu

maximaler Länge in Ansatz gebracht. Die rapide Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeit von Marmor kann durch Mikrorisse in den Calciten selbst, zum Beispiel durch Öffnungen der Spaltflächen, oder auch durch Aufweitungen der Spaltporen verursacht sein.

Die Porosität zwischen den Kristallen in einem Marmor ist, wie zahlreiche Gefügebildungen mit dem REM demonstrieren, durch Spaltporen bestimmt, deren geometrische Form mit ellipsenförmigen Rissen verglichen werden kann. Die Spaltporen haben im Querschnitt annähernd maximal die Länge der Korngröße der Calcite und die Breite des Abstands zwischen den Calcitkörnern. In Tabelle 1 ist in einfacher Rechnung dargestellt, wie breit die Risse bei unterschiedlichen Korngrößen und pore aspect ratios sind.

Auf der anderen Seite kann die Rissporosität auch durch das Öffnen von Spaltflächen in den Calciten verursacht sein. In diesem Fall würde man wesentlich geringere Rissbreiten erwarten.

Tabelle 1: Rissbreiten in Abhängigkeit von pore aspect ratio PAS und Calcit Korngröße

<i>Korngröße</i>	<i>PAS = 0,1</i>	<i>PAS = 0,01</i>	<i>PAS = 0,005</i>	<i>PAS = 0,001</i>
<i>100 µm</i>	<i>10 µm</i>	<i>1,0 µm</i>	<i>0,5 µm</i>	<i>0,1 µm</i>
<i>500 µm</i>	<i>50 µm</i>	<i>5,0 µm</i>	<i>1,0 µm</i>	<i>0,5 µm</i>
<i>1000 µm</i>	<i>100 µm</i>	<i>10 µm</i>	<i>5,0 µm</i>	<i>1,0 µm</i>

Ein Blick auf Tabelle 1 zeigt, dass, bei Annahme von Korngrößen von 100 µm bis 1000 µm, das pore aspect ratio PAS = 0,1 von Spaltporen vermutlich nicht in Frage kommt, weil die zugeordneten Rissbreiten von 10 µm bis 100 µm eigentlich zu groß sind, obwohl sie im Marmor durchaus vorkommen, wie mit Hilfe von Quecksilber Hochdruck Porosimetrie (QHP) gefunden wurde. Das PAS = 0,1 könnte jedoch zur Interpretation der abseits vom normalen Trend liegenden Proben herangezogen werden. Allerdings müsste man im Auge behalten, dass dies nicht zu irregulär hohen Porositäten führt, die für ein Marmorgefüge unmöglich sind.

Sehr gut fügen sich die Rissbreiten mit PAS = 0,01 und PAS = 0,005 in das Modell ein. Die dort zugeordneten Rissbreiten von 0,5 µm bis 10 µm sind mit QHP als Porenradien in Marmor vielfach gemessen worden.

Thermische Längenänderungen können bei Temperaturwechseln von 50 K und entsprechender Korngröße zu Rissen zwischen den Kristallen bis zu einigen µm führen, was gut in die Reihe der PAR 0,01 und 0,005 passt.

Während die zuvor genannten PAS eher den Spaltporen zwischen den Kristallen zugerechnet werden können, dürften sich Mikrorisse mit PAS = 0,001 eher auf

geöffnete Spaltbarkeitsflächen im Calcit beziehen. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass sich die Rissbreiten in Dimensionen bewegen, bei denen nicht der komplette Zerfall des Kristalls eintritt. Beim stark thermisch beanspruchten Marmor geht der Zerfall allerdings so weit, dass auch die Calcitkristalle aufgespalten werden.

Vielleicht gelingt es in den nächsten Monaten durch die Messung der wassergesättigten Bohrkerne diese Betrachtungen zu ergänzen.

3.2. Standortklimamessungen

3.2.1. Untersuchungsziel

Die Marmorskulpturen sind konkreten, voneinander abweichenden klimatischen Einflüssen ausgesetzt, die sich im Tages- und Jahresverlauf verändern. Sollen Ultraschallmessungen unterschiedlicher Skulpturen, die zu unterschiedlichen Tages- und Jahreszeiten durchgeführt wurden, miteinander verglichen werden, müssen auch deren speziellen klimatischen Standortbedingungen miteinander verglichen werden.

Dies erfordert ein Klimaauswertungssystem, das entsprechende Korrekturen der speziellen Standortklimabedingungen ermöglicht und zu einer Normierung führt.

Das untersuchte System besteht aus 15 TRY-Datensätzen (durchschnittlicher Jahresverlauf des Wetters in einer Region), 81 Datensätzen von DWD-Messstationen (Wetterverlauf eines Jahres an einem Ort) und individuellen Standortmessungen (konkreter Wetterverlauf eines Jahres an einem Standort).

3.2.2. Datenbasis

3.2.2.1. TRY-Datensätze

Die sich verändernden Klimaverhältnisse, vor allem der Anstieg der Lufttemperaturen in den vergangenen 30 Jahren, ließen auf der Nutzerseite zunehmend die Forderung nach einer Aktualisierung der bestehenden Testreferenzjahre für Deutschland, die gemäß der international gebräuchlichen Nomenklatur als TRY = Test Reference Year abgekürzt werden, aufkommen.

Bei den Testreferenzjahren handelt es sich um Datensätze ausgewählter meteorologischer Parameter für jede Stunde eines Jahres für unterschiedliche Regionen in Deutschland. Die mittleren TRY repräsentieren den charakteristischen Witterungsverlauf eines kompletten Jahres. Sie werden aus realen Witterungsabschnitten derart zusammengesetzt, dass Mittel und Streuung vor allem der Lufttemperatur bestmöglich zu den langjährigen monatlichen und jahreszeitlichen Mittelwerten der jeweiligen Repräsentanzstation passen. Die langjährigen Vergleichswerte sowie die Witterungsabschnitte für die TRY-Datensätze werden aus den Mess- und Beobachtungsreihen von Stationen der DWD der Periode 1988 bis 2007 gewonnen. Mit Glättungs- und Interpolationsverfahren werden die einzelnen Witterungsabschnitte aneinander angeglichen.

Sowohl die mittleren als auch die extremen Testreferenzjahre beziehen sich auf die Mess- und Beobachtungsdaten von Repräsentanzstationen. Dazu wurde die Einteilung der Bundesrepublik Deutschland in 15 Klimaregionen aus den vorhergehenden im Jahr 2004 erschienenen TRY übernommen. Für jede dieser Klimaregionen existiert eine Station, die das typische Klima dieser Region repräsentiert. Die Einteilung Deutschlands in Klimaregionen sowie die Ermittlung

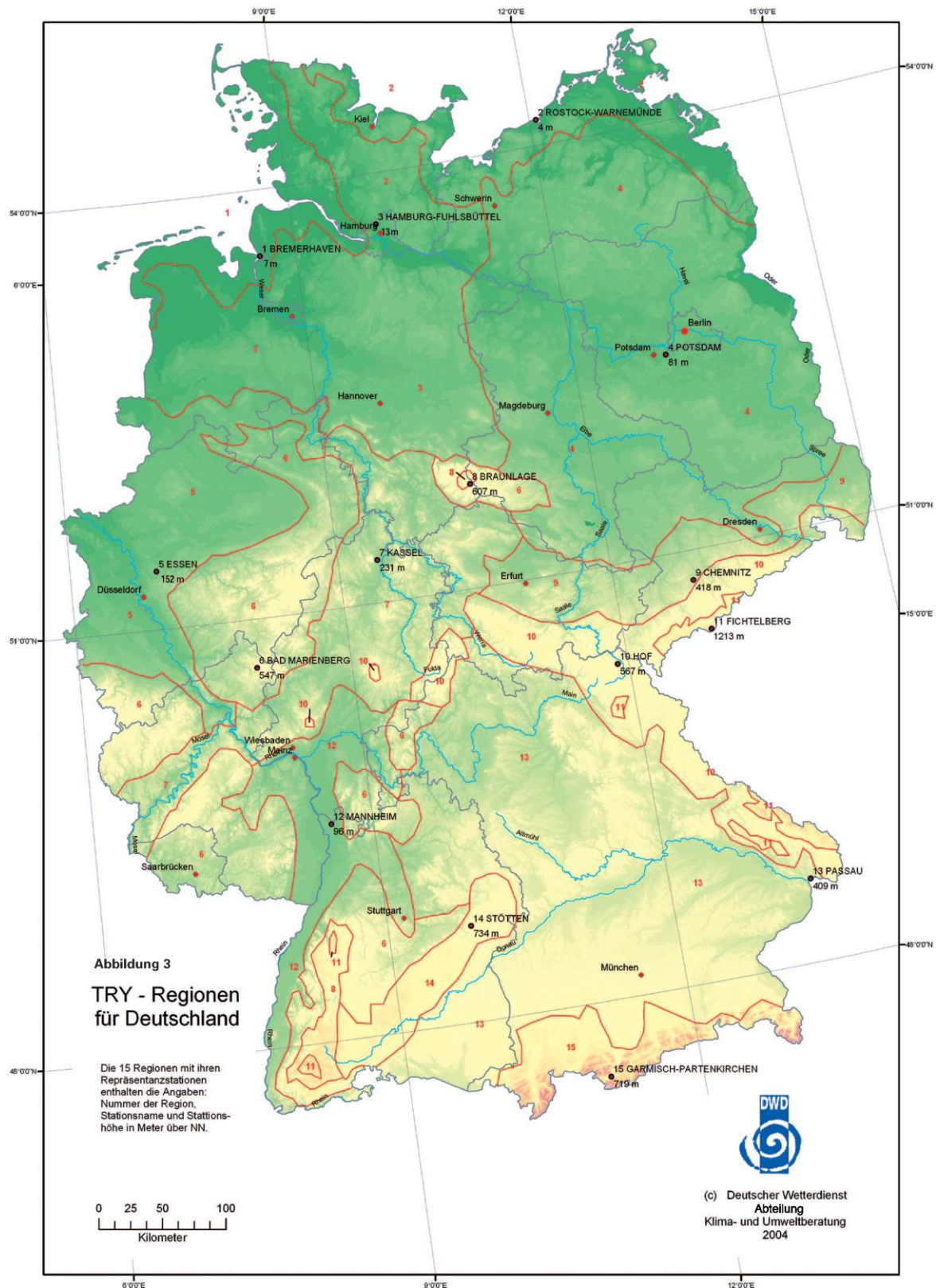
der Repräsentanzstationen wurde mittels statistischer Methoden wie Faktoren- und Clusteranalyse durchgeführt, die in CHRISTOFFER et al.(2004) näher beschrieben werden. Insgesamt ergeben sich damit 15 mittlere, 15 extrem warme und 15 extrem kalte Testreferenzjahre.

Die zyklischen TRY-Datensätze für ein komplettes Jahr haben den Zweck, klimatologische Randbedingungen zur Simulation von heiz- und raumluftechnischen Anlagen und des thermischen Verhaltens von Gebäuden zu liefern. Sie haben sich in den vergangenen 20 Jahren als Grundlage für entsprechende Simulationsrechnungen bewährt. Bei Anwendung der TRY-Daten für andere Zwecke als den eben beschriebenen ist daher zunächst die Verwendbarkeit der Testreferenzjahre für das jeweilige Problem zu überprüfen.

Durch Differenzbildung zwischen den TRY-Datensätzen und den DWD-Datensätzen wird ein Korrekturdatsatz berechnet, mit dessen Hilfe die Objektdatensätze korrigiert werden können. Somit erhält man Objektdatensätze, die darüber Auskunft geben, wie sich das Klima an konkreten Standorten in einem TRY-Jahr verhalten hätte. Korrigiert man auf diese Weise alle Standortmessungen, so sind diese dann direkt miteinander vergleichbar.

Deutschland ist in folgende Klimaregionen eingeteilt:

	Klimaregion	Repräsentanzstation
01	Nordseeküste	Bremerhaven
02	Ostseeküste	Rostock-Warnemünde
03	Nordwestdeutsches Tiefland	Hamburg-Fuhlsbüttel
04	Nordostdeutsches Tiefland	Potsdam
05	Niederrheinisch-westfälische Bucht und Emsland	Essen
06	Nördliche und westliche Mittelgebirge, Randgebiete	Bad Marienberg
07	Nördliche und westliche Mittelgebirge, zentrale Bereiche	Kassel
08	Oberharz und Schwarzwald (mittlere Lagen)	Braunlage
09	Thüringer Becken und Sächsisches Hügelland	Chemnitz
10	Südöstliche Mittelgebirge bis 1000 m	Hof
11	Erzgebirge, Böhmer- und Schwarzwald oberhalb 1000m	Fichtelberg
12	Oberrheingraben und unteres Neckartal	Mannheim
13	Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland	Mühldorf/Inn
14	Schwäbische Alb und Baar	Stötten
15	Alpenrand und -täler	Garmisch-Partenkirchen



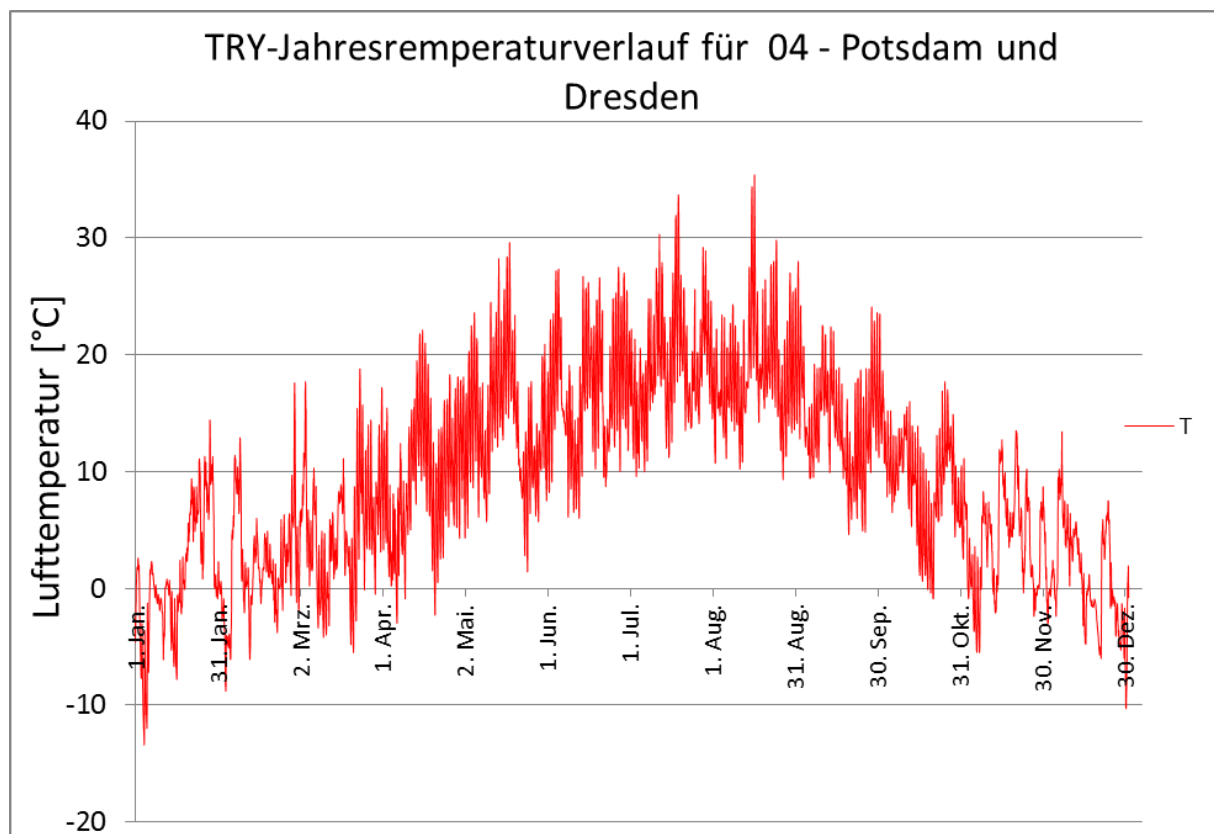
Die TRY-Datensätze sind unter folgender Internetadresse zu finden und können dort kostenfrei heruntergeladen werden:

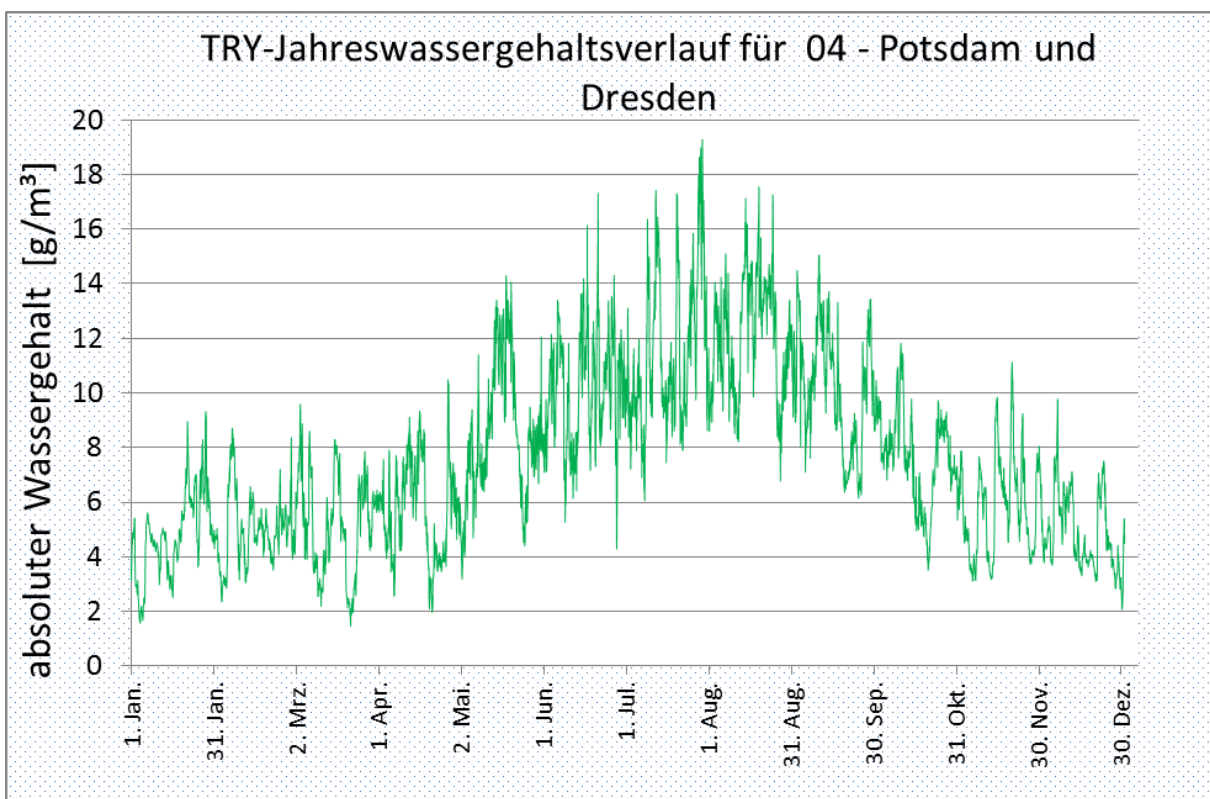
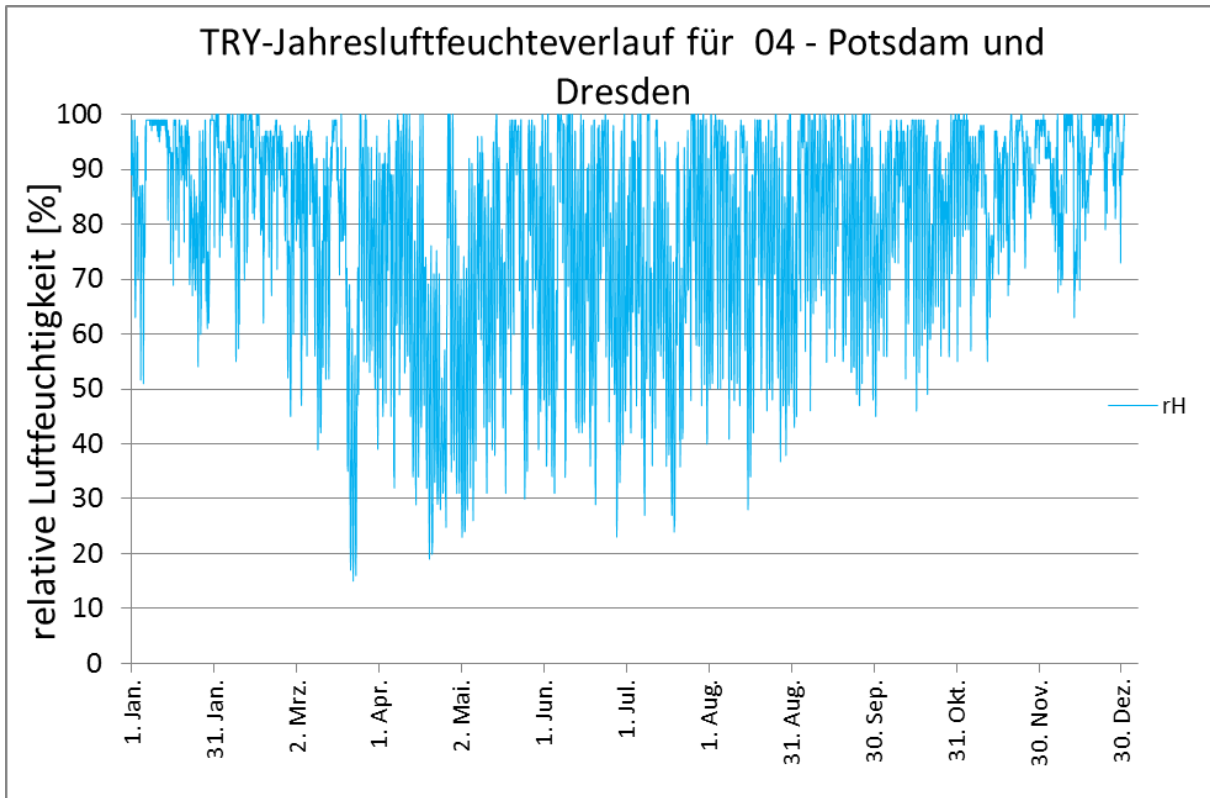
www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/Testreferenzjahre/01_start.html?nn=739044¬First=true&docId=743442#doc743442bodyText5

Potsdam und Dresden befinden sich in der Klimaregion 04 – Nordostdeutsches Tiefland mit der Repräsentanzstation Potsdam und München in der Klimaregion 13 - Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland mit der Repräsentanzstation Mühldorf/Inn.

Da die Klimaregionen in sich unterschiedliche Höhensituationen aufweisen und urbane Regionen anders zu bewerten sind als ländliche Standorte, gibt es die Möglichkeit, entsprechende Korrekturen vorzunehmen.

Im Folgenden sind die stündlichen TRY-Datensätze für die Klimaregion 04 dargestellt.





Für die Projektarbeit wurden sowohl stündliche als auch tägliche TRY-Datensätze verwendet.

Es ist zu beachten, dass die TRY-Datensätze keinen 29.02. enthalten.

Vergleich unterschiedlicher stündlicher TRY-Datensätze:

	04 Dresden und Potsdam			09 Jena			13 München		
	T [°C]	rH [%]	aH [g/m ³]	T [°C]	rH [%]	aH [g/m ³]	T [°C]	rH [%]	aH [g/m ³]
Anzahl	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760
Minimum	-13,4	15,0	1,5	10,6	19,0	1,6	20,5	14,0	0,8
Maximum	35,4	100,0	19,3	35,0	100,0	17,7	33,9	100,0	17,7
Mittelwert	9,5	79,7	7,6	10,0	74,3	7,2	8,6	81,7	7,4
Median	9,4	85,0	7,2	9,5	78,0	6,6	8,5	87,0	6,9

3.2.2.2. DWD-Potsdam

Zur Verbindung der Standortmessungen mit den TRY-Datensätzen sind lokale Klimadatensätze von den Jahren notwendig, in denen die Standortklimamessungen erfolgten.

Beim Deutschen Wetterdienst sind seit 2014 unter folgender Internetadresse stündliche Werte für ein Jahr rückwirkend kostenfrei herunterladbar:

www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimadaten%2Fkldaten__kostenfrei%2Fkldat__D__stationen__home__node.html%3F__nnn%3Dtrue

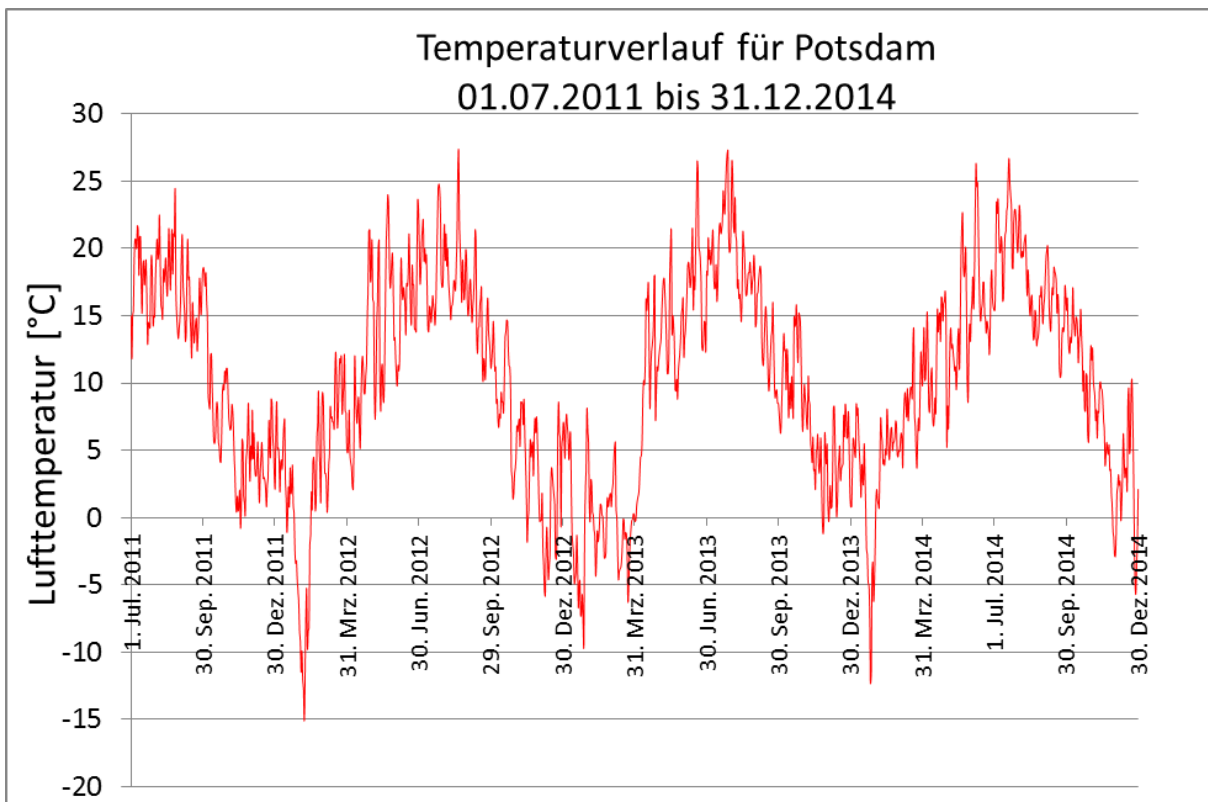
Neben den stündlichen Messwerten stehen hier auch tägliche Mittelwerte von insgesamt 81 Messstationen in Deutschland zur Verfügung.

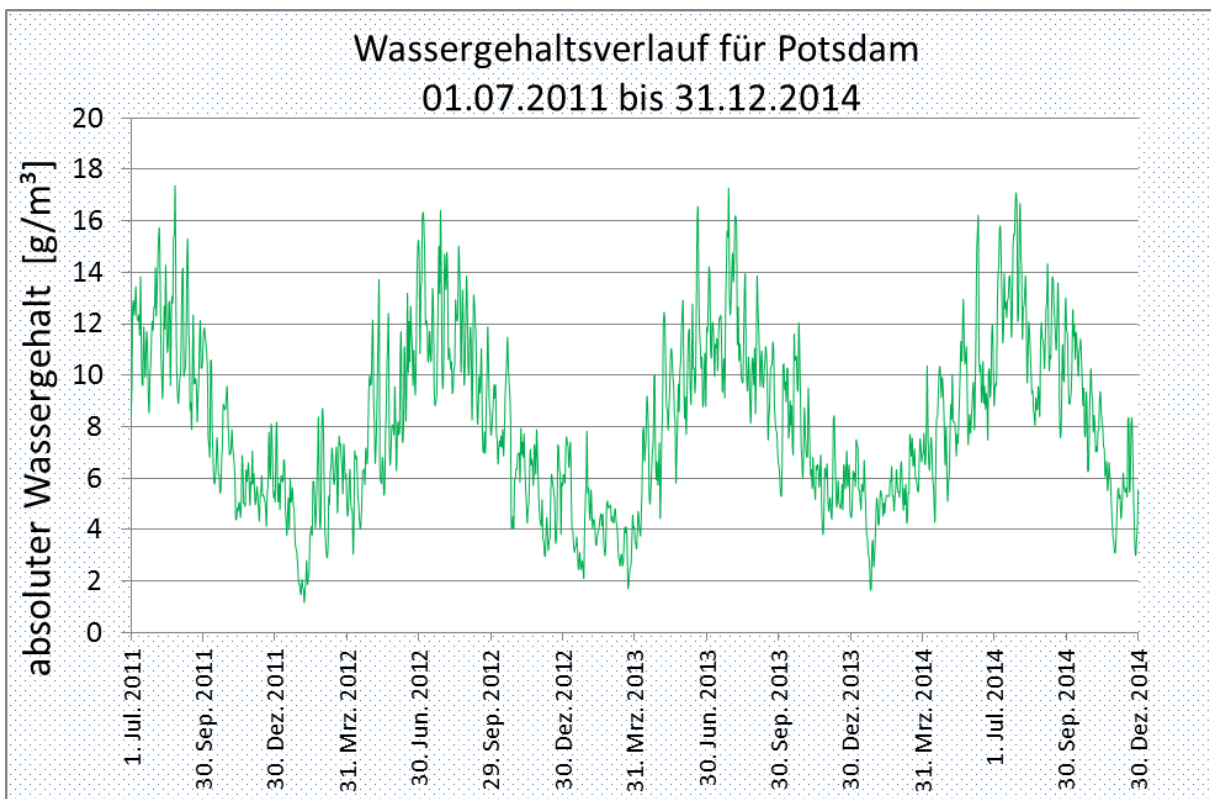
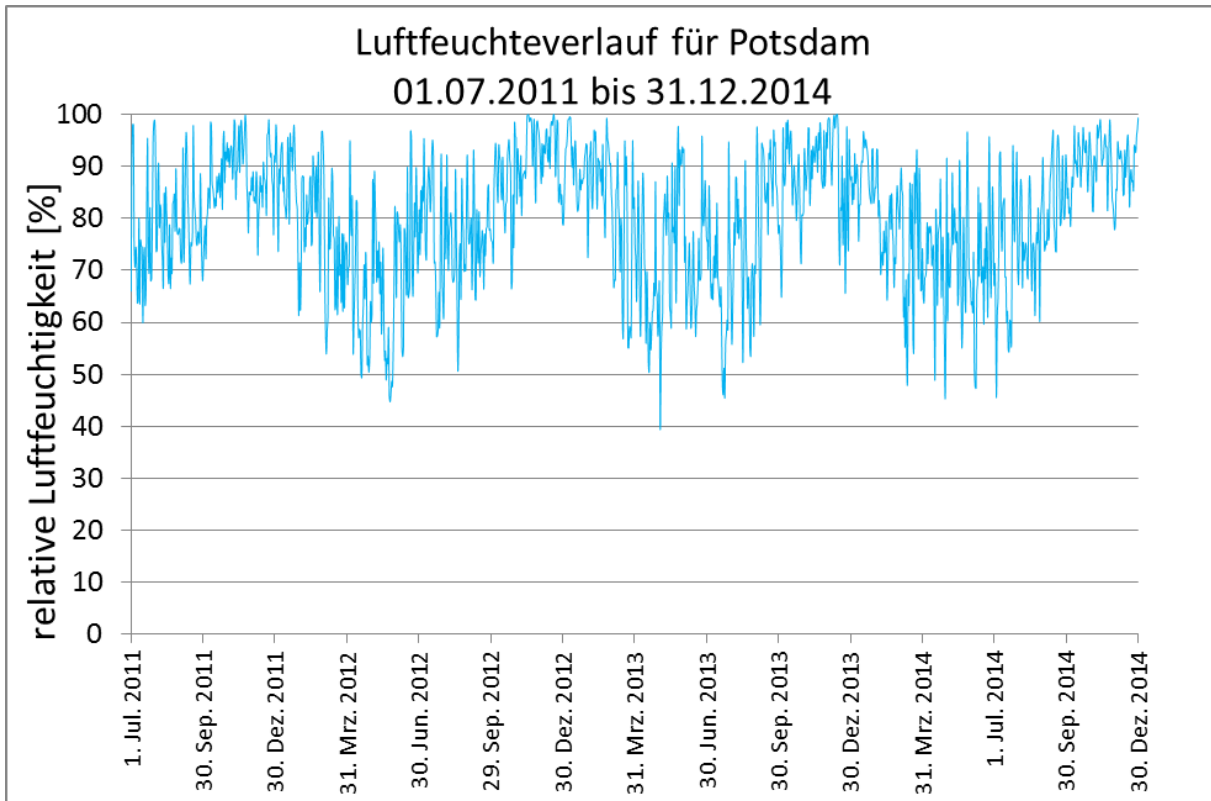
Aachen	Görlitz	München/Flughafen
Aachen-Orsbach	Greifswald	Münster/Osnabrück
Angermünde	Großer Arber	Neuruppin
Arkona	Hahn	Norderney
Augsburg	Hamburg-Fuhlsbüttel	Nürnberg-Barweiler
Bamberg	Hannover	Nürnberg
Berlin-Dahlem (LFAG)	Helgoland	Oberstdorf
Berlin-Dahlem (FU)	Hof	Offenbach-Wetterpark
Berlin-Tegel	Hohenpeißenberg	Öhringen
Berlin-Tempelhof	Kahler Asten	Potsdam
Bremen	Karlsruhe	Regensburg
Brocken	Kassel	Rheinstetten
Cottbus	Kempten	Rostock-Warnemünde
Cuxhaven	Kiel-Holtenau	Saarbrücken/Ensheim
Dresden-Klotzsche	Köln-Bonn	Schleswig
Düsseldorf	Konstanz	Schwerin
Emden-Flugplatz	Lahr	Stötten
Erfurt-Weimar	Leipzig/Halle	Straubing
Fehmarn	Leuchtturm Alte Weser	Stuttgart/Echterdingen
Feldberg/Schwarzwald	Leuchtturm Kiel	Trier-Petrisberg

Fichtelberg	Lindenberg	UFS Deutsche Bucht
Frankfurt/M-Flughafen	Lippspringe, Bad	UFS TW Ems
Freudenstadt	List auf Sylt	Wasserkuppe
Fritzlar	Magdeburg	Weiden
Fürstzell	Mannheim	Wendelstein
Gera-Leumnitz	Marnitz	Würzburg
Gießen/Wettenberg	Meiningen	Zugspitze

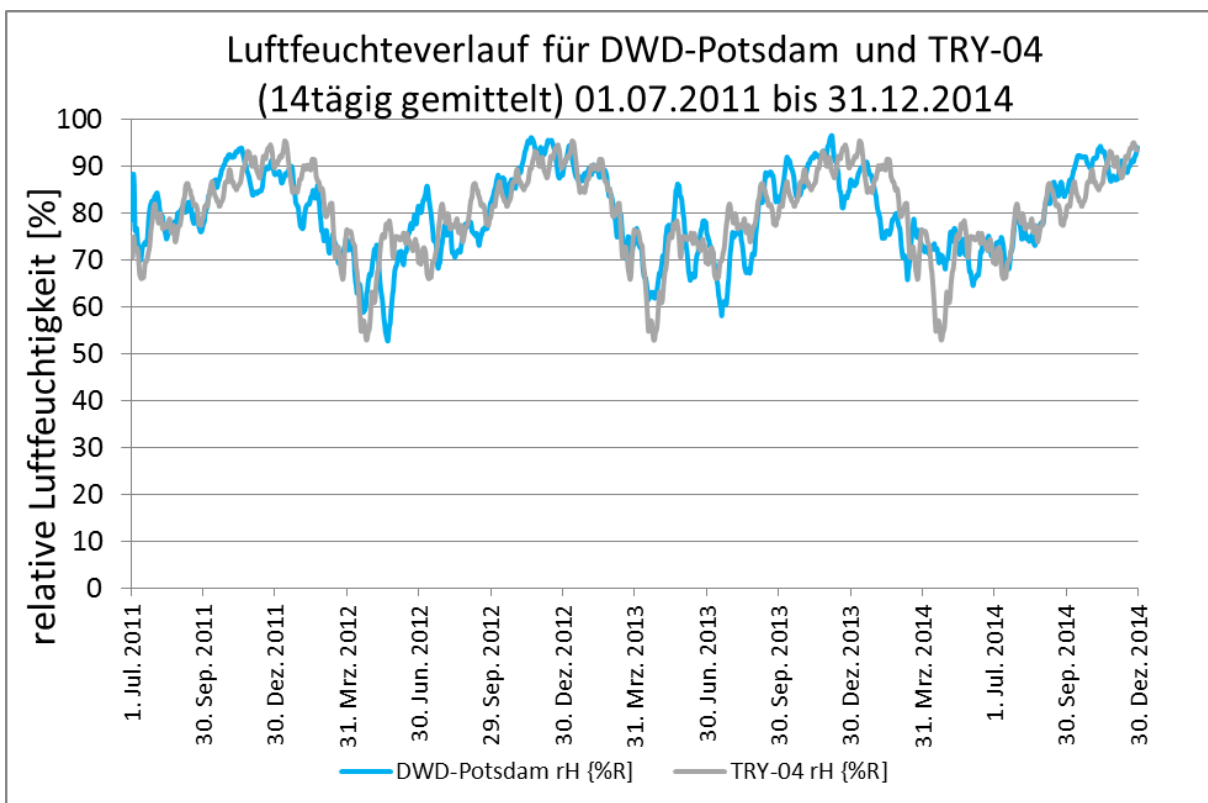
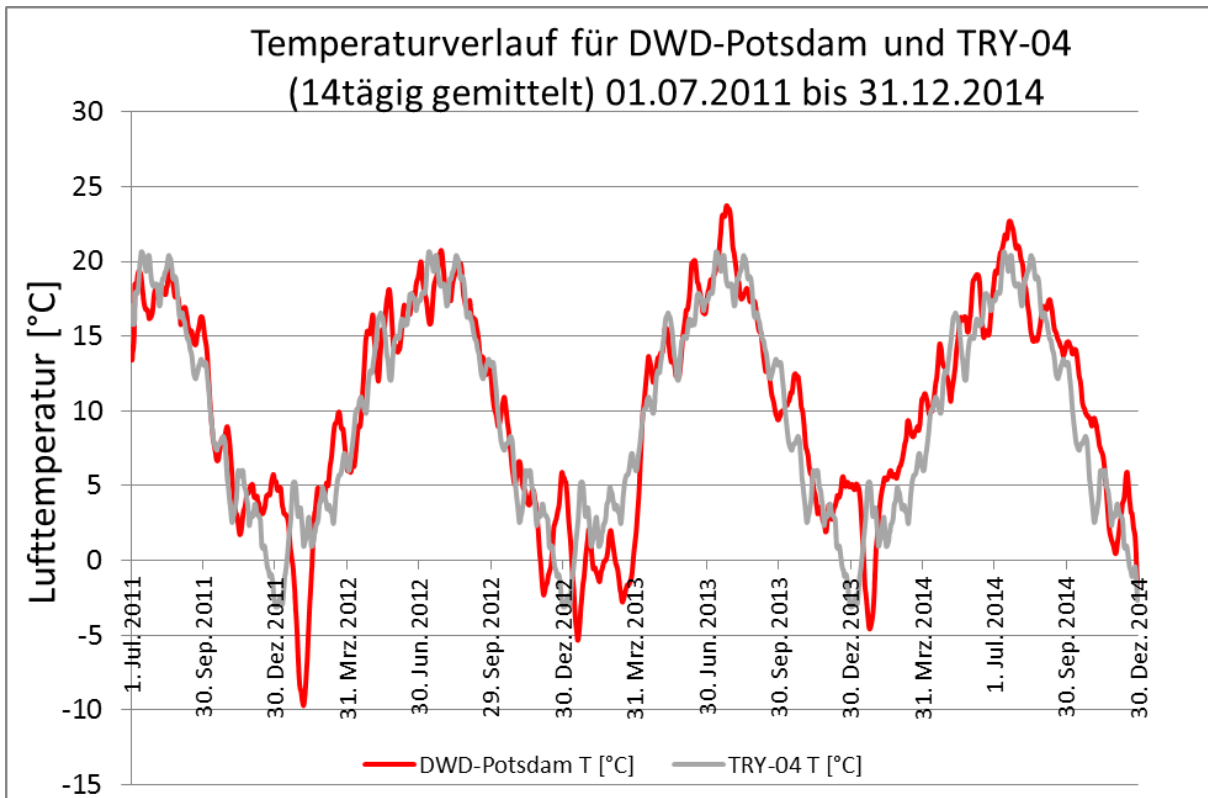
Man kann hier auf die Messstation zurückgreifen, die dem Objektstandort am nächsten liegt. In unserem Falle waren das die Messungen in Potsdam von 2011 bis 2014.

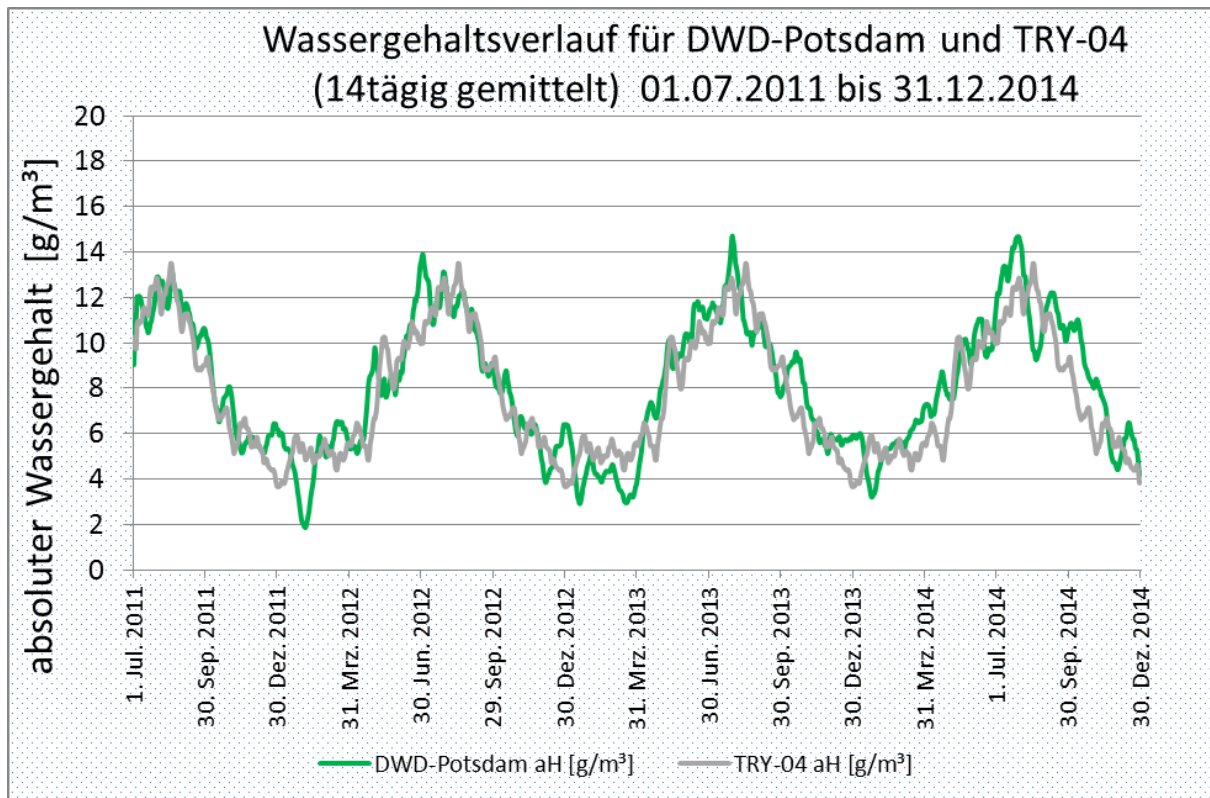
Im Folgenden sind die täglichen Datensätze der Messstation Potsdam dargestellt.



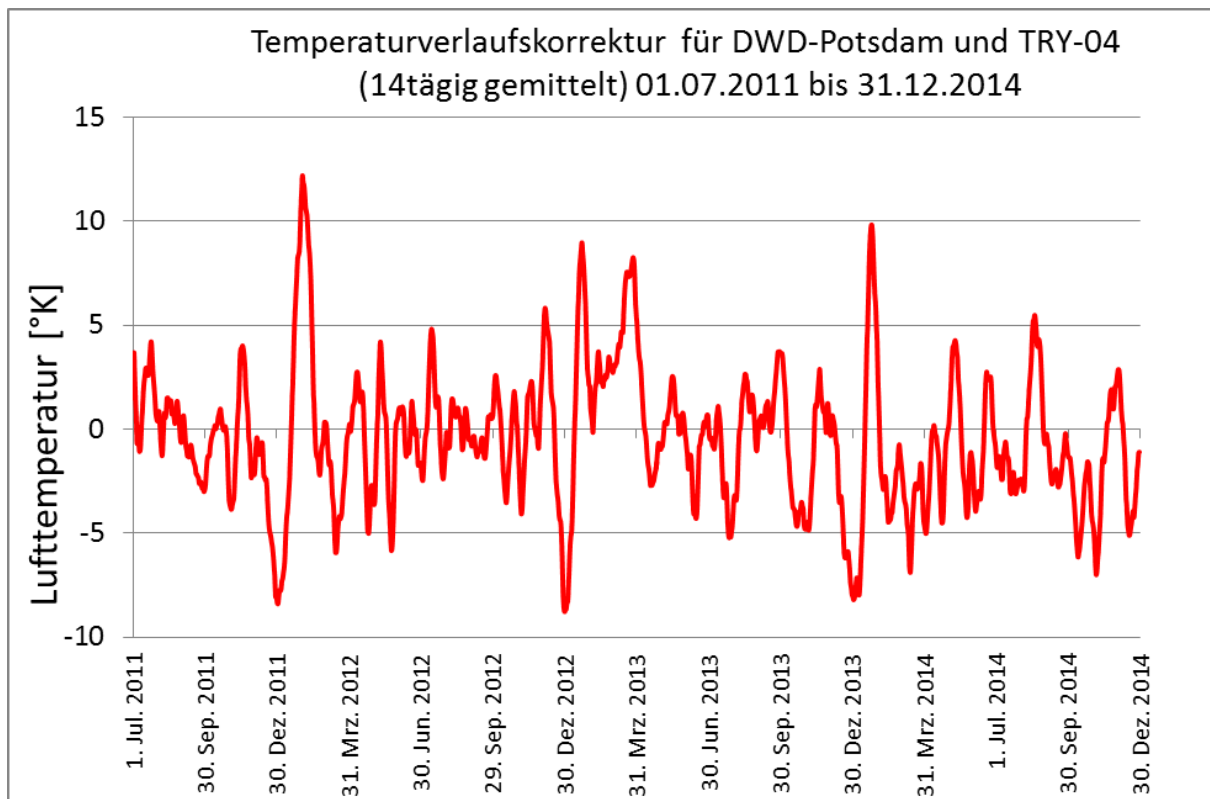


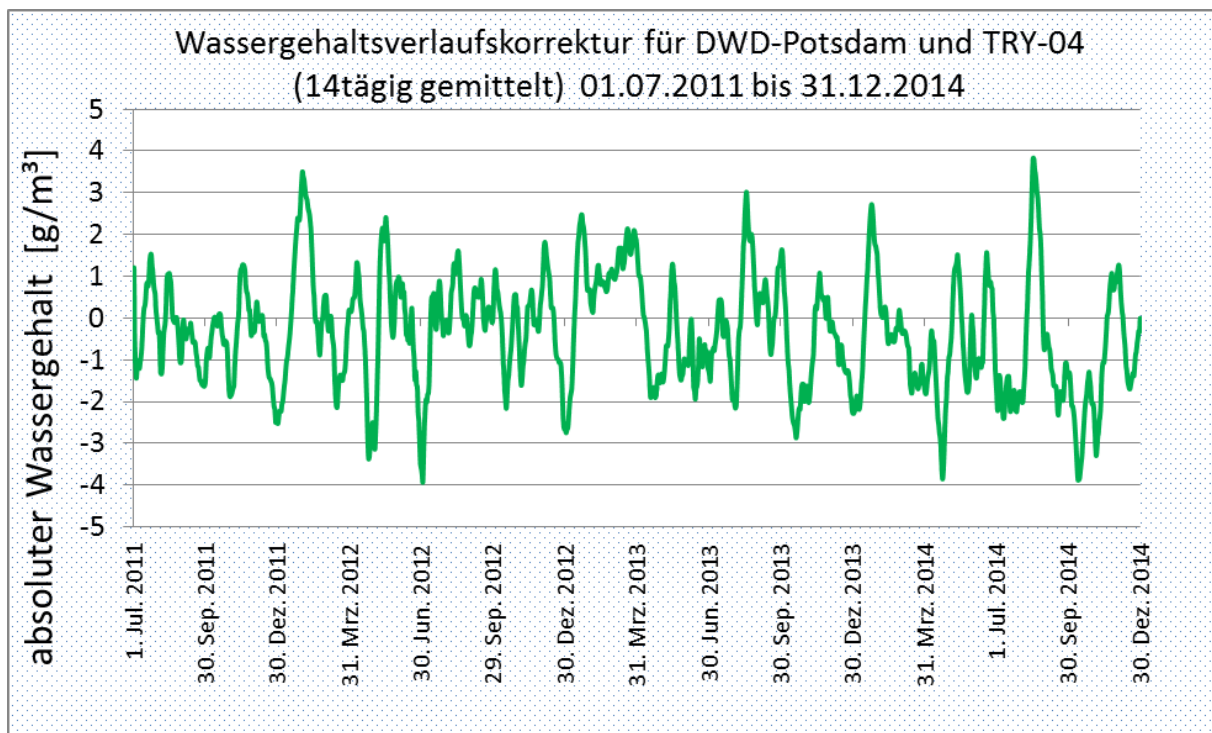
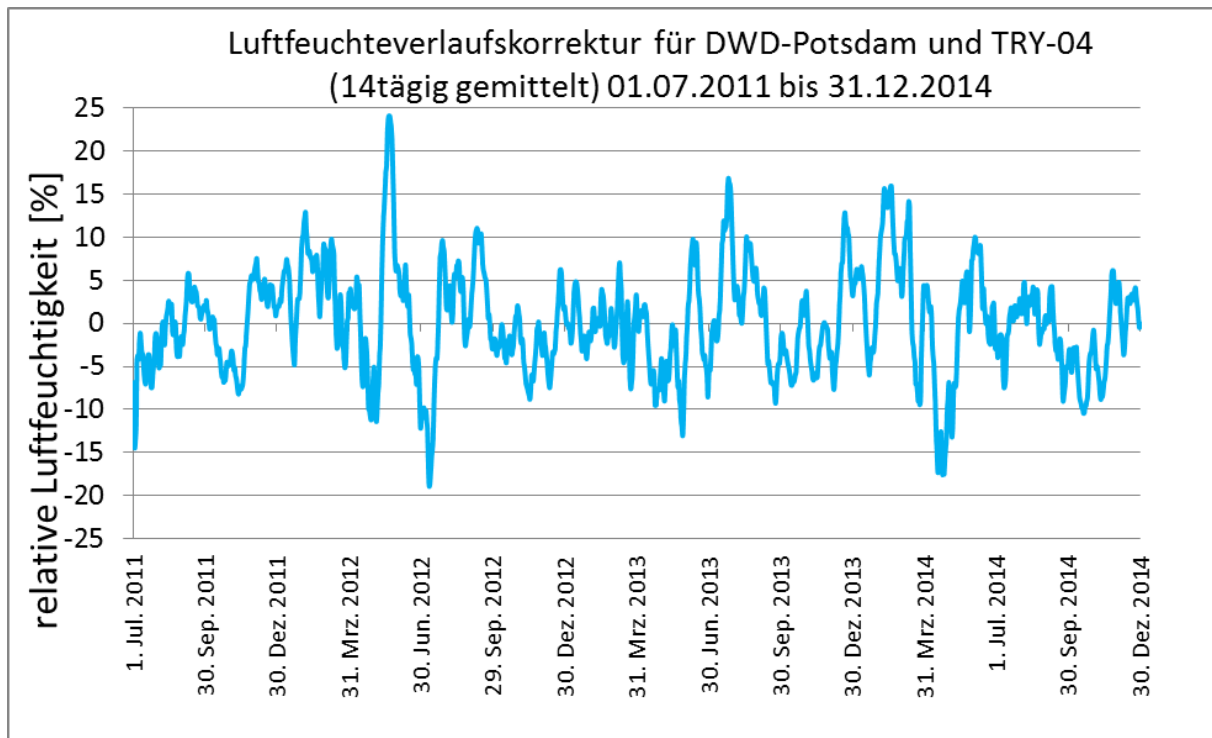
Vergleicht man für 2012 den allgemeinen TRY-Datensatz der Region 04 mit dem speziellen DWD-Datensatz für Potsdam, so sind die Unterschiede erkennbar.





Die Differenz zwischen beiden Datensätzen ergibt folgenden Korrekturdatensatz für die Werte in Potsdam für 2012:





Diese Korrekturdatensätze können dann auf die Standortmessungen in Potsdam angewendet werden, um sie mit den allgemeinen TRY-Datensätzen für die Region 04 vergleichen zu können.

3.2.2.3. Datenlogger

Für die Standortmessungen kamen USB-Datenlogger zum Einsatz, die halbstündliche Temperatur- und Feuchtwerte (relative Luftfeuchtigkeit) abspeichern konnten.



USB-Datenlogger

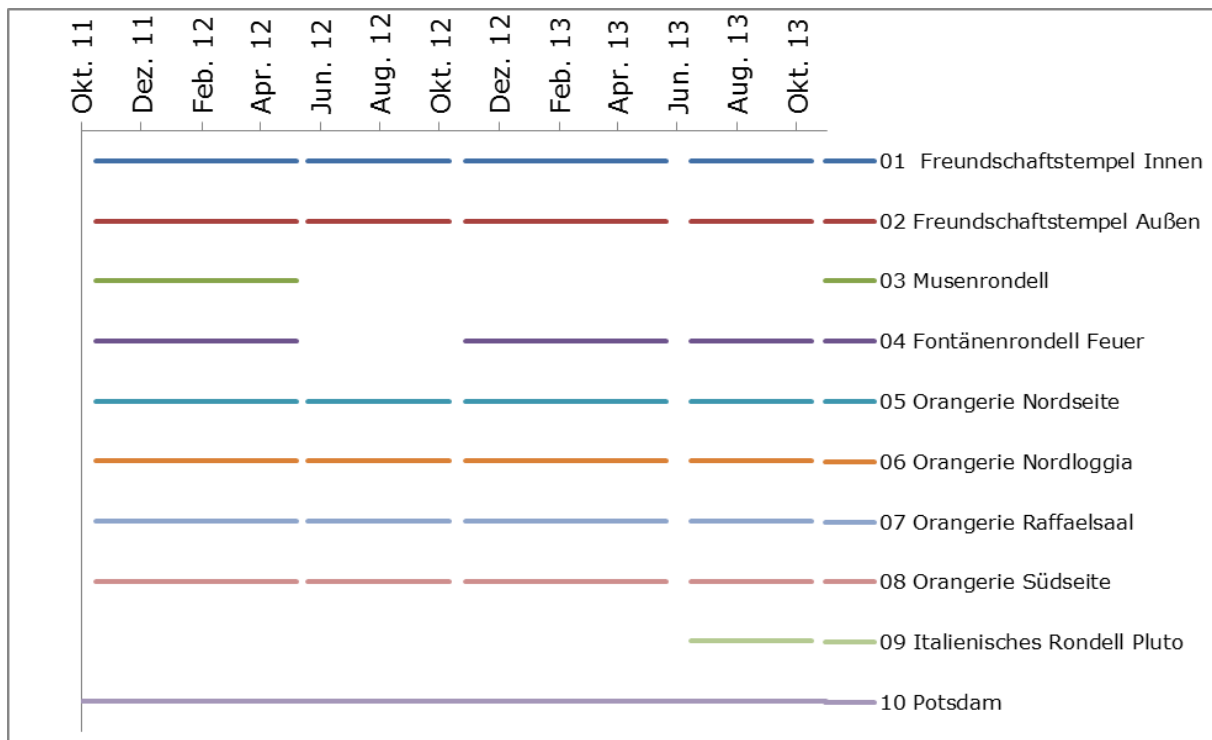
Die Datenlogger wurden an folgenden Standorten positioniert:

Nummer	Ort	Figur/Objekt
01	Freundschaftstempel	Kapitell-innen
02	Freundschaftstempel	Kapitell-außen
03	westlicher Lustgarten	Musenrondell Polyhymnia
04	Große Fontäne	Feuer
05	Orangerie-Nordseite	Fassade
06	Orangerie-Nordloggia	Paris
07	Orangerie-Raffaelsaal	hinter Gemälde
08	Orangerie-Südseite	Der April (Schaf)
09	Italienisches Rondell	Pluto



Position des Messstandes und der Datenlogger

Die Messungen erfolgten jeweils während zweier Winter- und Sommerperioden.



Messperioden der Datenlogger

Die Datenlogger speicherten alle 30 Sekunden einen Temperatur- und einen relativen Luftfeuchtigkeitswert auf. Diese Daten wurden zu stündlichen und täglichen Datensätzen umgearbeitet, um sie mit den TRY-Datensätzen, den DWD-Potsdamdatensätzen und den Messungen am Probestein vergleichen zu können.

Da die Messungen für den Loggerwechsel unterbrochen werden mussten, wurden vier identische Zeitintervalle ausgewertet, die typische Sommer- und Winterhalbjahrperioden umfassten.

Folgende Messintervalle wurden ausgewertet:

15.10.2011 – 08.05.2012

19.05.2012 – 13.10.2012

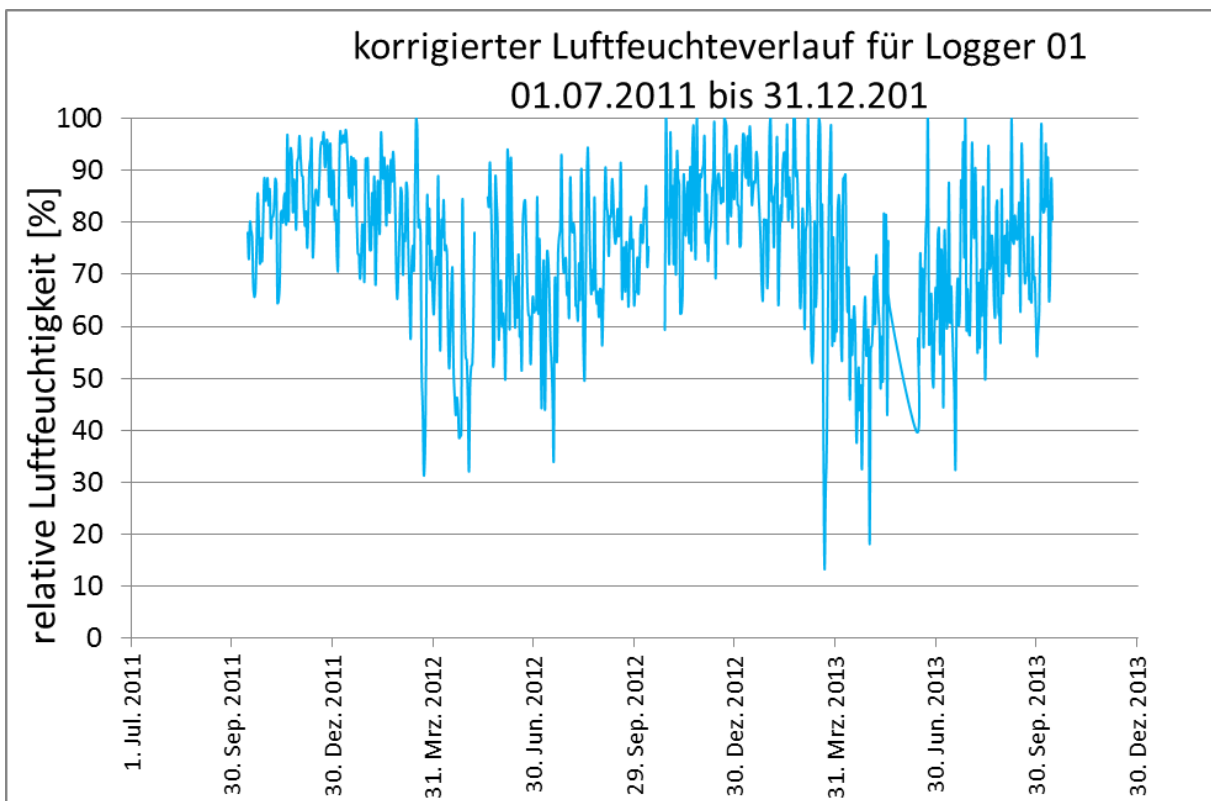
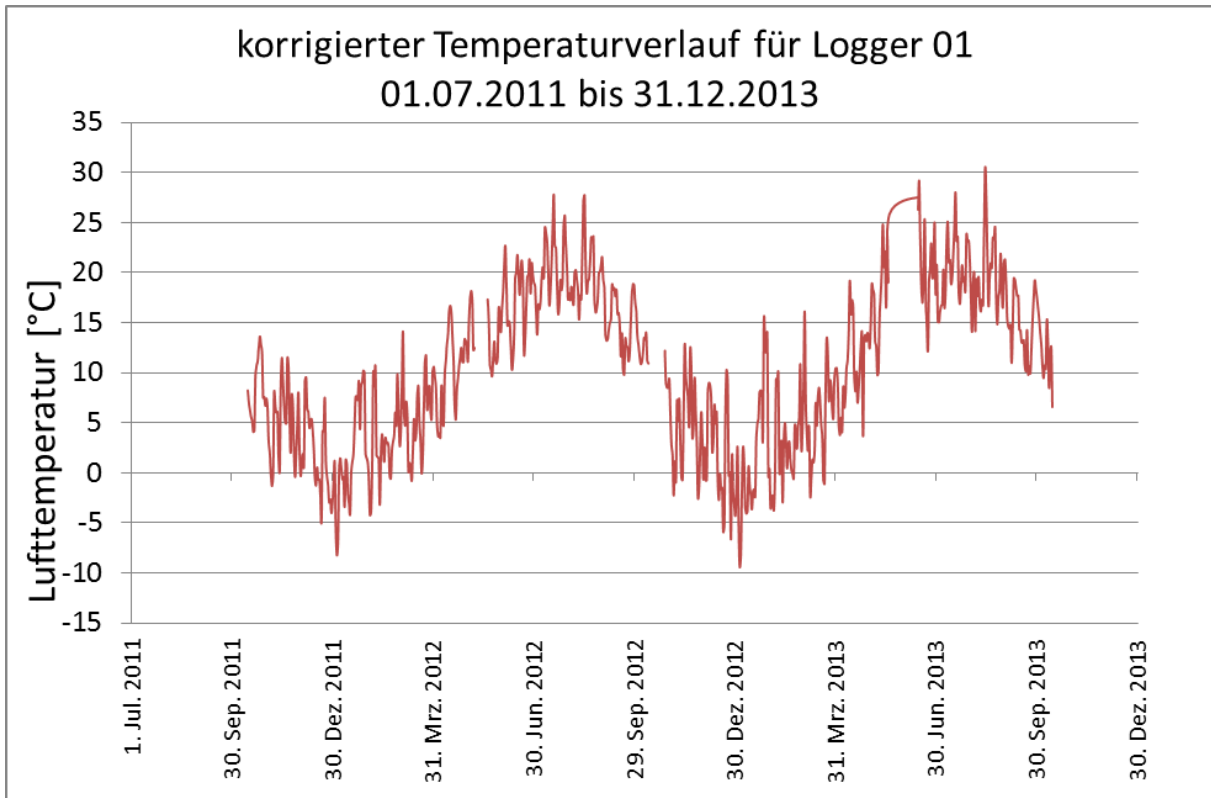
27.10.2012 – 20.05.2013

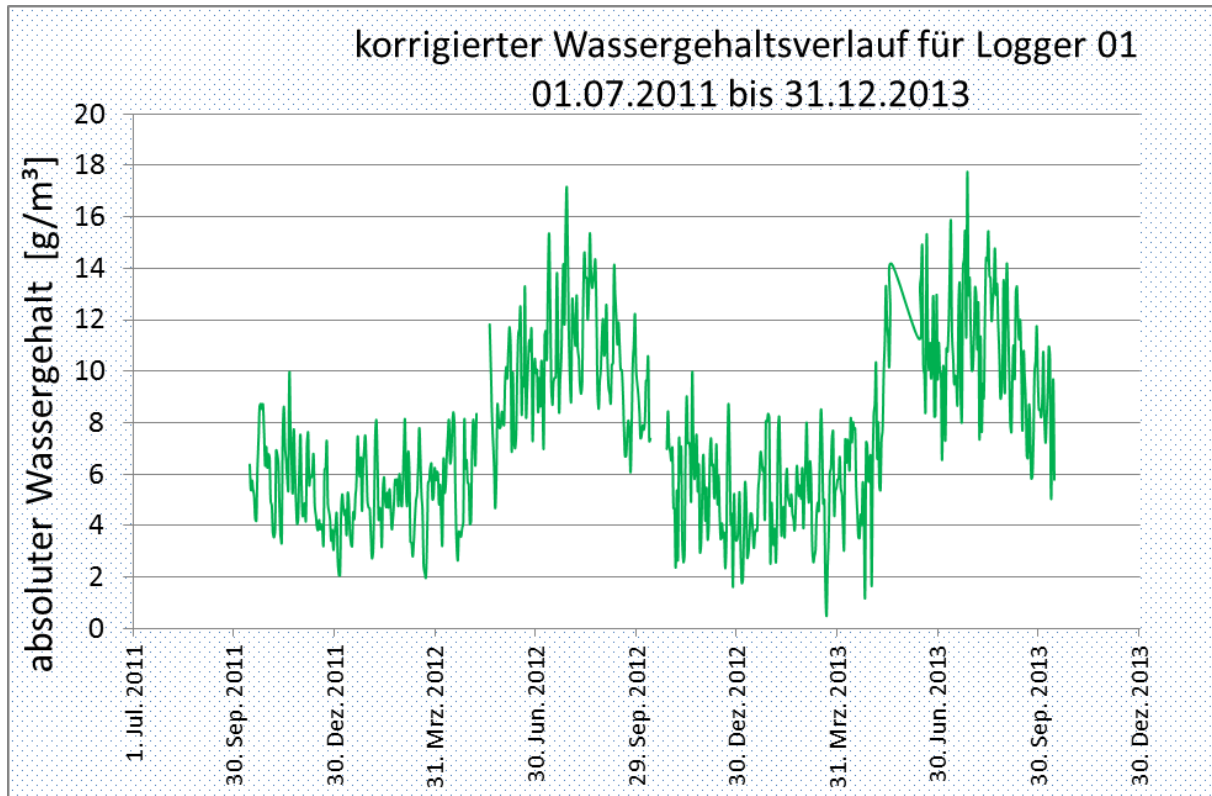
14.06.2013 – 16.10.2013

Standort 01:

Freundschaftstempel Kapitell Innen







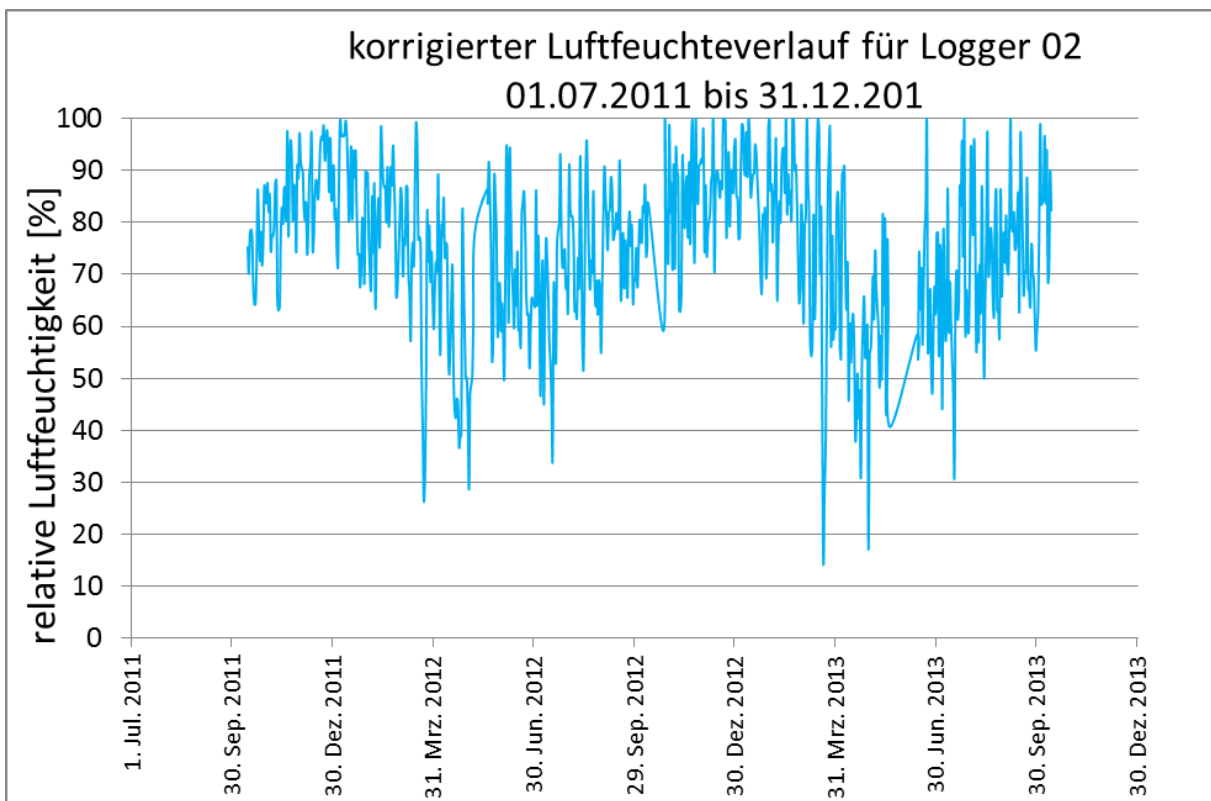
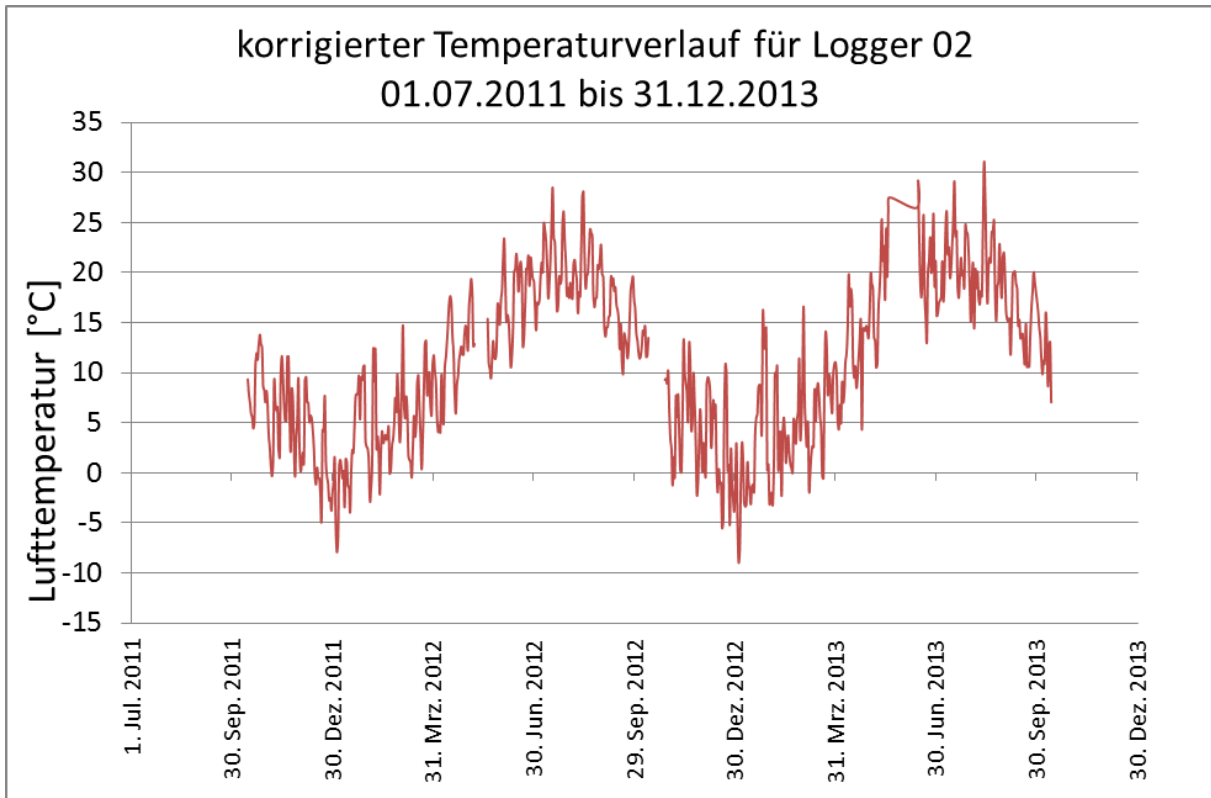
Logger 01 tgl	T [°C]	rH [%]	aH [g/m ³]
Anzahl	682	682	682
Minimum	-9,4	13,5	0,5
Maximum	30,5	100,0	17,7
Mittelwert	10,3	75,0	7,5
Median	10,4	77,2	6,9

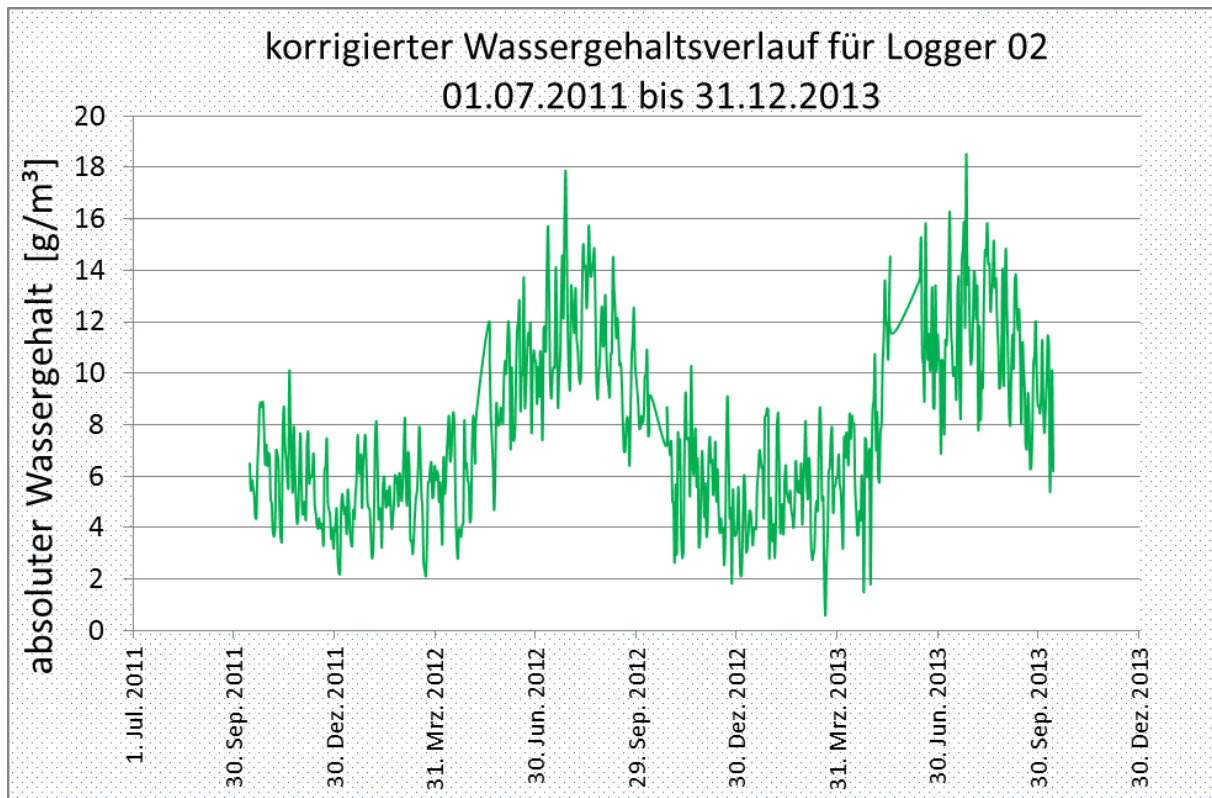
Die Logger 01 und 02 wurden an einem Kapitell positioniert, das in den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts ausgetauscht und durch eine Kopie ersetzt wurde, da es starke Strukturstörungen aufwies.

Standort 02:

Freundschaftstempel Kapitell Außen



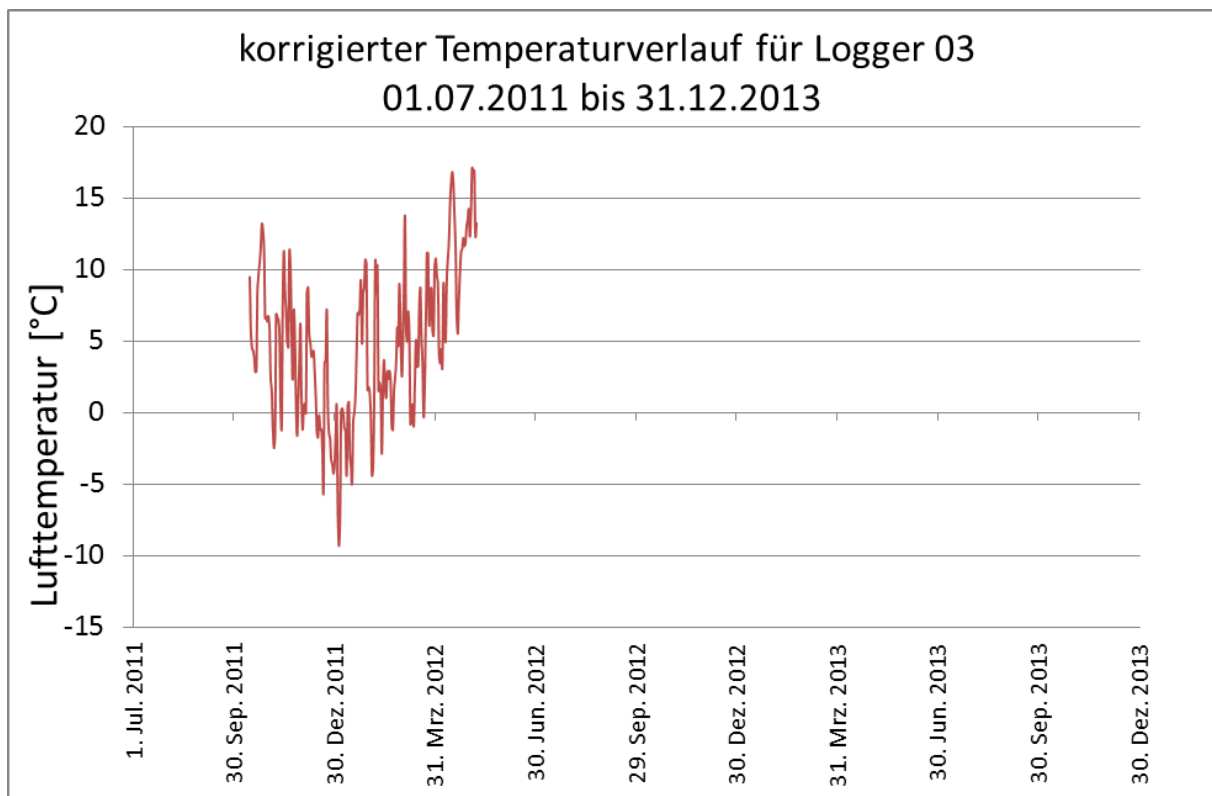


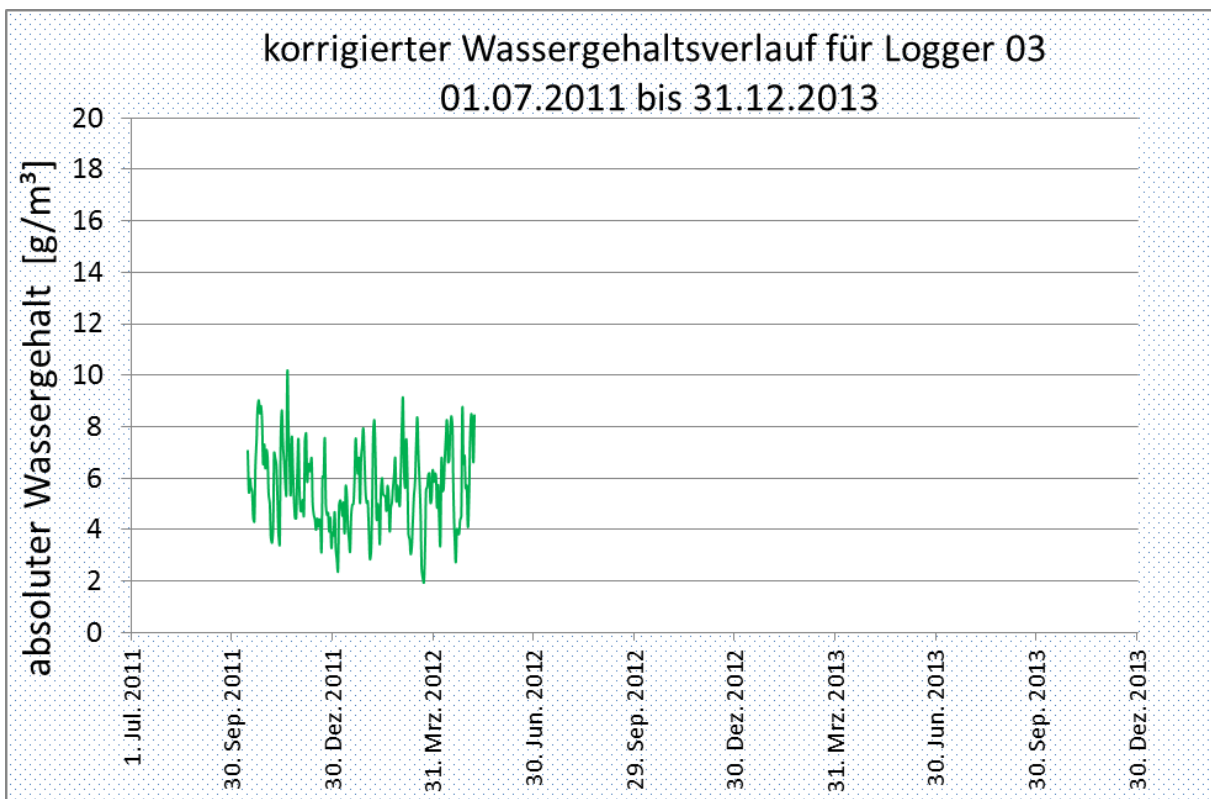
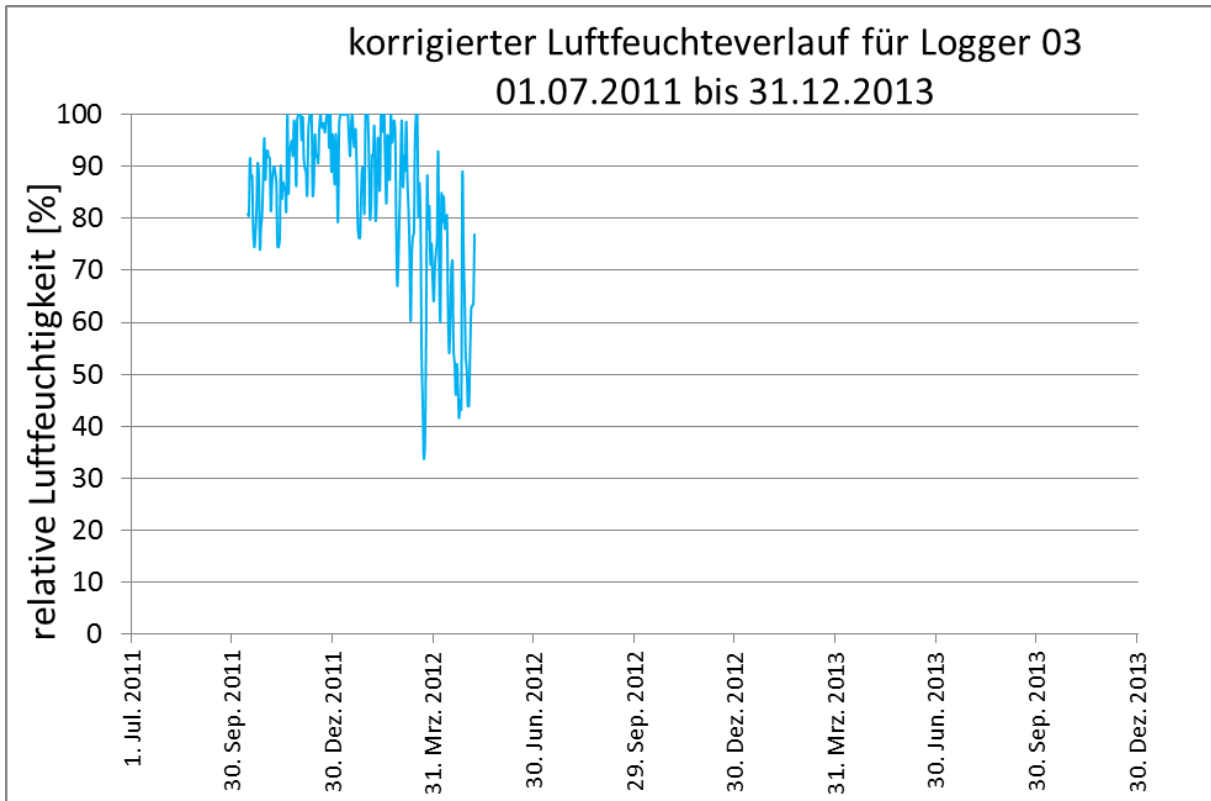


Logger 02 tgl	T [°C]	rH [%]	aH [g/m³]
Anzahl	683	683	683
Minimum	-9,0	14,4	0,6
Maximum	31,0	100,0	18,5
Mittelwert	10,9	75,2	7,7
Median	10,9	77,2	7,2

Standort 03:

Musenrondell im Westlichen Lustgarten „Polyhymnia“
im Winter eingehaust





Logger 03 tgl	T [°C]	rH [%]	aH [g/m ³]
Anzahl	206	206	206
Minimum	-9,3	33,8	2,0
Maximum	17,1	100,0	10,1
Mittelwert	4,7	84,0	5,6
Median	4,5	87,8	5,5

Dieser Logger wurde in der zweiten Messperiode zerstört und später durch den Logger 09 ersetzt.

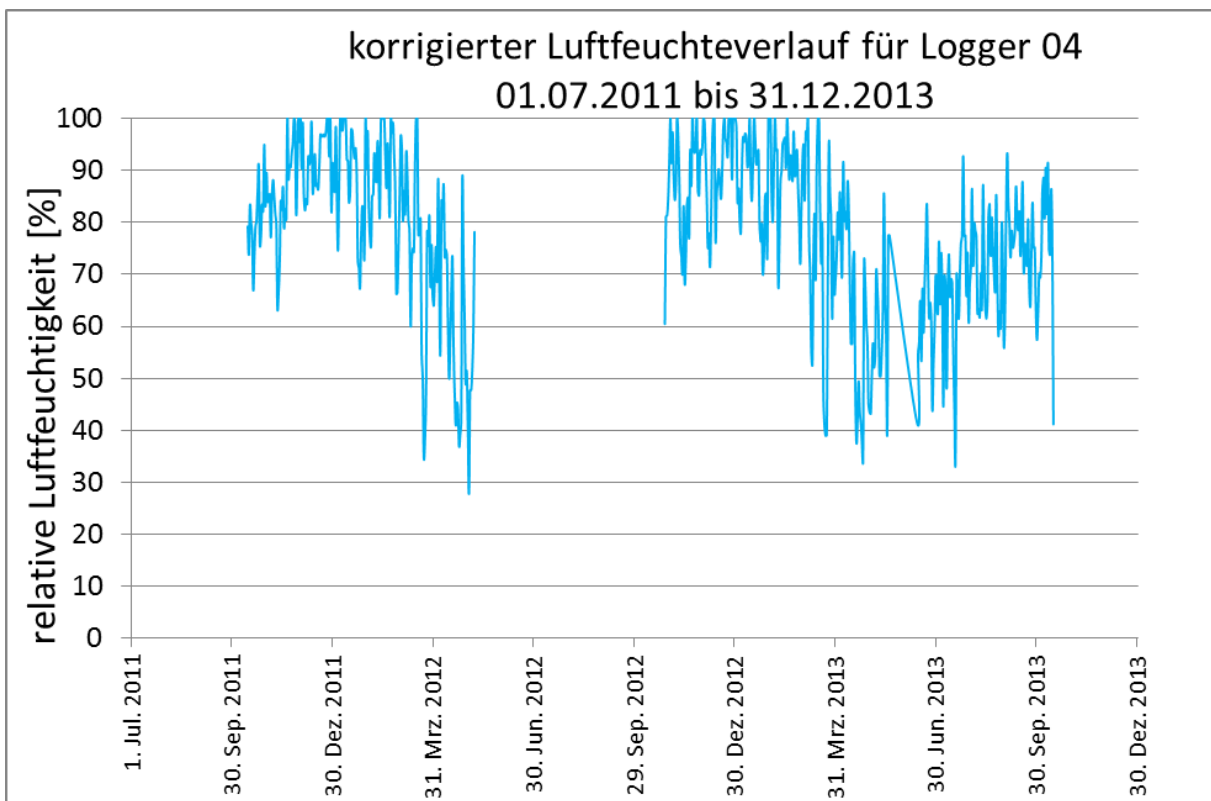
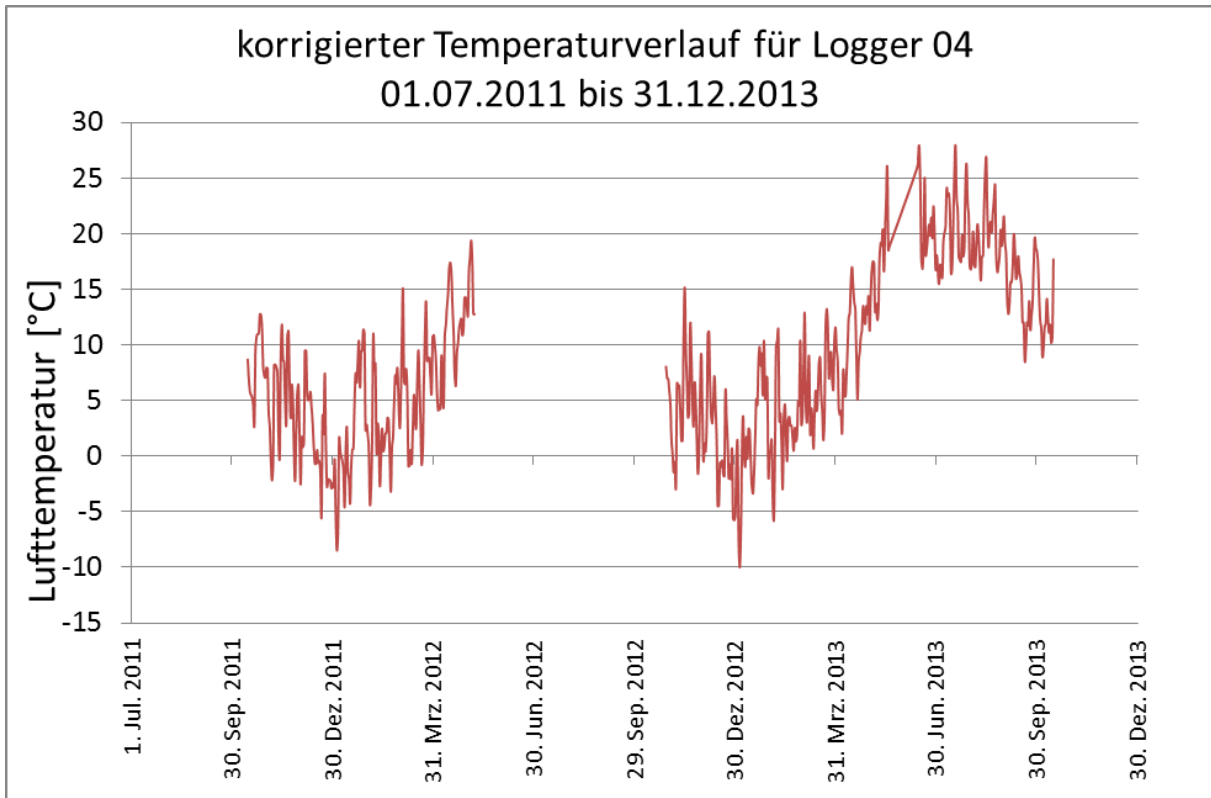
Interessant war hierbei, den Klimaeffekt von Einhausungen zu registrieren.

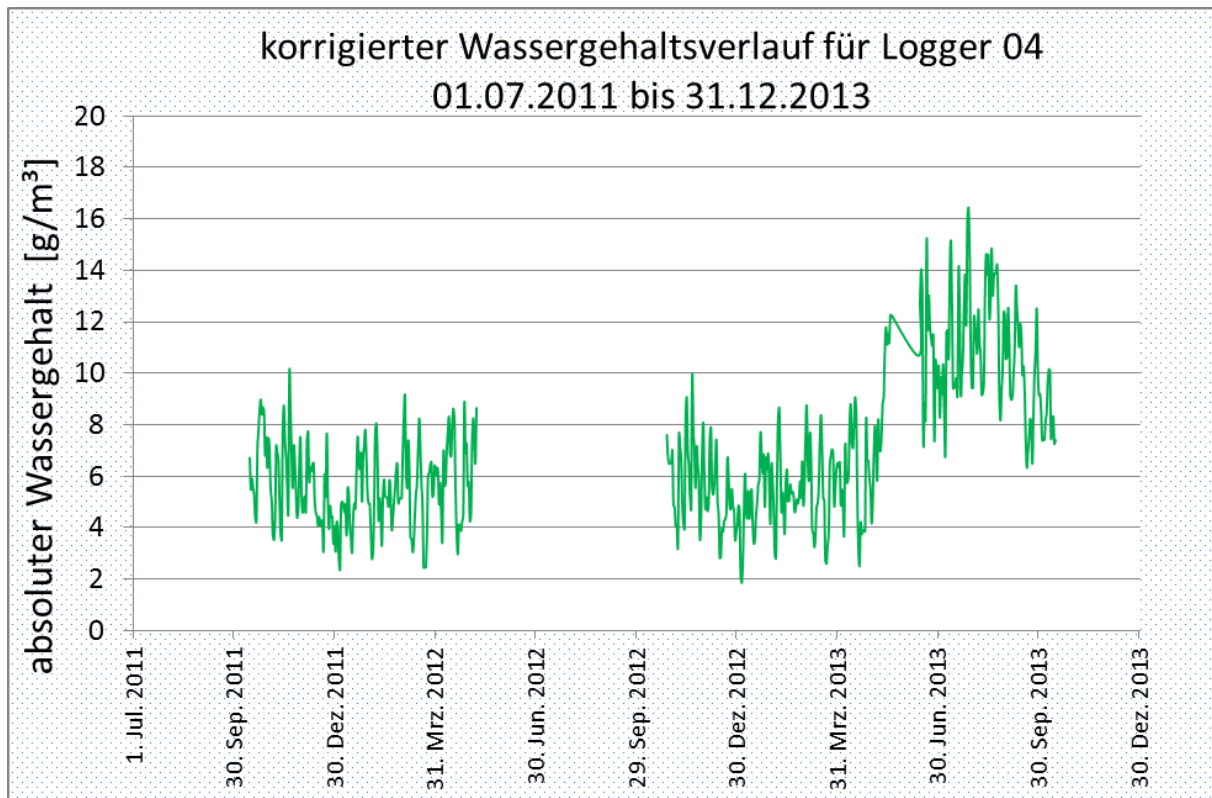
Die Figur befindet sich in unmittelbarer Nähe von dichten hohen Hecken.

Standort 04:

Große Fontäne „Feuer“
im Winter eingehaust







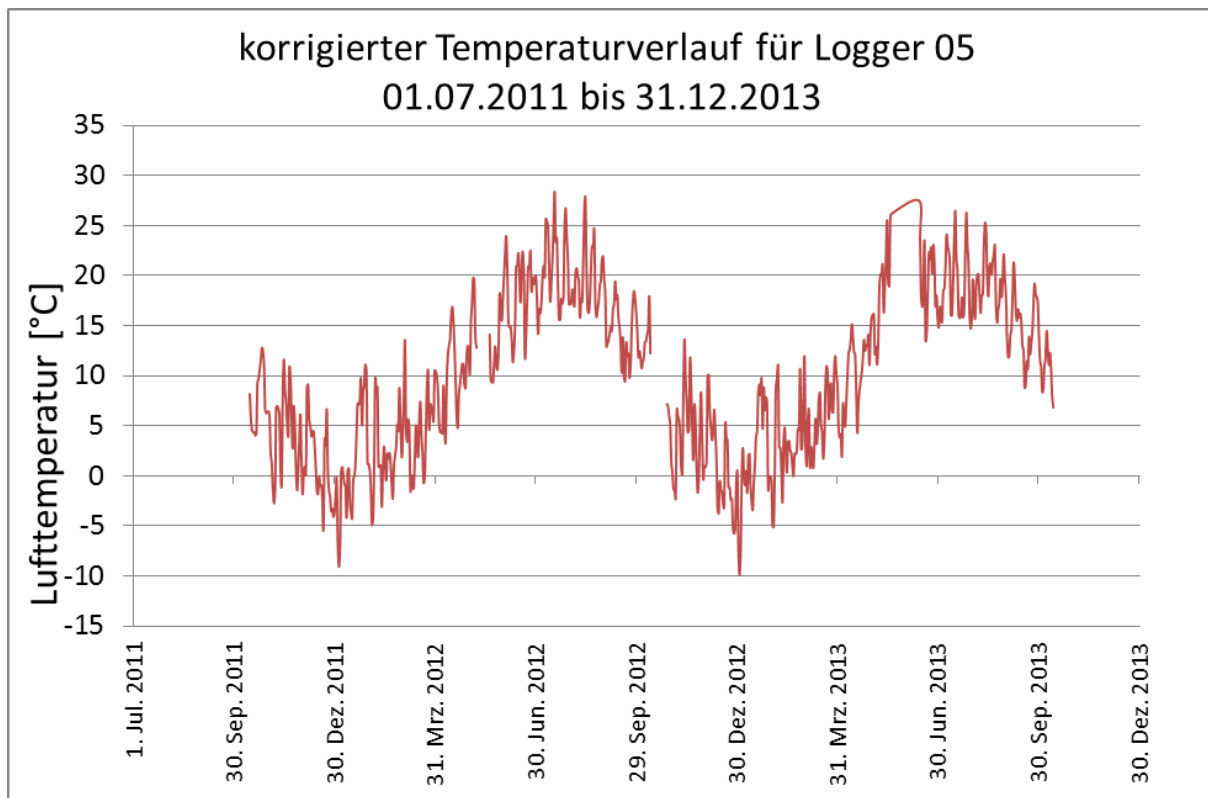
Logger 04 tgl	T [°C]	rH [%]	aH [g/m ³]
Anzahl	536	536	536
Minimum	-10,0	27,9	1,9
Maximum	27,9	100,0	16,4
Mittelwert	8,4	78,4	6,9
Median	7,7	80,8	6,4

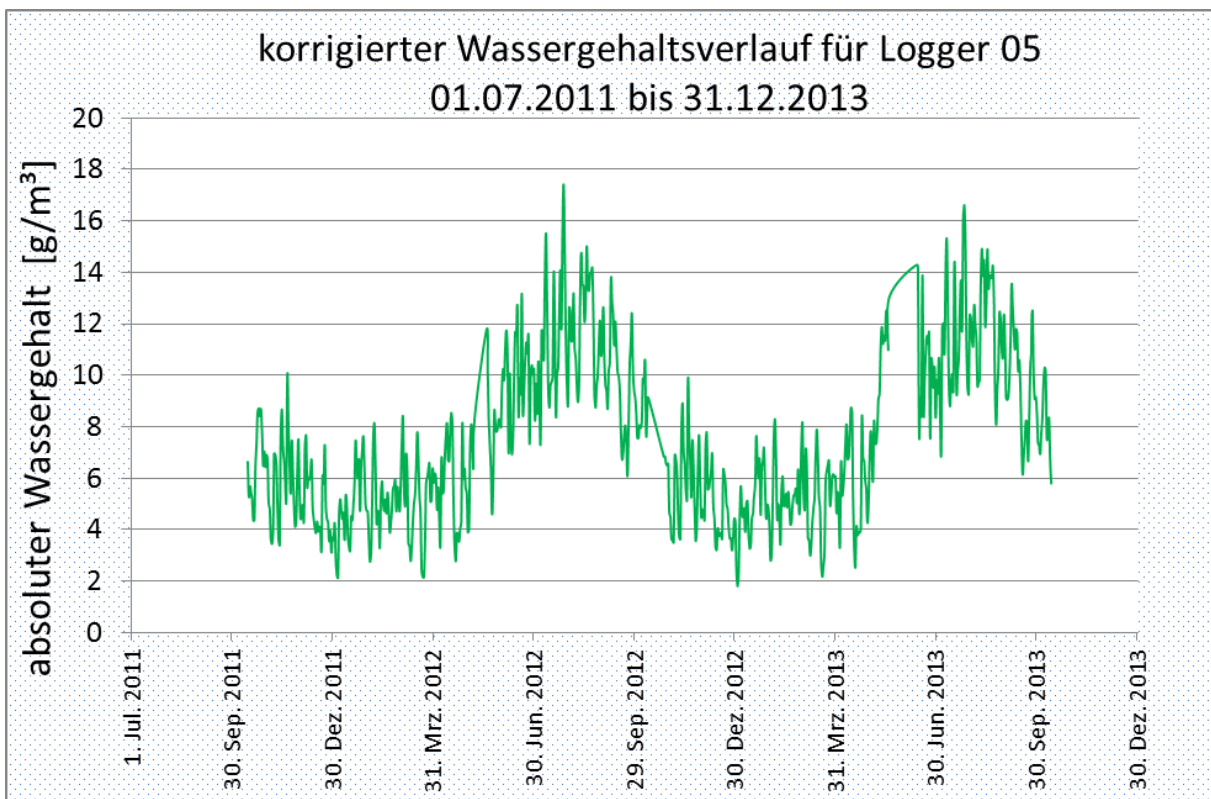
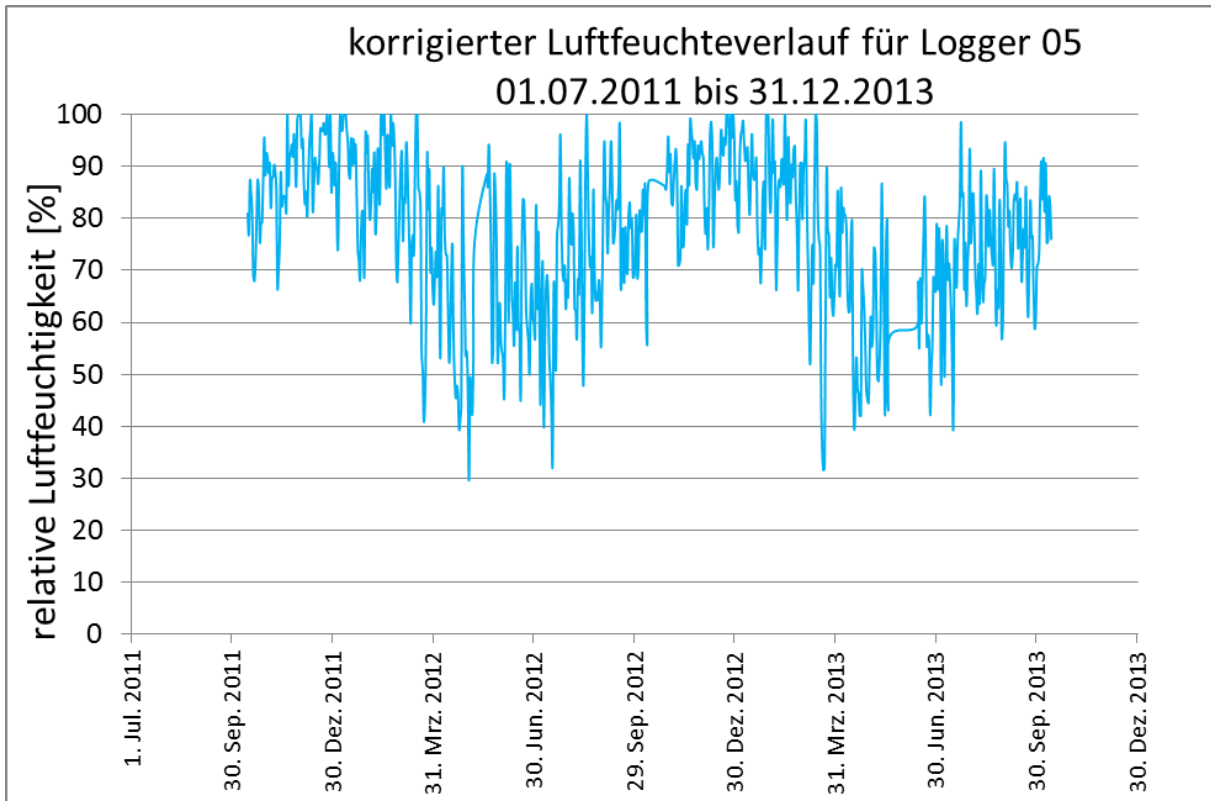
Der Datenlogger wurde in der zweiten Messperiode entwendet.

Diese Figur wird ebenfalls im Winter eingehaust, ist aber im Gegensatz zu 03 völlig freistehend und hat nur sehr niedrige Hecken in ihrer unmittelbaren Umgebung.

Standort 05:

Orangerie-Nordseite Fassade





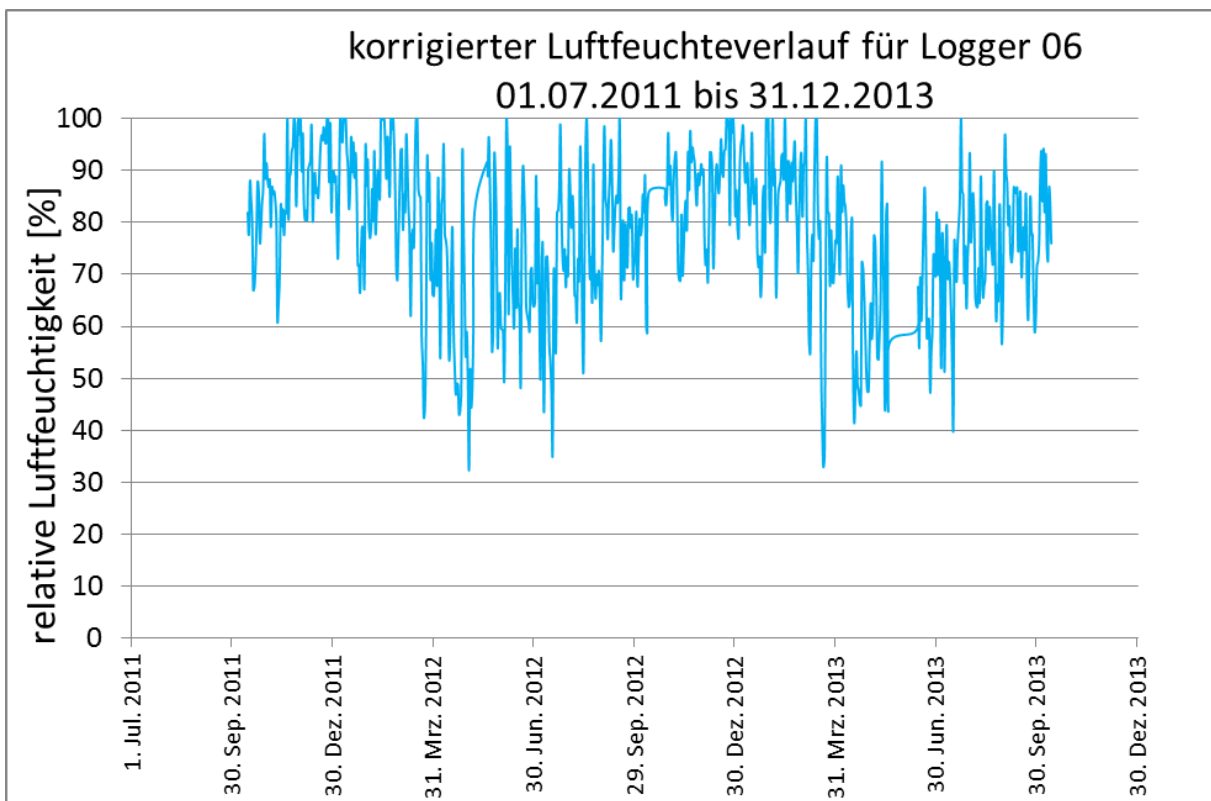
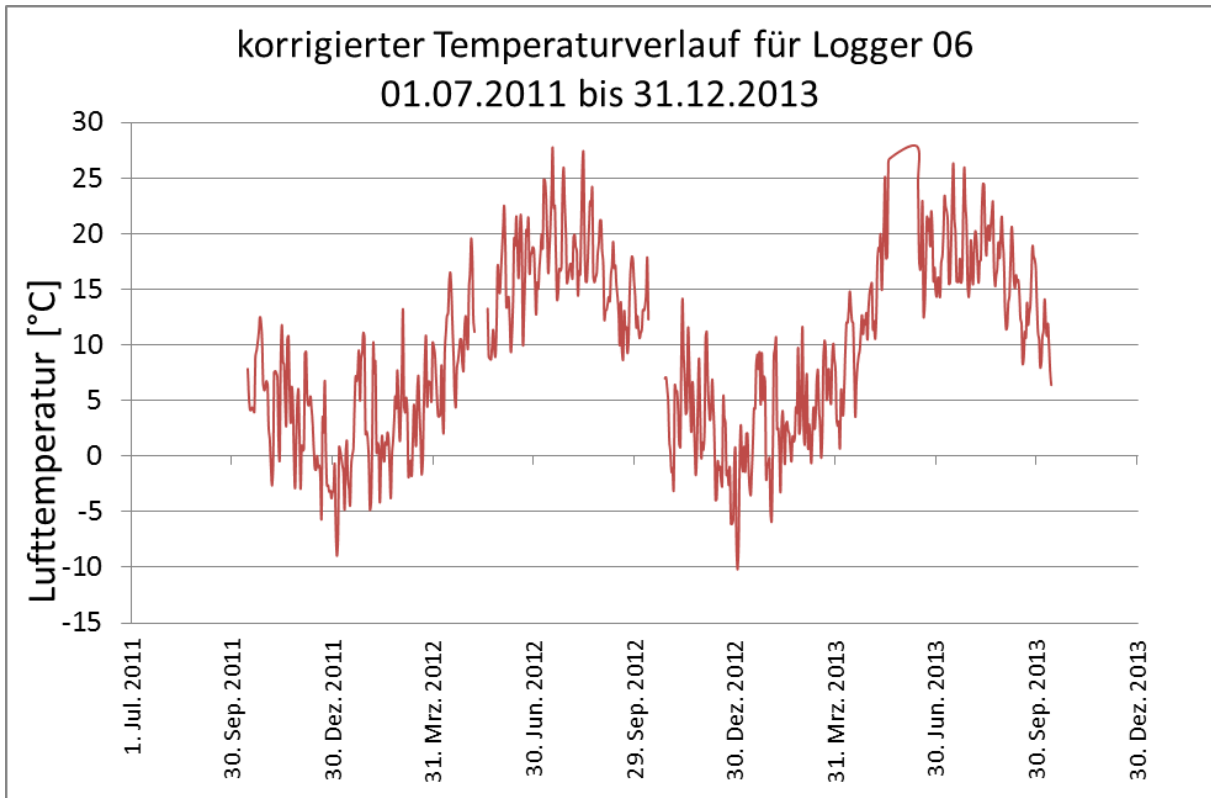
Logger 05 tgl	T [°C]	rH [%]	aH [g/m ³]
Anzahl	683	683	683
Minimum	-9,9	29,6	1,8
Maximum	28,4	100,0	17,4
Mittelwert	9,9	77,0	7,5
Median	9,9	79,5	6,9

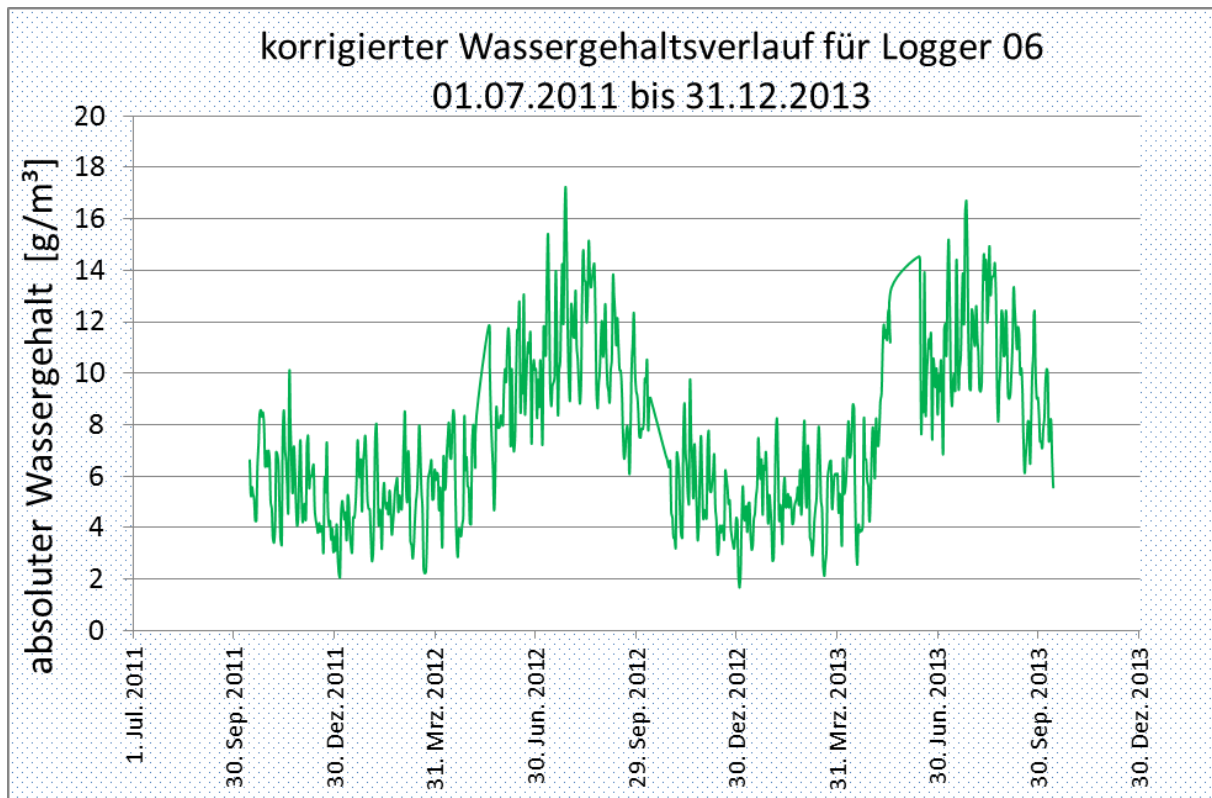
Dieser Logger befindet sich in einer Skulpturenische, in der eine Skulptur stand, die zwischenzeitlich restauriert wurde, da sie sehr niedrige Schallgeschwindigkeiten aufwies.

Standort 06:

Orangerie-Nordloggia „Paris“







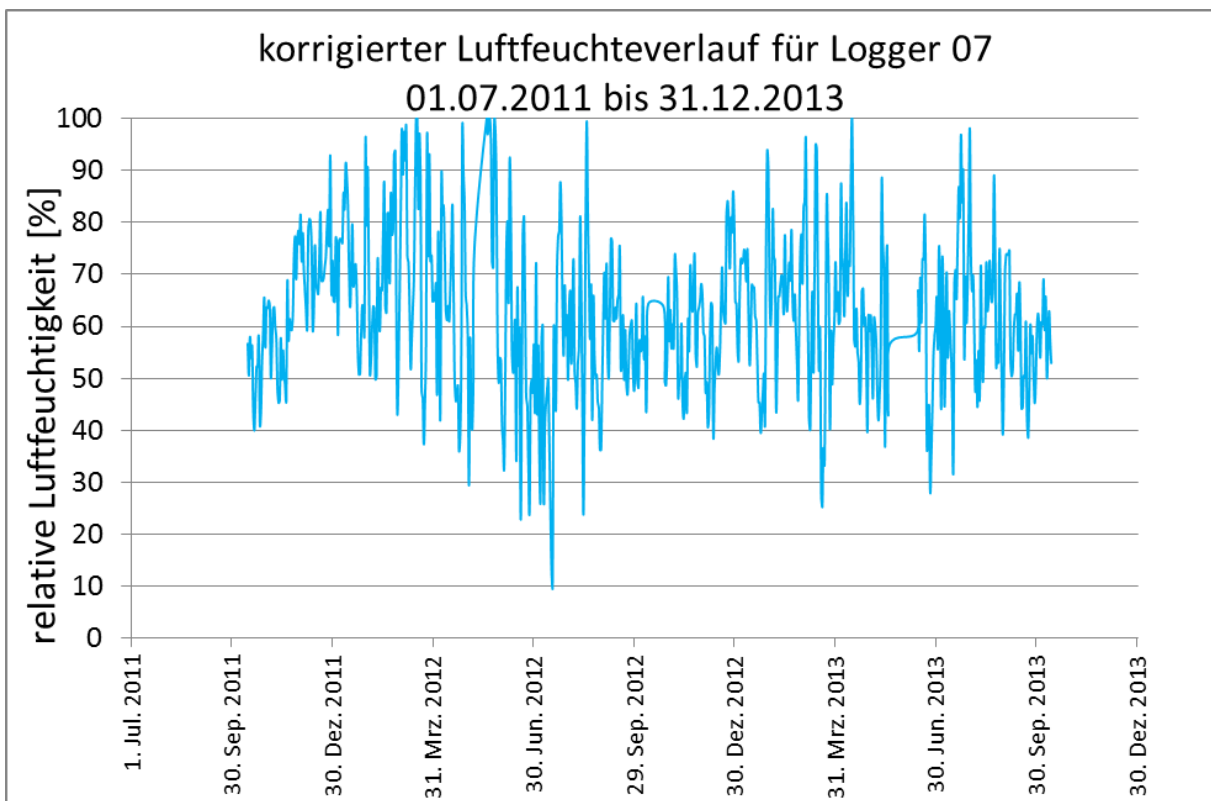
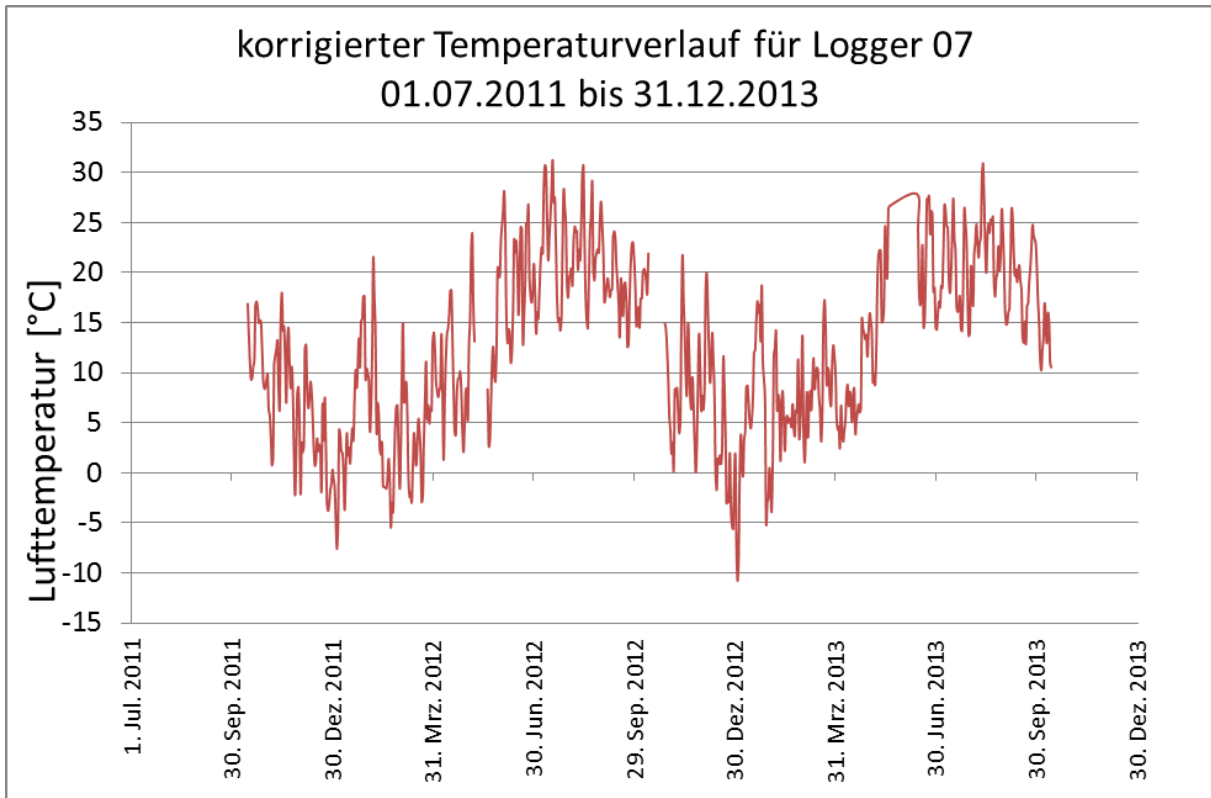
Logger 06 tgl	T [°C]	rH [%]	aH [g/m ³]
Anzahl	683	683	683
Minimum	-10,2	32,3	1,7
Maximum	27,9	100,0	17,2
Mittelwert	9,5	78,1	7,5
Median	9,4	80,0	6,9

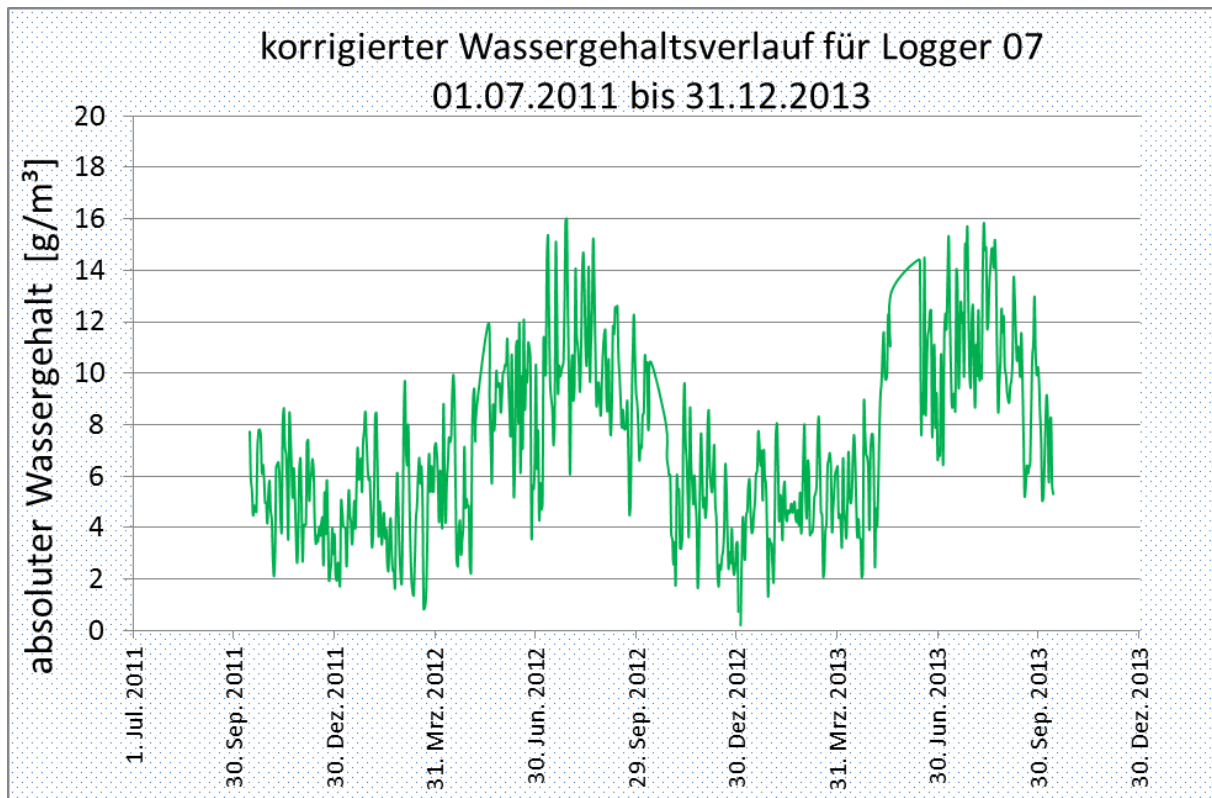
In der Nordloggia der Orangerie befand sich die Skulptur, die in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts zu „Zucker“ zerfallen ist.

Standort 07:

Orangerie-Raffaelsaal hinter Gemälde und später hinter Skulptur
unbeheizter Schloßinnenraum



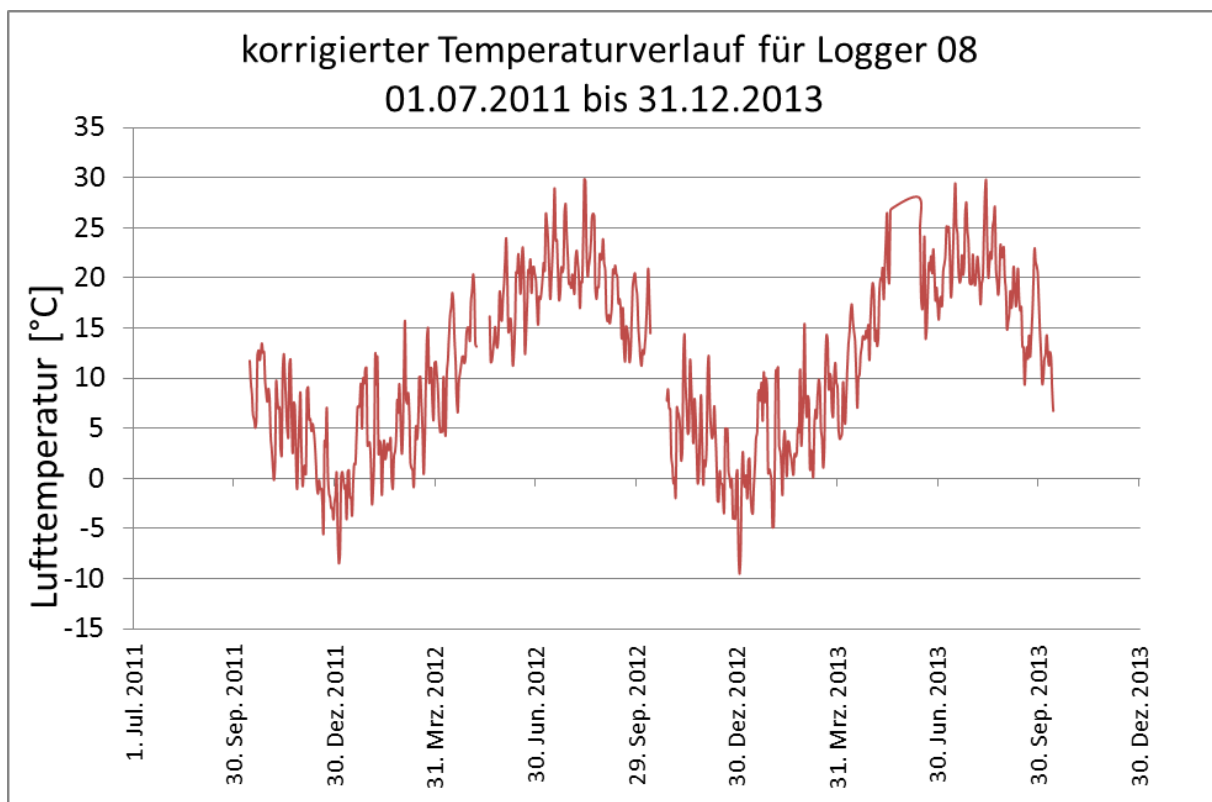


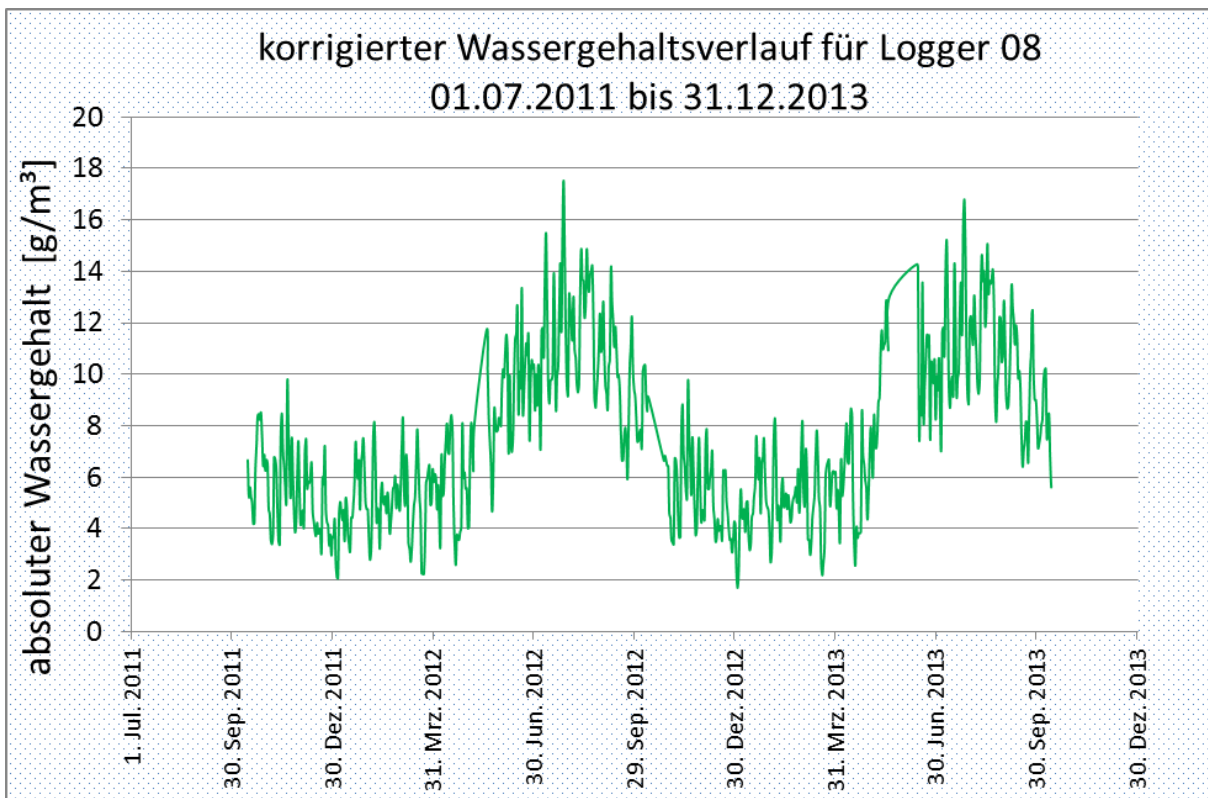
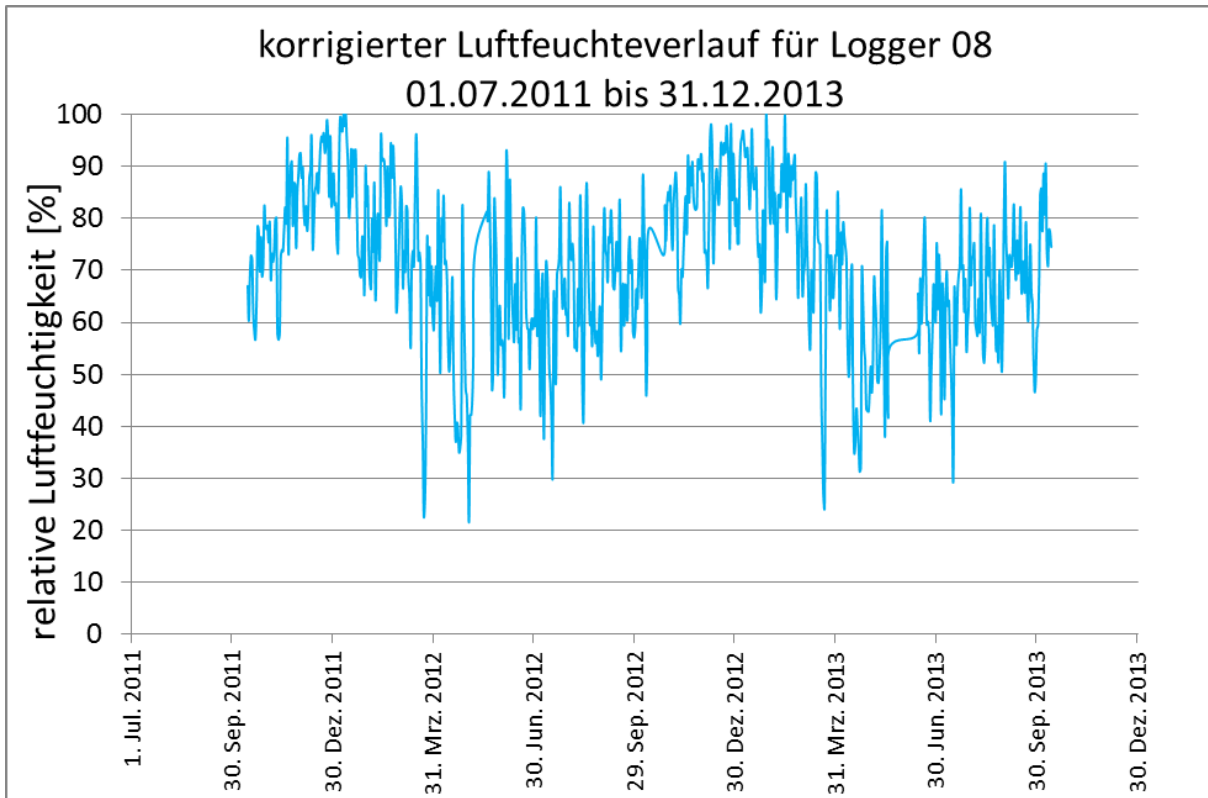


Logger 07 tgl	T [°C]	rH [%]	aH [g/m³]
Anzahl	683	683	682
Minimum	-10,8	9,8	0,2
Maximum	31,2	100,0	16,0
Mittelwert	12,3	62,5	7,1
Median	12,5	62,3	6,5

Standort 08:

Orangerie-Südseite „Der April (Schaf)“
sonnenbeschienene Nische
im Winter nicht eingehaust

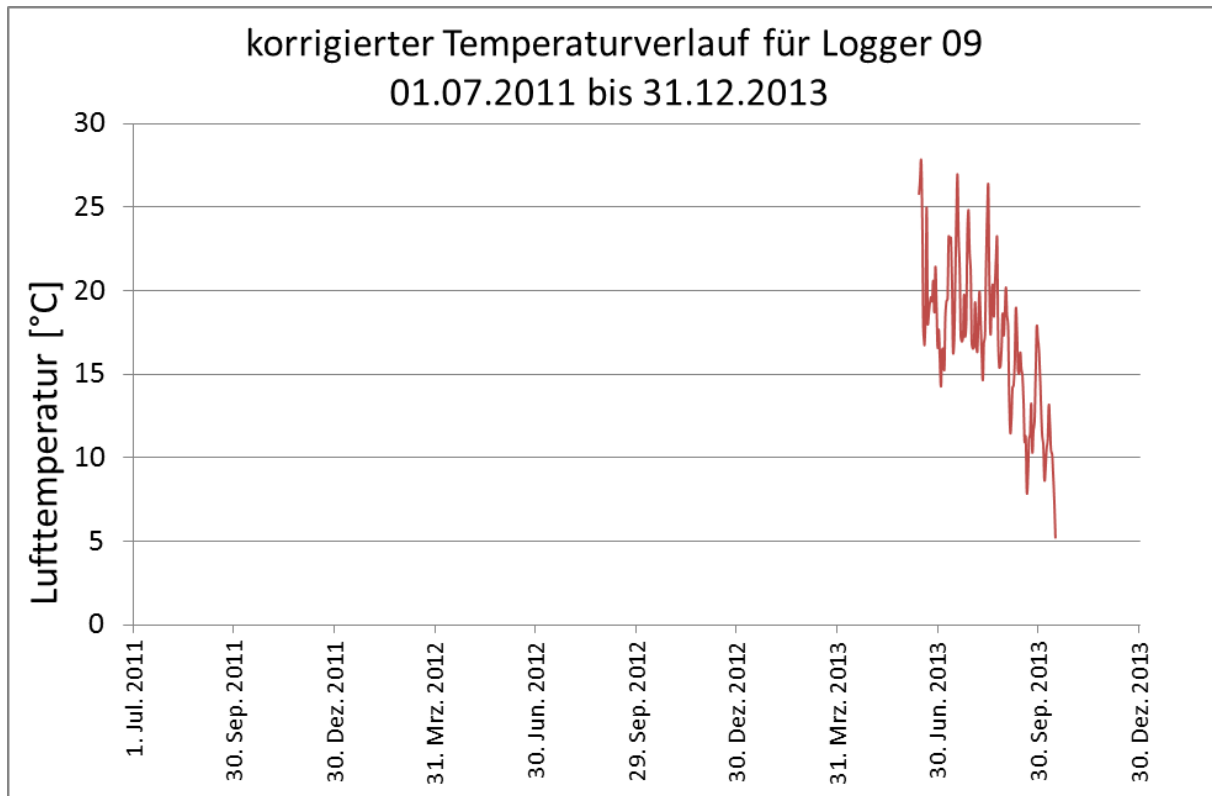


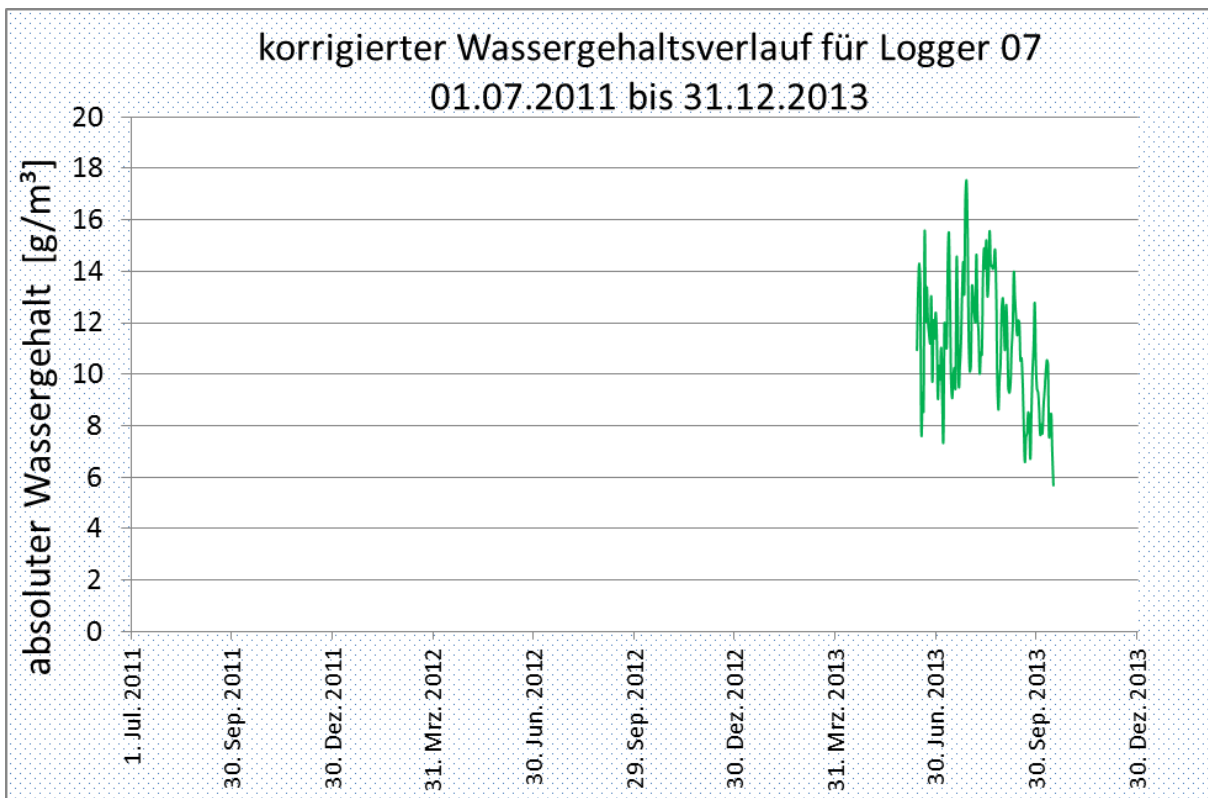
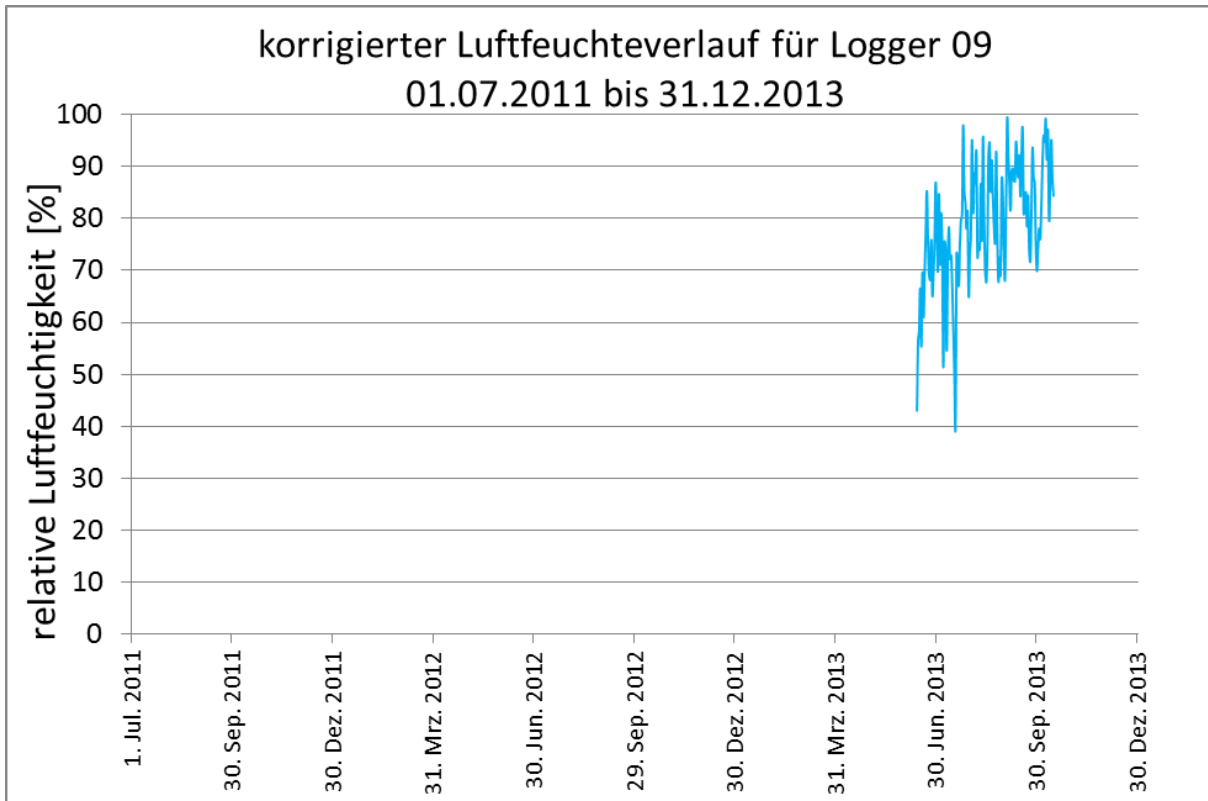


Logger 08 tgl	T [°C]	rH [%]	aH [g/m³]
Anzahl	683	683	683
Minimum	-9,5	21,6	1,7
Maximum	29,8	100,0	17,5
Mittelwert	11,3	71,2	7,5
Median	11,6	72,5	6,8

Standort 09:

Italienisches Rondell „Pluto“
Ersatz für 03
im Winter eingehaust





Logger 09 tgl	T [°C]	rH [%]	aH [g/m³]
Anzahl	125	125	125
Minimum	5,2	39,8	5,7
Maximum	27,8	99,3	17,5
Mittelwert	17,1	78,8	11,2
Median	17,2	78,4	11,1

3.2.2.4. Messstand

Gemeinsam mit den Restauratoren der Schlösserstiftung wurde ein geeigneter Probestein ausgewählt. Die Masse sind 44,5cm x 44,5cm x 26,0cm. Er wiegt etwa 140kg und steht hochkant auf einer Waage, die maximal 200kg mit einer Genauigkeit von +/-10g erfassen kann.

Die Dimensionen des Steines entsprechen der Größenordnung lebens- und leicht überlebensgroßer Marmorskulpturen im Bereich des Beckens, des Bauches und des Brustbereiches, sind also mit realen Situationen vergleichbar.

Der Messstand befindet sich an einer Südwand und ist regengeschützt.



Messstand

In dem Marmorblock („Kleiner Stein“) befinden sich über dem Querschnitt (26cm) verteilt, sieben 8mm-Bohrungen, in denen sich in einer Tiefe von 20cm Temperatur-Feuchte-Sensoren befinden und so die thermo-hygrischen Bedingungen unter realen Klimaeinflüssen im Marmorinneren messen können. Die Messdaten werden alle 5 Minuten auf einem Rechner abgespeichert.

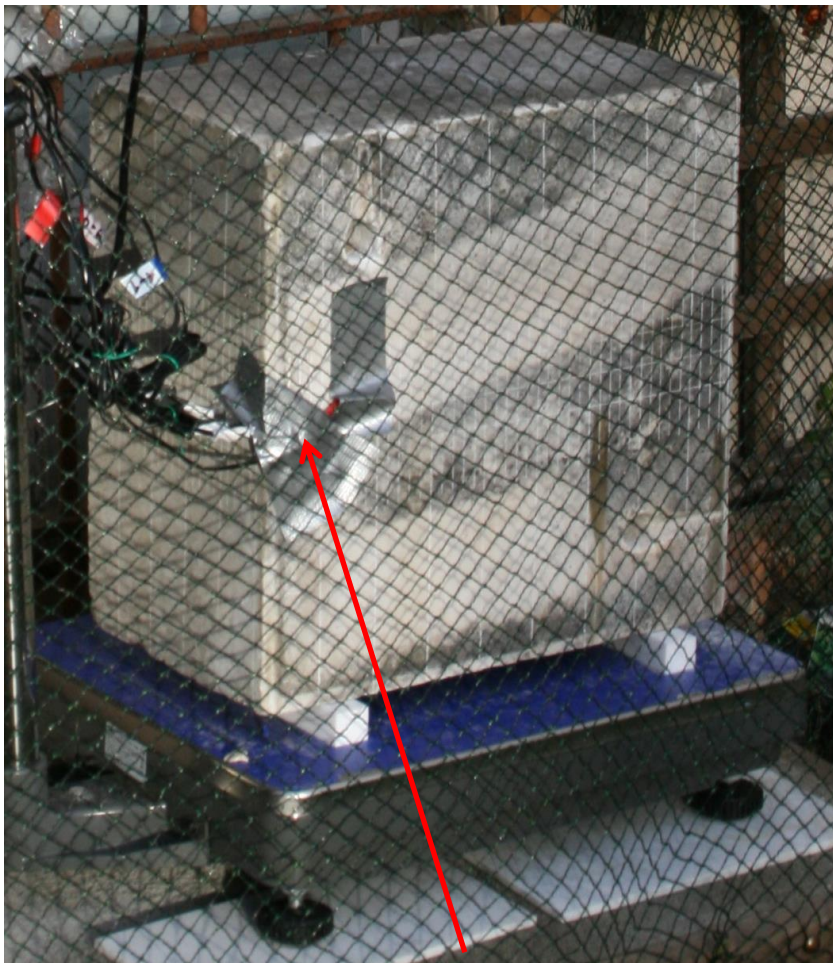
Die Sensoren befinden sich in folgenden Tiefen, von der Rückseite des Steines (an der Hauswand) an gerechnet:

- 01 cm
- 03 cm
- 07 cm
- 13 cm (Mitte)
- 20 cm
- 23 cm
- 25 cm

Begleitet wurden die Innenmessungen im Stein durch Temperatur- und Feuchtemessungen in der Luft in der unmittelbaren Umgebung des Probesteines und durch Lichtmessungen, um direkte Sonneneinstrahlungen zu erfassen.

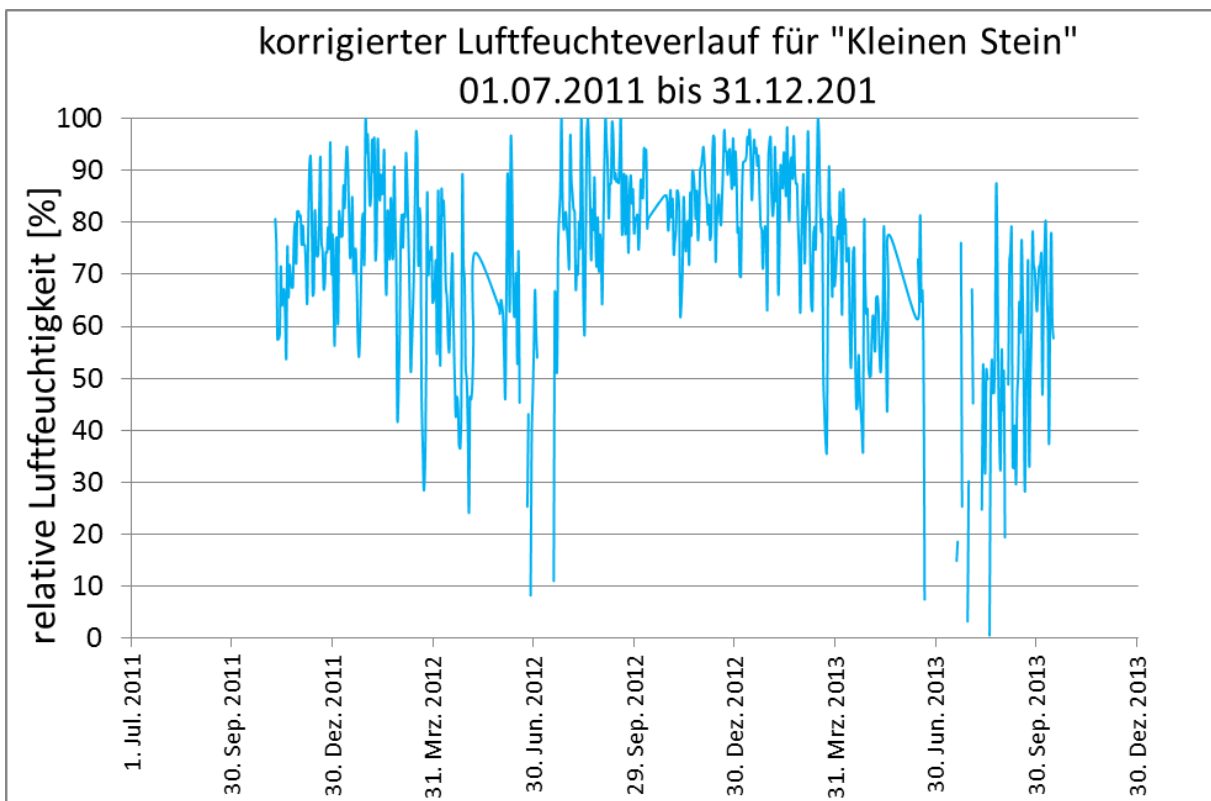
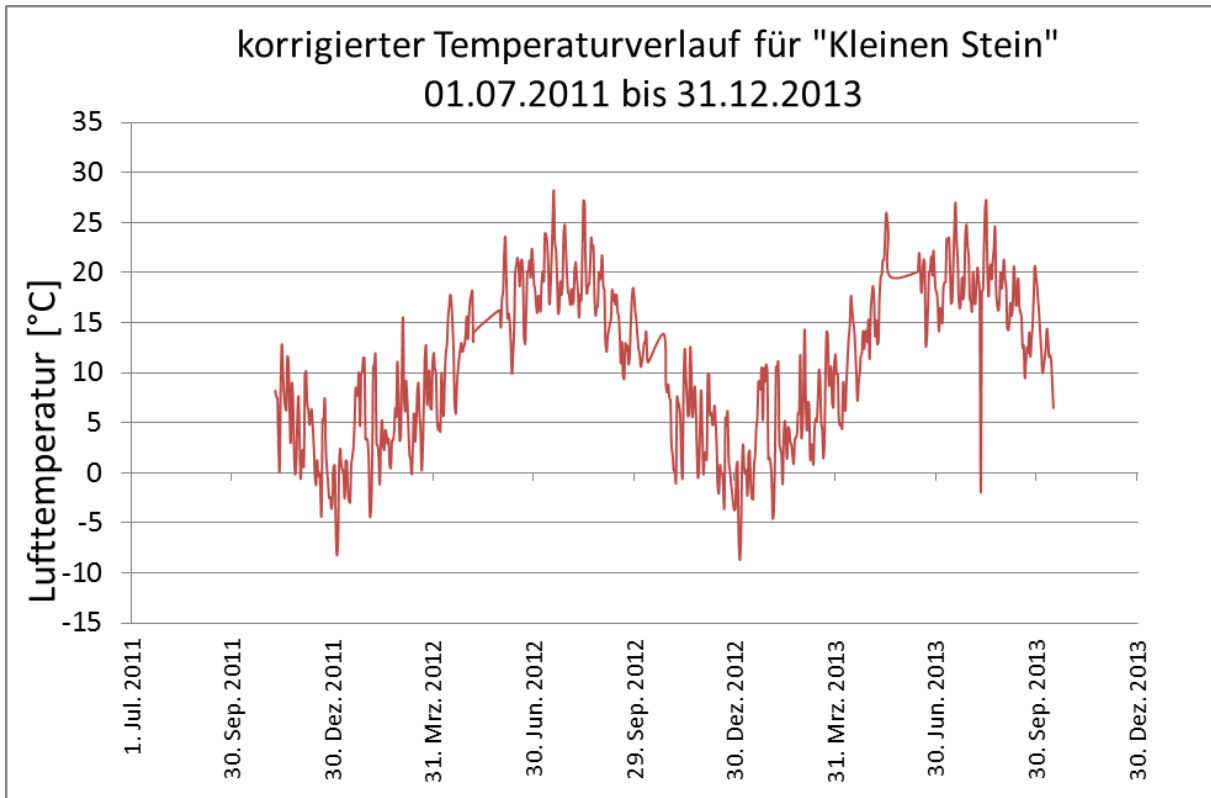
Die Messungen begannen im November 2011 und laufen seither mit wenigen Unterbrechungen, die auf Probleme mit der Stromversorgung des Systems im Zusammenhang standen.

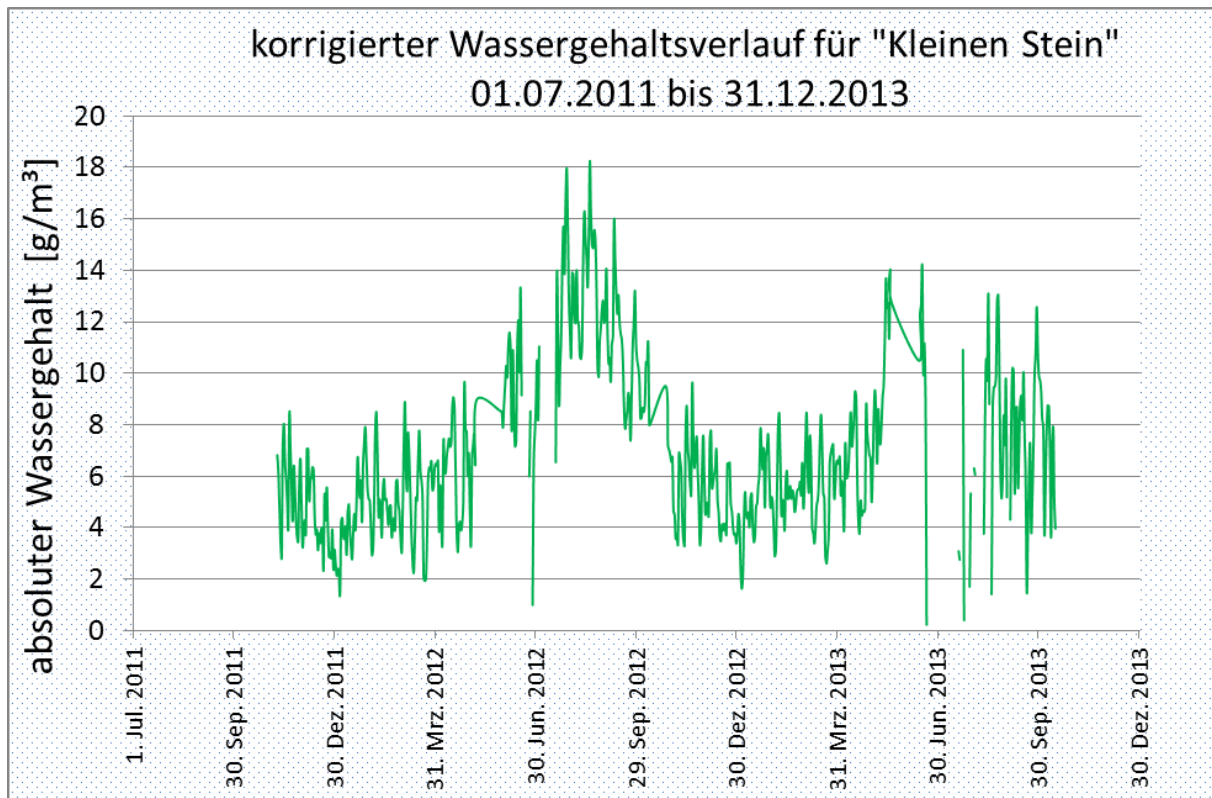
2012 wurde ein zusätzliches ständiges Ultraschallmesssystem installiert, das bedarfsweise betrieben werden konnte. In der Anfangsphase erfolgten die Messungen über die Messstrecke von 44,5 cm. Probleme mit der Sensorenankopplung zwangen zu ihrer festen Verklebung mittel Epoxidharz. Erst 2015 gelang es, das System so zu entstoren (Hochspannungsstörungen des Gebersystems), das Messungen über eine Messstrecke von 26,0 cm möglich waren.



„Kleiner Stein“ mit Sensoren auf der Waage

Die gemittelten und korrigierten täglichen Messwerte ergeben folgendes Bild:

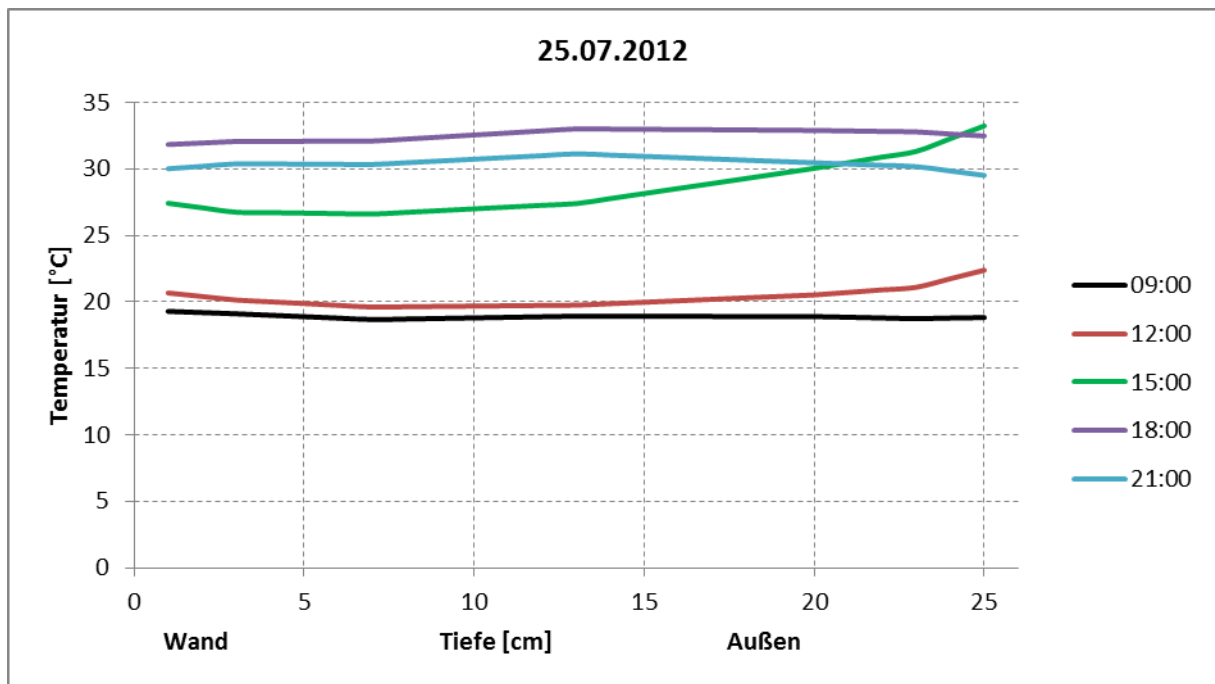




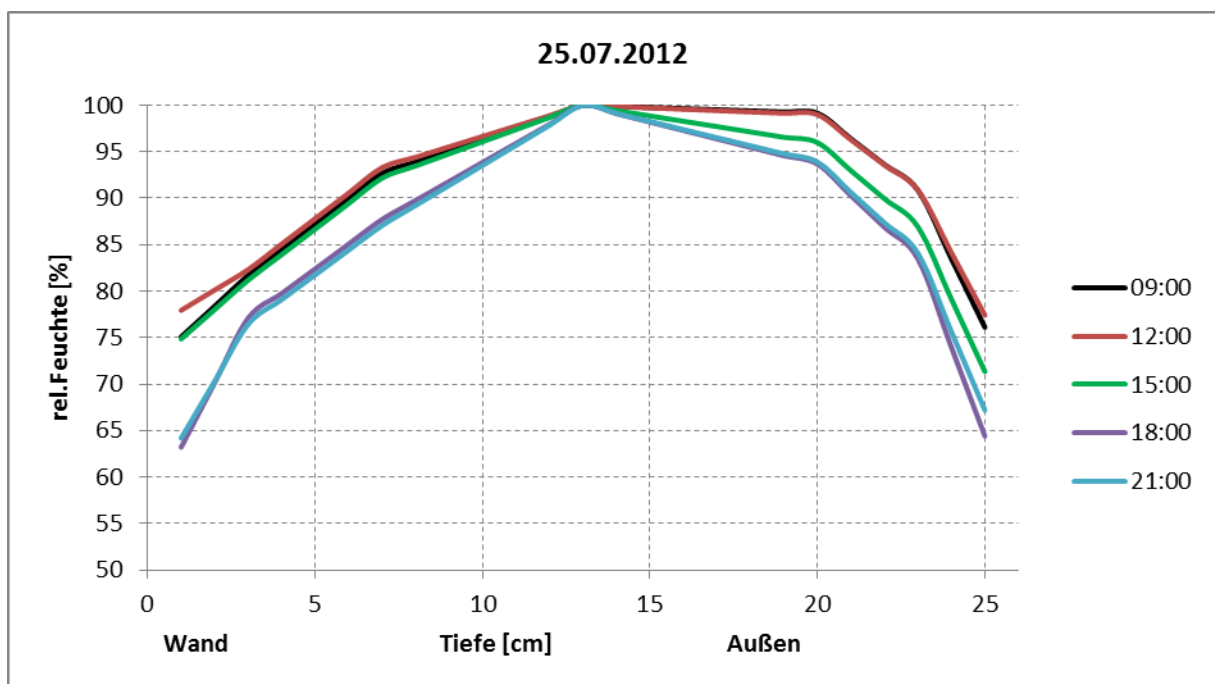
Messstand	T [°C]	rH [%]	aH [g/m ³]
Anzahl	645	582	582
Minimum	-8,7	0,5	0,2
Maximum	28,2	100,0	18,2
Mittelwert	10,8	72,1	6,9
Median	11,1	75,7	6,3

Einzelne „Ausreißer“ bei den korrigierten Messwerten sind nicht vermeidbar, statistisch aber irrelevant.

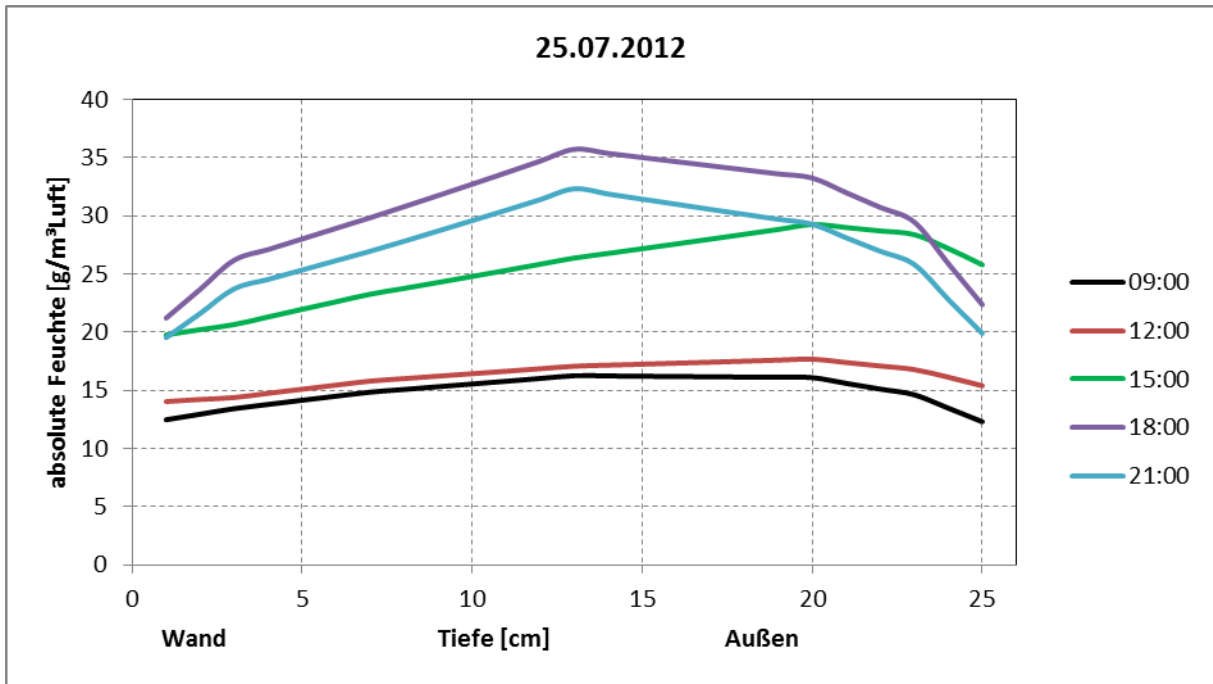
Auch das Temperatur- und Feuchteprofil im Inneren des Steines ist täglichen Schwankungen unterworfen.



Tägliche Entwicklung des Temperaturprofils im Stein

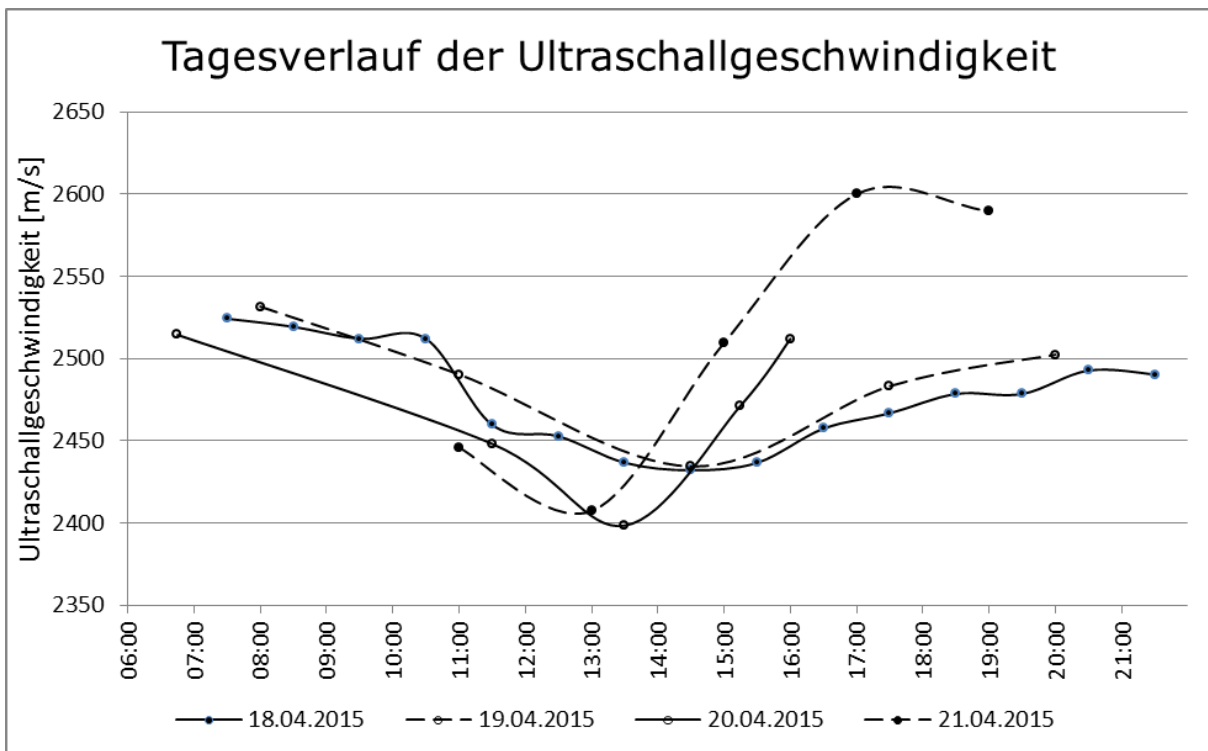


tägliche Entwicklung des Profils der relativen Luftfeuchtigkeit im Stein



tägliche Entwicklung des Profils der absoluten Feuchte im Stein

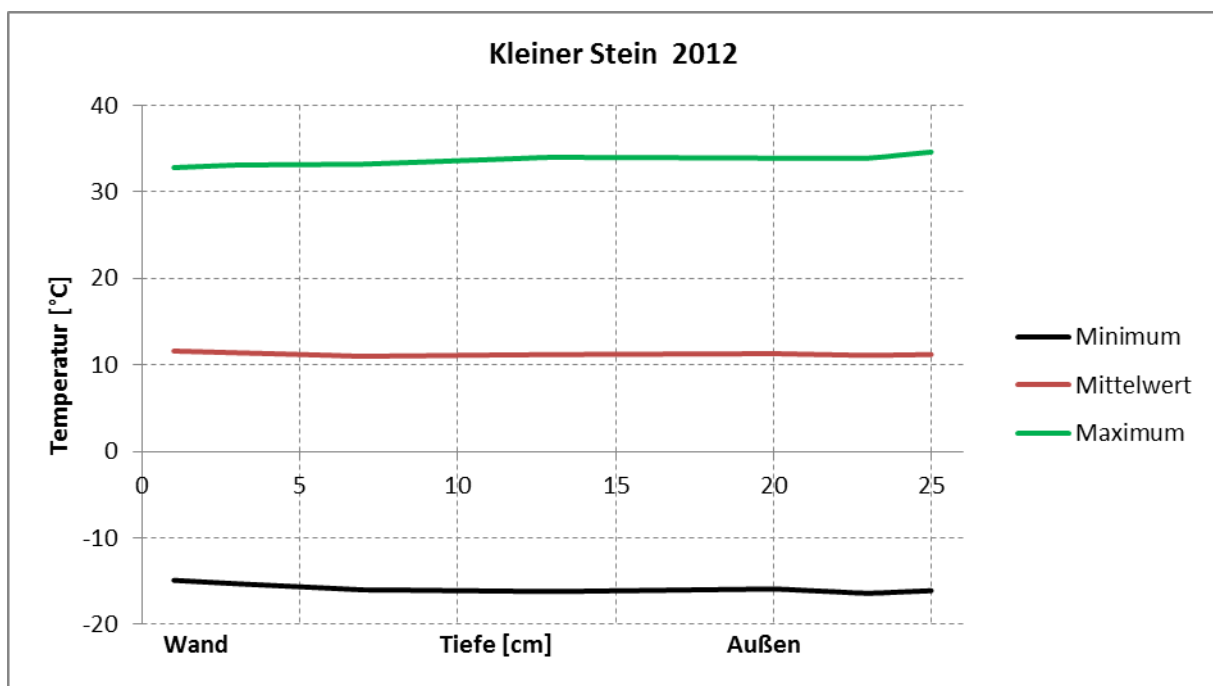
Diese täglichen Schwankungen sind auch bei den Ultraschallgeschwindigkeiten zu finden.

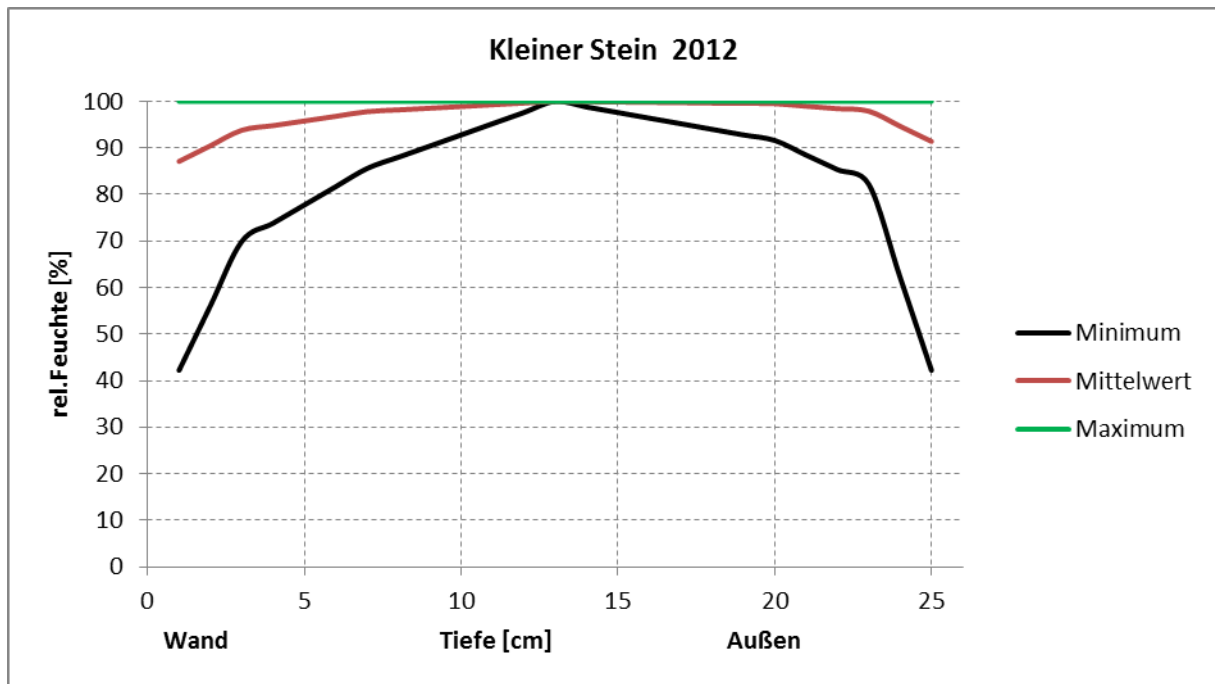


Schwankungen der Ultraschallgeschwindigkeiten im Tagesverlauf

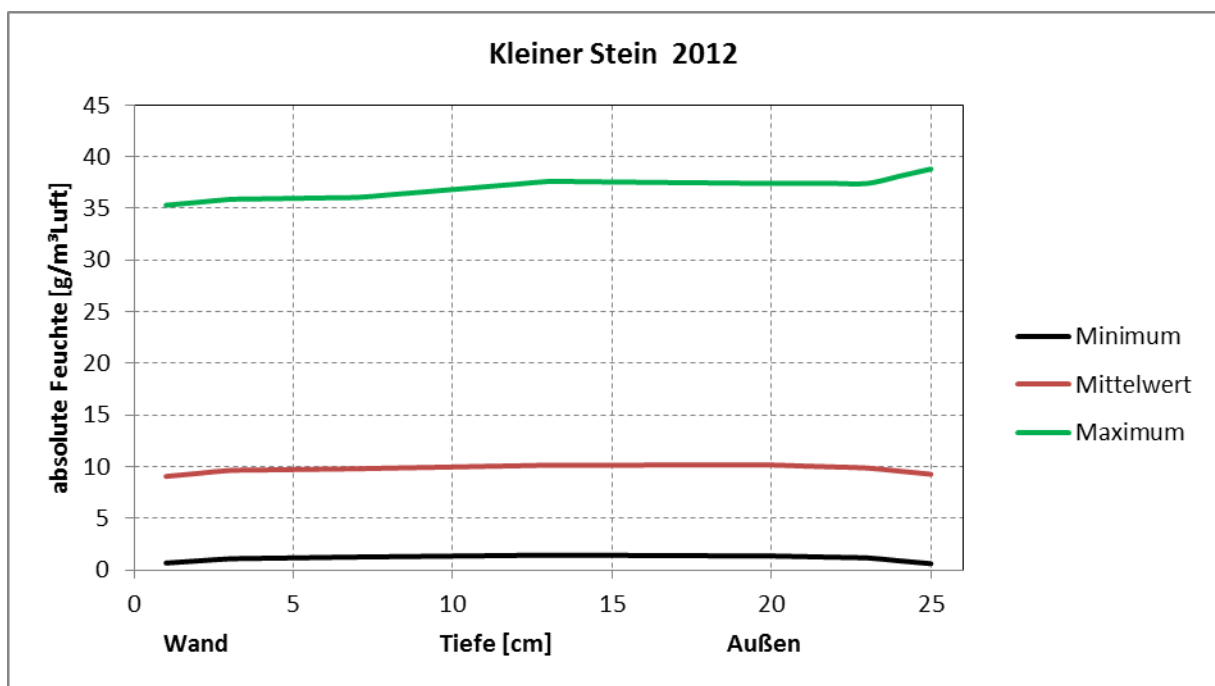
Die Zusammenfassung der Messungen für das Jahr 2012 ergibt folgendes Bild:

Sensorposition	2012	Minimum	Mittelwert	Maximum
01cm Wand	Temperatur T [°C]	-14,9	11,6	32,8
	relative Luftfechtig. rH [%]	42,2	87,1	100,0
	absolute Feuchte aH [g/m ³]	0,7	9,1	35,4
03cm	Temperatur T [°C]	-15,3	11,4	33,1
	relative Luftfechtig. rH [%]	69,9	93,8	100,0
	absolute Feuchte aH [g/m ³]	1,1	9,6	35,8
07cm	Temperatur T [°C]	-16,0	11,0	33,2
	relative Luftfechtig. rH [%]	85,6	97,8	100,0
	absolute Feuchte aH [g/m ³]	1,3	9,8	36,1
13cm Mitte	Temperatur T [°C]	-16,2	11,2	34,0
	relative Luftfechtig. rH [%]	100,0	100,0	100,0
	absolute Feuchte aH [g/m ³]	1,4	10,2	37,7
20cm	Temperatur T [°C]	-15,9	11,3	33,9
	relative Luftfechtig. rH [%]	91,6	99,5	100,0
	absolute Feuchte aH [g/m ³]	1,4	10,2	37,5
23cm	Temperatur T [°C]	-16,4	11,1	33,9
	relative Luftfechtig. rH [%]	82,2	97,8	100,0
	absolute Feuchte aH [g/m ³]	1,2	9,9	37,5
25cm Außen	Temperatur T [°C]	-16,1	11,2	34,6
	relative Luftfechtig. rH [%]	42,2	91,4	100,0
	absolute Feuchte aH [g/m ³]	0,6	9,3	38,8
Luft	Temperatur T [°C]	-19,1	10,9	41,5
	relative Luftfechtig. rH [%]	0,0	70,4	100,0
	absolute Feuchte aH [g/m ³]	0,0	7,0	55,1





Bemerkenswert ist die über das ganze Jahr hinweg erhöhte relative Feuchte im Porenraum in der Mitte des Steines, im Vergleich zu seinen Randbereichen.



Auch bei den absoluten Feuchten ist eine leichte Erhöhung in der Mitte des Steines messbar.

3.2.3. Auswertung

Für die Beurteilung der einzelnen Standorte müssen alle Werte zusammengefasst und nach Jahreszeiten getrennt ausgewertet werden.

Zunächst alle korrigierten Werte für einen einjährigen Messzeitraum von 2012 bis 2013.

27.10.2012 bis 16.10.2013		TRY 04	DWD- Potsdam	Meß- stand	Logger 01	Logger 02	Logger 04	Logger 05	Logger 06	Logger 07	Logger 08	Logger 03+09
T [°C]												
Anzahl		331	331	329	329	330	330	330	330	330	330	331
Minimum		-9,4	-9,5	-8,7	-9,4	-9,0	-10,0	-9,9	-10,2	-10,8	-9,5	-8,2
Maximum		26,5	27,3	27,2	30,5	31,0	27,9	27,5	27,9	30,9	29,7	27,8
Mittelwert		9,3	8,5	10,8	10,4	11,0	10,5	10,0	9,6	12,5	11,3	9,7
Median		9,5	7,8	10,8	10,3	10,9	10,6	10,0	9,5	12,6	11,1	9,4

27.10.2012 bis 16.10.2013		TRY 04	DWD- Potsdam	Meß- stand	Logger 01	Logger 02	Logger 04	Logger 05	Logger 06	Logger 07	Logger 08	Logger 03+09
rH [%]												
Anzahl		331	331	287	329	330	330	330	330	330	330	331
Minimum		35,4	39,6	0,5	13,5	14,4	33,9	31,5	32,9	25,2	24,3	33,8
Maximum		99,0	100,0	99,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0
Mittelwert		79,9	80,5	70,4	74,7	75,3	76,8	76,9	77,7	61,7	71,7	82,0
Median		82,1	83,1	76,1	77,1	77,6	77,6	78,5	79,5	61,3	72,9	84,5

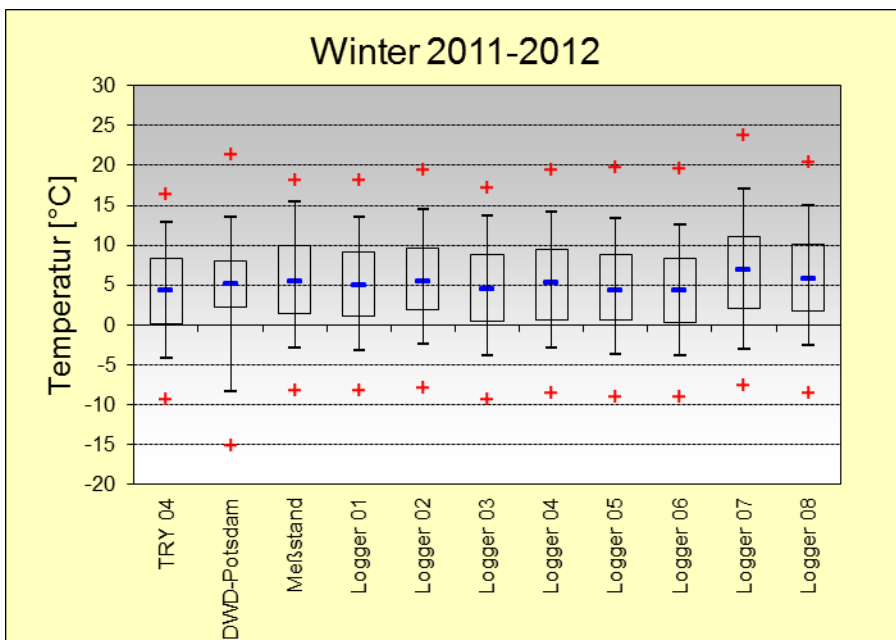
27.10.2012 bis 16.10.2013		TRY 04	DWD- Potsdam	Meß- stand	Logger 01	Logger 02	Logger 04	Logger 05	Logger 06	Logger 07	Logger 08	Logger 03+09
aH [g/m ³]												
Anzahl		331	331	287	329	330	330	330	330	329	330	331
Minimum		1,9	1,7	0,2	0,5	0,6	1,9	1,8	1,7	0,2	1,7	2,0
Maximum		17,2	17,2	14,2	17,7	18,5	16,4	16,6	16,7	15,8	16,8	17,5
Mittelwert		7,6	7,4	6,4	7,5	7,8	7,7	7,6	7,5	7,2	7,5	7,7
Median		6,9	7,0	6,1	7,0	7,3	7,1	6,8	6,8	6,4	6,8	6,8

Für eine bessere Bewertung müssen die jahreszeitlichen Messungen miteinander verglichen werden.

Winterperiode 2011-2012

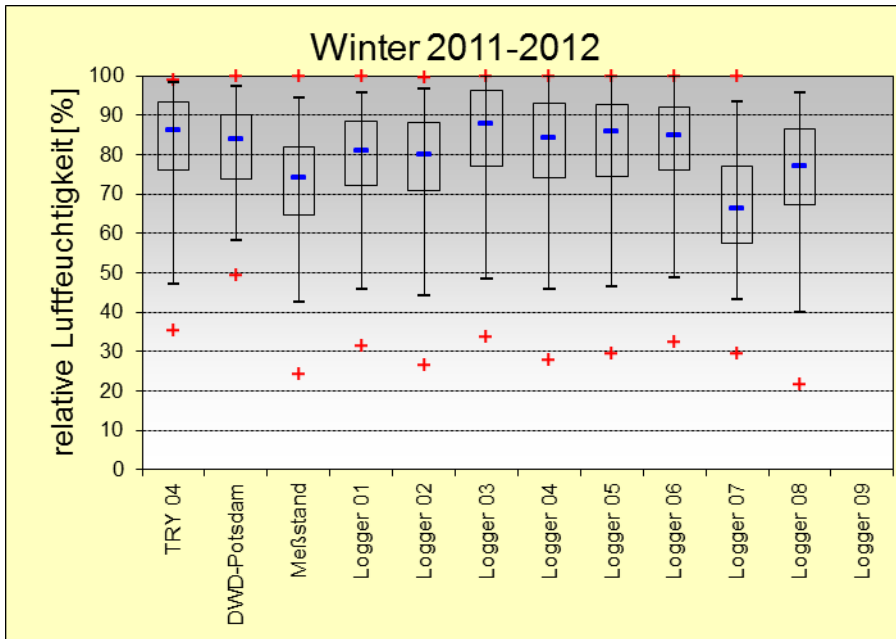
15.10.2011 bis 08.05.2012

T [°C]	TRY 04	DWD-Potsdam	Meßstand	Logger 01	Logger 02	Logger 03	Logger 04	Logger 05	Logger 06	Logger 07	Logger 08	Logger 09
Anzahl	206	206	179	206	206	206	206	206	206	206	206	
Minimum	-9,4	-15,1	-8,2	-8,2	-7,9	-9,3	-8,5	-9,1	-9,0	-7,6	-8,5	
Maximum	16,3	21,4	18,2	18,2	19,4	17,1	19,4	19,8	19,6	23,8	20,4	
Mittelwert	4,4	4,8	5,7	5,2	5,8	4,8	5,2	4,5	4,3	6,7	5,9	
Median	4,3	5,2	5,4	4,9	5,4	4,5	5,3	4,4	4,3	6,9	5,7	



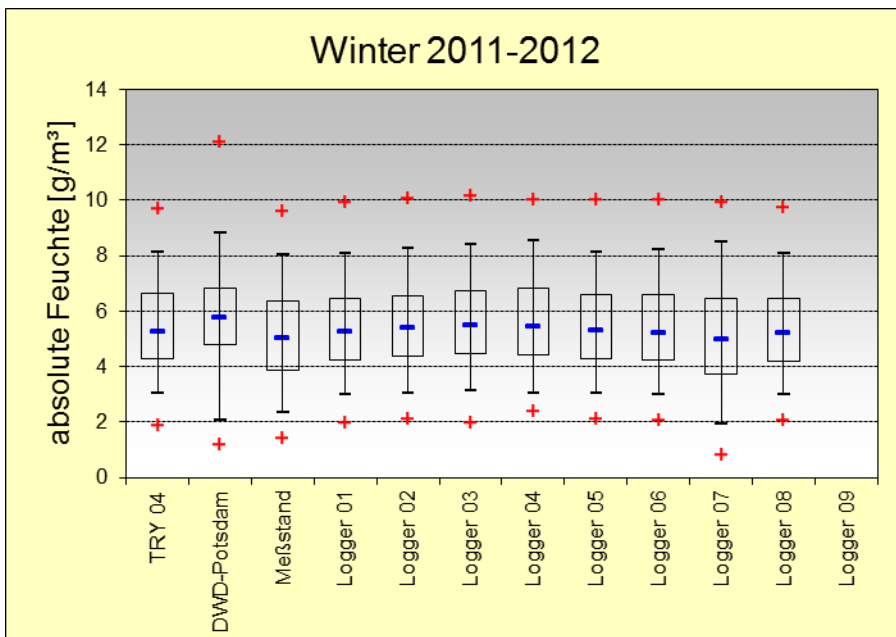
15.10.2011 bis 08.05.2012

rH [%]	TRY 04	DWD-Potsdam	Meßstand	Logger 01	Logger 02	Logger 03	Logger 04	Logger 05	Logger 06	Logger 07	Logger 08	Logger 09
Anzahl	206	206	179	206	206	206	206	206	206	206	206	
Minimum	35,4	49,4	24,2	31,4	26,4	33,8	27,9	29,6	32,3	29,4	21,6	
Maximum	99,0	99,9	100,0	100,0	99,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Mittelwert	82,2	81,3	71,9	78,2	77,3	84,0	81,0	81,7	81,6	67,0	74,7	
Median	86,2	84,0	74,1	80,9	79,9	87,8	84,3	85,7	85,0	66,4	77,1	



15.10.2011 bis 08.05.2012

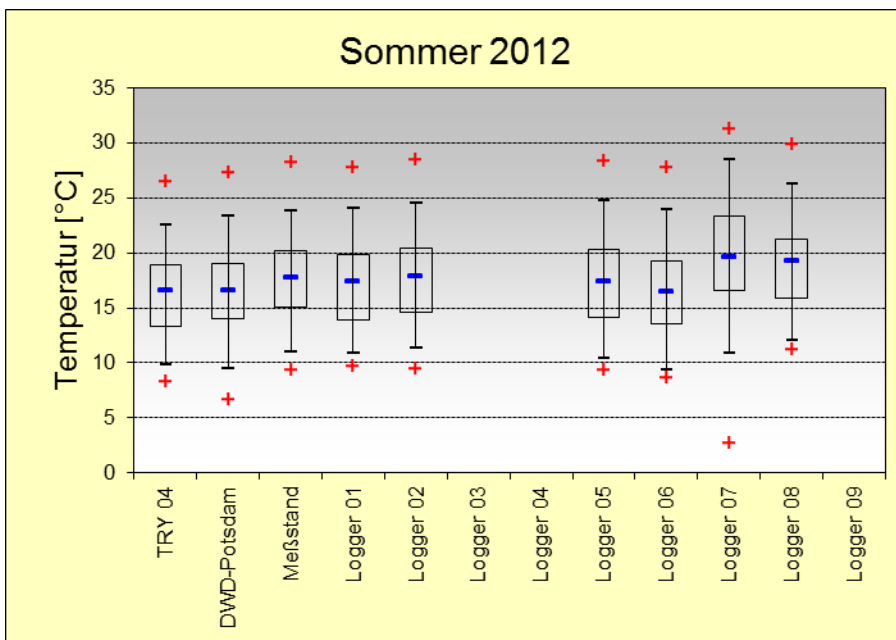
aH [g/m ³]	TRY 04	DWD-Potsdam	Meißland	Logger 01	Logger 02	Logger 03	Logger 04	Logger 05	Logger 06	Logger 07	Logger 08	Logger 09
Anzahl	206	206	179	206	206	206	206	206	206	206	206	
Minimum	1,9	1,2	1,4	2,0	2,1	2,0	2,4	2,1	2,1	0,8	2,1	
Maximum	9,7	12,1	9,6	9,9	10,1	10,1	10,0	10,0	10,0	9,9	9,7	
Mittelwert	5,4	5,7	5,1	5,4	5,5	5,6	5,6	5,4	5,4	5,1	5,3	
Median	5,3	5,8	5,0	5,3	5,4	5,5	5,5	5,3	5,2	5,0	5,2	



Sommerperiode 2012

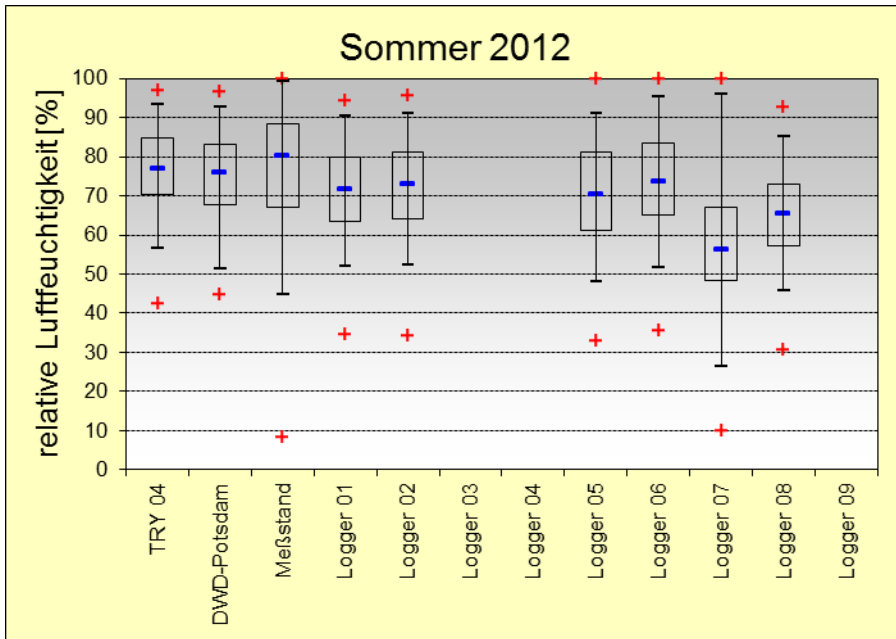
19.05.2012 bis 13.10.2012

T [°C]	TRY 04	DWD-Potsdam	Meßstand	Logger 01	Logger 02	Logger 03	Logger 04	Logger 05	Logger 06	Logger 07	Logger 08	Logger 09
Anzahl	148	148	137	147	147			147	147	147	147	
Minimum	8,3	6,7	9,4	9,7	9,4			9,3	8,7	2,7	11,2	
Maximum	26,5	27,3	28,2	27,8	28,5			28,4	27,8	31,2	29,8	
Mittelwert	16,3	16,5	17,6	17,2	17,7			17,4	16,5	19,7	18,9	
Median	16,6	16,6	17,8	17,4	17,9			17,4	16,5	19,6	19,2	



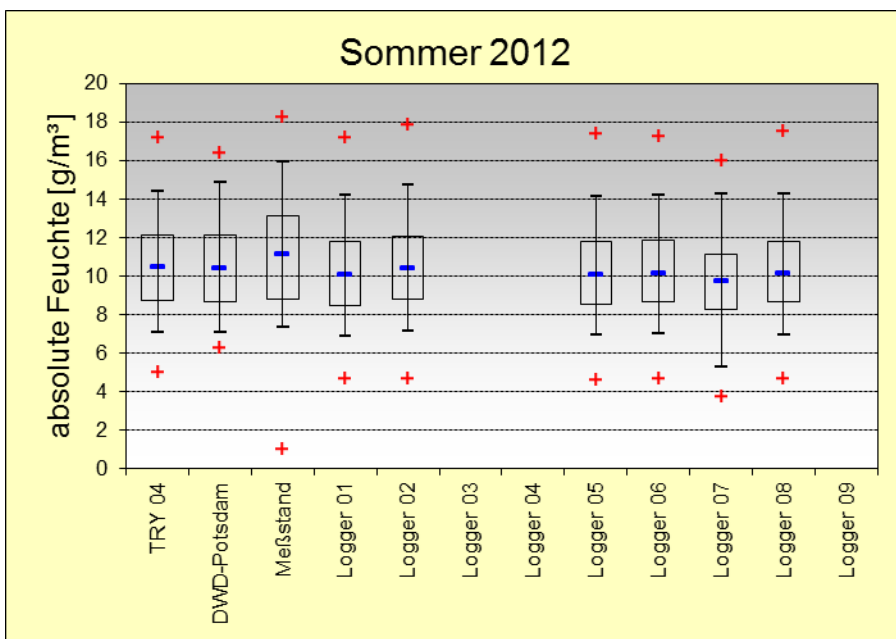
19.05.2012 bis 13.10.2012

rH [%]	TRY 04	DWD-Potsdam	Meßstand	Logger 01	Logger 02	Logger 03	Logger 04	Logger 05	Logger 06	Logger 07	Logger 08	Logger 09
Anzahl	148	148	116	147	147			147	147	147	147	
Minimum	42,3	44,7	8,3	34,6	34,4			32,9	35,6	9,8	30,6	
Maximum	97,0	96,7	100,0	94,4	95,8			100,0	100,0	100,0	92,8	
Mittelwert	76,9	74,8	76,4	71,3	72,1			70,8	74,0	58,1	65,3	
Median	76,9	76,0	80,3	71,7	72,8			70,4	73,5	56,1	65,3	



19.05.2012 bis 13.10.2012

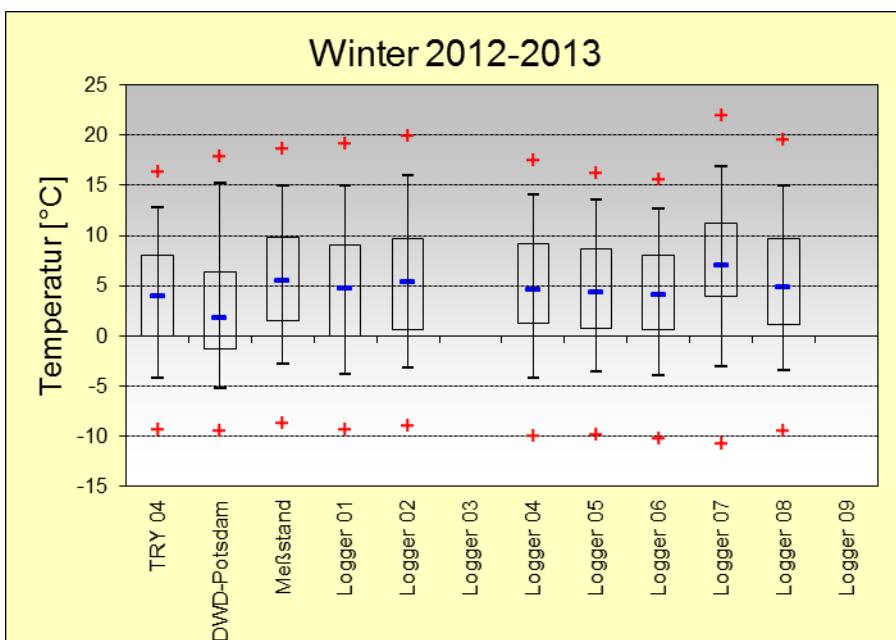
aH [g/m ³]	TRY 04	DWD-Potsdam	Meißstand	Logger 01	Logger 02	Logger 03	Logger 04	Logger 05	Logger 06	Logger 07	Logger 08	Logger 09
Anzahl	148	148	116	147	147			147	147	147	147	
Minimum	5,0	6,3	1,0	4,7	4,7			4,6	4,7	3,7	4,7	
Maximum	17,2	16,4	18,2	17,2	17,9			17,4	17,2	16,0	17,5	
Mittelwert	10,5	10,6	11,2	10,3	10,6			10,3	10,3	9,7	10,3	
Median	10,4	10,4	11,1	10,1	10,4			10,1	10,1	9,8	10,1	



Winterperiode 2012 - 2013

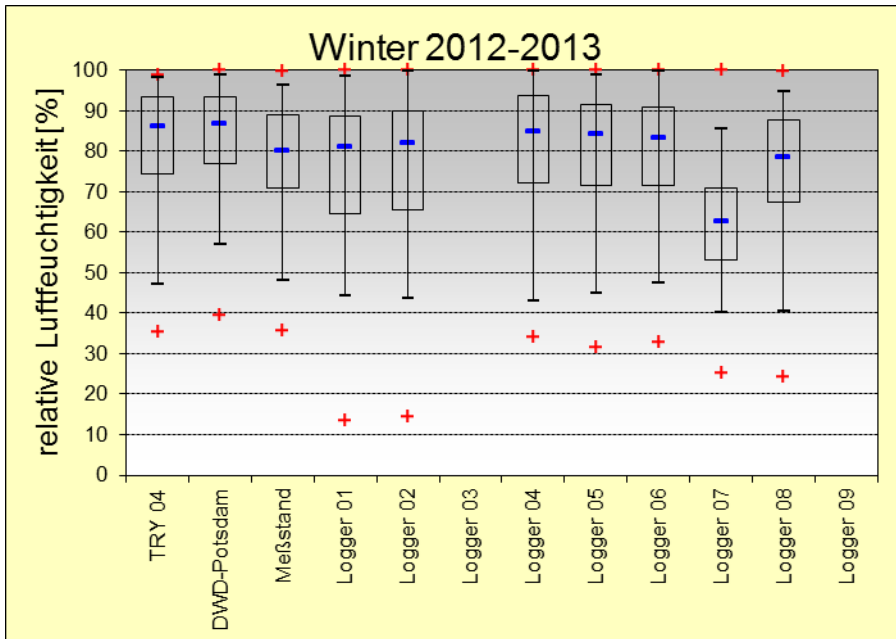
27.10.2012 bis 08.05.2013

T [°C]	TRY 04	DWD-Potsdam	Meßstand	Logger 01	Logger 02	Logger 03	Logger 04	Logger 05	Logger 06	Logger 07	Logger 08	Logger 09
Anzahl	194	194	192	193	193		193	193	193	193	193	
Minimum	-9,4	-9,5	-8,7	-9,4	-9,0		-10,0	-9,9	-10,2	-10,8	-9,5	
Maximum	16,3	17,8	18,6	19,2	19,9		17,5	16,2	15,6	21,9	19,5	
Mittelwert	4,2	2,8	5,7	5,0	5,6		5,0	4,6	4,2	7,2	5,6	
Median	3,9	1,8	5,4	4,7	5,3		4,5	4,4	4,1	7,0	4,9	



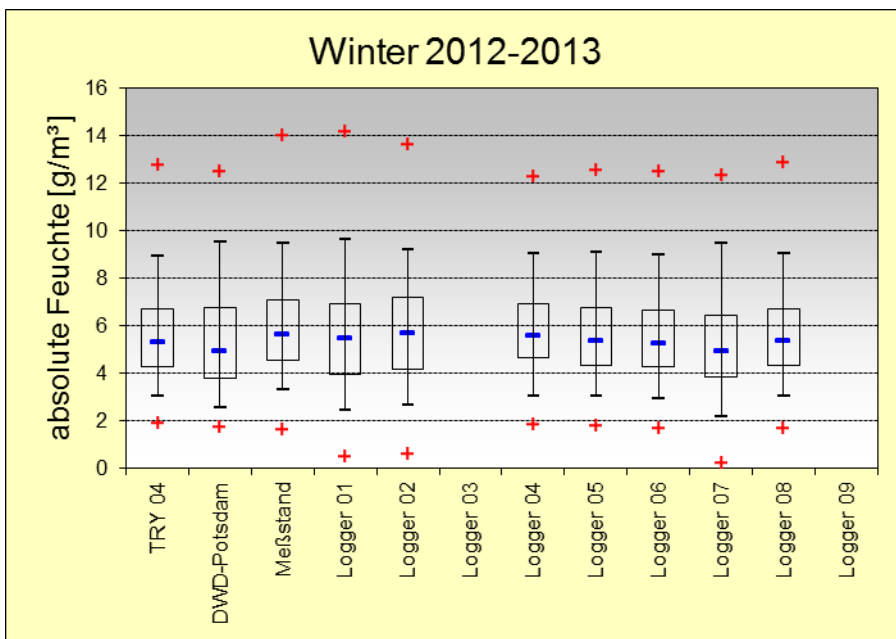
15.10.2011 bis 08.05.2012

rH [%]	TRY 04	DWD-Potsdam	Meßstand	Logger 01	Logger 02	Logger 03	Logger 04	Logger 05	Logger 06	Logger 07	Logger 08	Logger 09
Anzahl	206	206	179	206	206		206	206	206	206	206	
Minimum	35,4	49,4	24,2	31,4	26,4		27,9	29,6	32,3	29,4	21,6	
Maximum	99,0	99,9	100,0	100,0	99,6		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Mittelwert	82,2	81,3	71,9	78,2	77,3		81,0	81,7	81,6	67,0	74,7	
Median	86,2	84,0	74,1	80,9	79,9		84,3	85,7	85,0	66,4	77,1	



15.10.2011 bis 08.05.2012

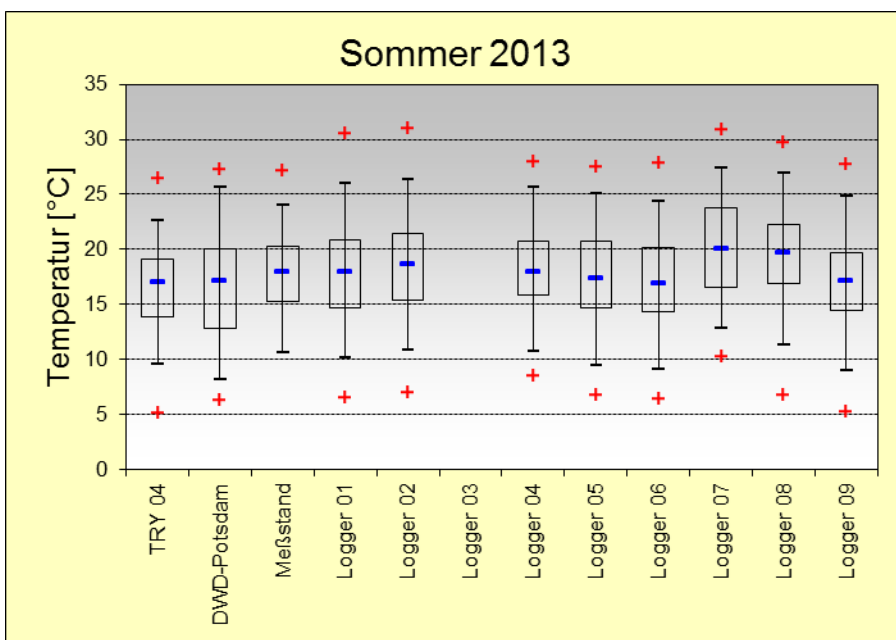
aH [g/m ³]	TRY 04	DWD-Potsdam	Meßstand	Logger 01	Logger 02	Logger 03	Logger 04	Logger 05	Logger 06	Logger 07	Logger 08	Logger 09
Anzahl	206	206	179	206	206		206	206	206	206	206	
Minimum	1,9	1,2	1,4	2,0	2,1		2,4	2,1	2,1	0,8	2,1	
Maximum	9,7	12,1	9,6	9,9	10,1		10,0	10,0	10,0	9,9	9,7	
Mittelwert	5,4	5,7	5,1	5,4	5,5		5,6	5,4	5,4	5,1	5,3	
Median	5,3	5,8	5,0	5,3	5,4		5,5	5,3	5,2	5,0	5,2	



Sommerperiode 2013

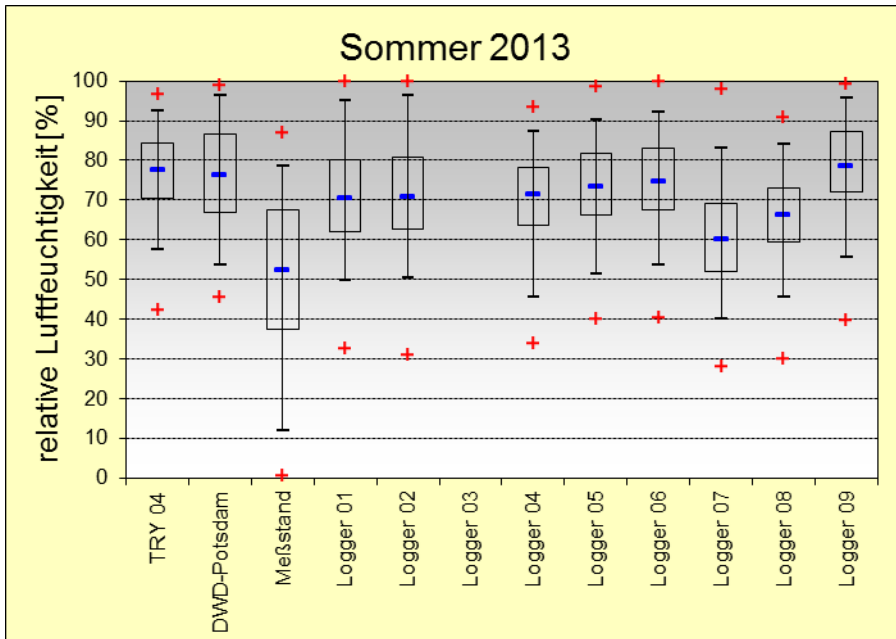
14.06.2013 bis 16.10.2013

T [°C]	TRY 04	DWD-Potsdam	Meßstand	Logger 01	Logger 02	Logger 03	Logger 04	Logger 05	Logger 06	Logger 07	Logger 08	Logger 09
Anzahl	125	125	125	124	125		125	125	125	125	125	125
Minimum	5,2	6,3	-2,0	6,6	7,0		8,5	6,8	6,4	10,3	6,7	5,2
Maximum	26,5	27,3	27,2	30,5	31,0		27,9	27,5	27,9	30,9	29,7	27,8
Mittelwert	16,6	16,7	17,6	18,0	18,7		18,1	17,5	17,0	20,1	19,4	17,1
Median	17,0	17,1	18,0	17,9	18,7		18,0	17,3	16,9	20,0	19,7	17,2



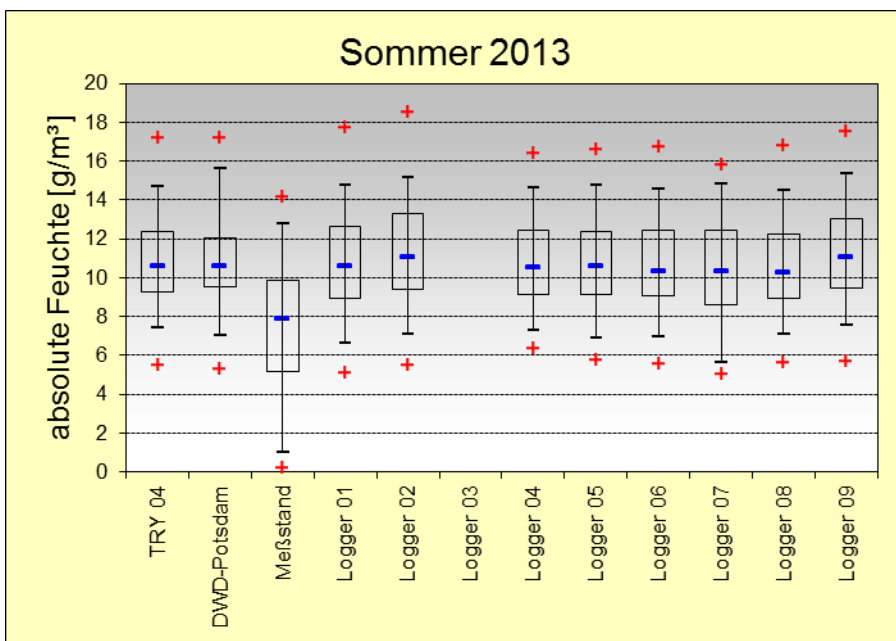
14.06.2013 bis 16.10.2013

rH [%]	TRY 04	DWD-Potsdam	Meßstand	Logger 01	Logger 02	Logger 03	Logger 04	Logger 05	Logger 06	Logger 07	Logger 08	Logger 09
Anzahl	125	125	83	124	125		125	125	125	125	125	125
Minimum	42,3	45,5	0,5	32,7	31,0		33,9	40,0	40,4	28,2	30,0	39,8
Maximum	96,7	98,9	87,0	100,0	100,0		93,3	98,5	100,0	98,1	90,9	99,3
Mittelwert	77,1	75,8	51,7	71,3	71,7		70,5	72,5	73,9	60,5	66,0	78,8
Median	77,6	76,2	52,4	70,4	70,6		71,4	73,3	74,5	60,1	66,2	78,4



14.06.2013 bis 16.10.2013

aH [g/m ³]	TRY 04	DWD-Potsdam	Meißstand	Logger 01	Logger 02	Logger 03	Logger 04	Logger 05	Logger 06	Logger 07	Logger 08	Logger 09
Anzahl	125	125	83	124	125		125	125	125	125	125	125
Minimum	5,5	5,3	0,2	5,1	5,5		6,3	5,8	5,6	5,0	5,6	5,7
Maximum	17,2	17,2	14,2	17,7	18,5		16,4	16,6	16,7	15,8	16,8	17,5
Mittelwert	10,8	10,8	7,4	10,7	11,2		10,7	10,7	10,6	10,5	10,6	11,2
Median	10,6	10,6	7,9	10,6	11,0		10,5	10,6	10,3	10,3	10,3	11,1



3.2.4. Standortbewertung

Die drei untersuchten TRY-Regionen sind unterschiedlich. Betrachtet man jedoch die für die Ultraschallmessungen relevante absolute Feuchte, sind die Unterschiede der Mittelwerte gering.

Die lokalen Standorte weisen dagegen größere Unterschiede auf, die nicht vernachlässigbar sind.

Standorte in Gebäuden, Ausstellungsräumen, Schlossräumen, Werkstätten und Depots sind nicht mit Außenstandorten vergleichbar und bedürfen individueller Klimamessungen zur konkreten Standortbeschreibung.

Skulpturen mit Außenexpositionen sind ebenfalls unterschiedlichen Bedingungen ausgesetzt, die sich jedoch nur schwer in deutlich voneinander abgrenzbare typische Standorte einteilen lassen. Betrachtet man die Bedingungen, die die Ultraschallmessungen beeinflussen, so treten zwar unterschiedliche Kombinationen der Temperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit auf, die sich aber nicht in deutlich unterschiedlichen absoluten Feuchten niederschlagen.

Sollen an diesen Außenexpositionen genaue Ultraschallmessungen erfolgen, sind standortspezifische Klimamessungen unumgänglich. Ansonsten muss man mit einem zusätzlichen Standortfehler rechnen.

3.3. Stelenmessungen

3.3.1. Untersuchungsziel

In den vergangenen Jahrzehnten wurden mehrere Skulpturen wiederholend gemessen. Dabei zeigten sich nicht selten Schwankungen der Ultraschallgeschwindigkeit, die mit jahreszeitlichen Klimaänderungen in Verbindung gebracht werden konnten. Die Schwankungen waren so groß, dass sie eine Vergleichbarkeit dieser Messungen kaum zuließen.

Da Ultraschalltransmissionsmessungen von homogenen Zuständen entlang des Schallweges ausgehen, wird auch vorausgesetzt, dass der Feuchtegehalt im Bereich des Schallweges konstant ist. Feuchtegradienten können so nicht erfasst werden. Änderungen der Gesamtfeuchte sollten sich jedoch durch eine Erhöhung der Schallgeschwindigkeit bemerk- und messbar machen.

Ursprünglich wurde davon ausgegangen, dass sich diese Feuchteveränderungen besonders in den Unterschieden der Ultraschallgeschwindigkeiten zwischen Messungen vor der winterlichen Einhausung und danach nachweisen lassen. Die Annahme war, dass sich das Feuchteniveau im Marmor in der Winterperiode erhöht und nach der Aushausung im Frühjahr durch eine Ultraschallgeschwindigkeitserhöhung gegenüber den Herbstmessungen messbar sein sollte.

3.3.2. Dichterstelen

Die dafür notwendigen Untersuchungen erfolgten an einer Gruppe von acht Marmorstelen aus Carrara Marmor, die seit der Mitte des 19. Jahrhunderts westlich des Schlosses Charlottenhof im Park Sanssouci stehen.



Dichterstelen am Schloss Charlottenhof
(Foto: I.Köhler)



Im Vordergrund die Stelen des „Wieland“ (links) und des „Herder“ (rechts)
(Foto: I.Köhler)

3.3.3. Untersuchungsprogramm

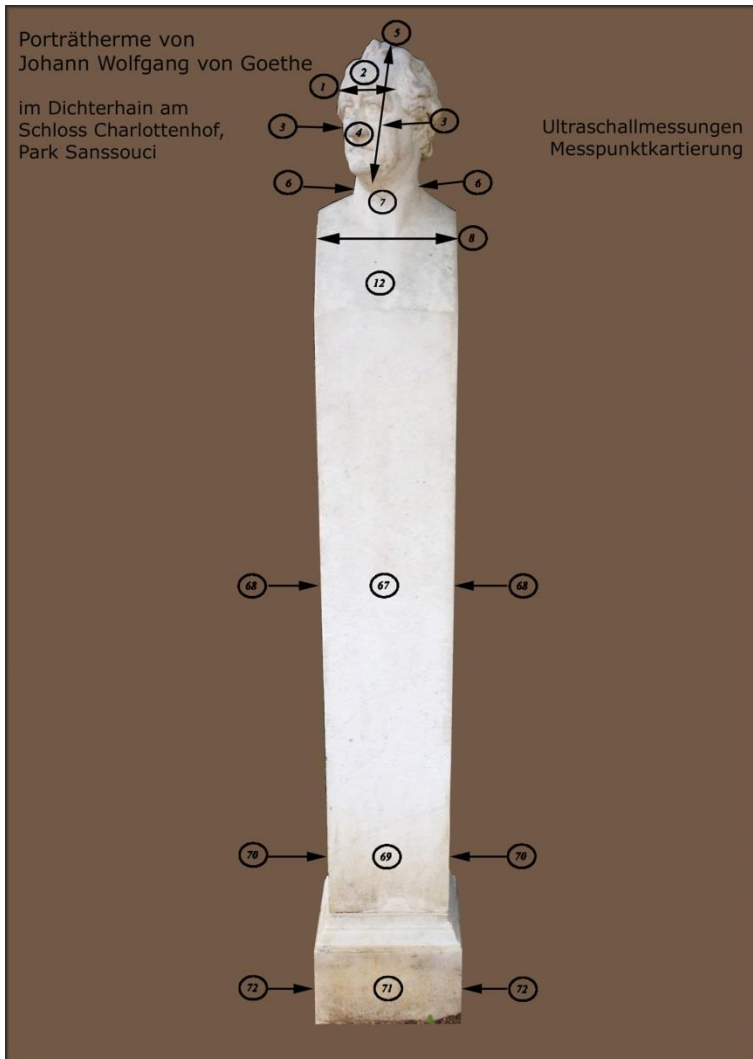
Die erste Messung an allen acht Stelen erfolgte unmittelbar vor der herbstlichen Einhausung im Oktober 2011.

Bei den ersten Wiederholungsmessungen unmittelbar nach der Aushausung im März 2012 wurden, entgegen den Erwartungen, stark reduzierte Ultraschallgeschwindigkeiten gemessen. Daraufhin wurde das Untersuchungsprogramm geändert und erweitert. Geplant waren nun möglichst viele Messungen zu möglichst unterschiedlichen Jahreszeiten über wenigstens zwei Jahre hinweg.

Es wurden an allen acht Stelen identische Messpunkte genau eingemessen, kartiert und wiederholend gemessen.



Ultraschallmessungen an der Stele des „Dante“
(Foto: W.Köhler)



Kartierung der Messungen an der Stele des „Goethe“
(Kartierung: I.Köhler)

Die Messungen wurden mit Feuchtemessungen begleitet. Dabei fand ein kapazitives Messsystem, die Gann-Hydromette, Verwendung, das relative Feuchtemesswerte auf einer Skala von 0 ... 100 liefert. Null ist dabei „trocken“ und einhundert „sehr feucht“.



Gann-Hydromette



Feuchtigkeitsmessungen mit der Gann-Hydromette an der Stele des „Dante“
(Foto: W.Köhler)

4 Dichterhain vor Schloss Charlottenhof im Park Sanssouci 4 Goethe
2013 im Mai

Korrektur	Richtg.	Mefstr.	unk.LZ.	Geschw.	Bemerk.
1,00 µs		cm	µs	m/s	
1 Stirn	re - li	12,0	37,2	3315	
2 Stirn	vo - hi	20,5	76,8	2704	
3 Wangen	re - li	14,2	50,0	2898	
4 Nase	re - li	2,4	10,9	2424	
5 Kopf	ob - unt	27,1	100,0	2737	
6 Hals	re - li	13,6	38,6	3617	
7 Hals	vo - hi	15,1	43,2	3578	
8 Schultern	re - li	29,5	86,4	3454	
12 Brust mitte	vo - hi	23,7	54,0	4472	
67 Stele mitte	re - li	28,8	67,2	4350	100cm von unten
68 Stele mitte	vo - hi	25,8	65,2	4019	100cm von unten
69 Stele unten	re - li	28,0	72,8	3900	40cm von unten
70 Stele unten	vo - hi	24,5	65,6	3793	40cm von unten
71 Basis	re - li	34,5	62,4	5619	10cm von unten
72 Basis	vo - hi	30,5	54,4	5712	10cm von unten
73					
74					
75					

Anzahl:	15	Büste	Stele
Minimum:	2424	2424	3793
Mittelwert:	3773	3244	4565
Maximum:	5712	4472	5712

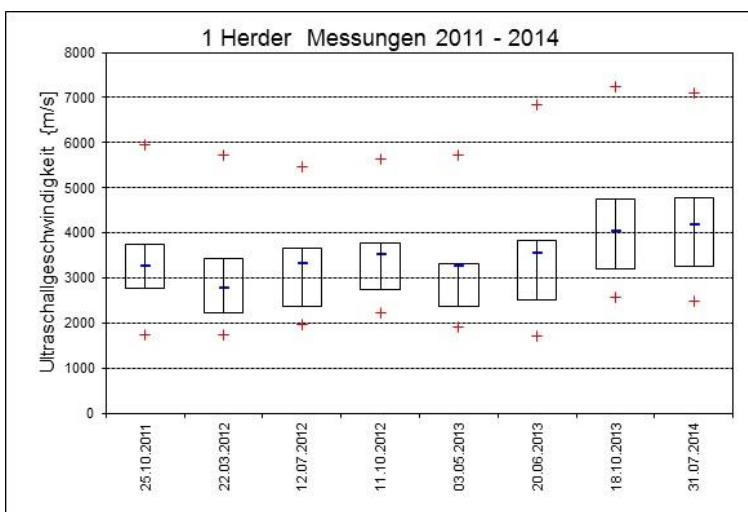
Carrara Marmor
 Gesamthöhe: 213,5 cm
 Messdatum: 03.05.2013 10:57
 Lufttemperatur: 23 °C
 relative Luftfeuchtigkeit: 41 %

Feuchte	Gann [-]					Fox [%]
	N	O	S	W	Mittel	
Brust	39	44	38	40	40,3	
Stele mitte	45	42	50	48	46,3	
Stele unten	48	47	45	44	46,0	
Basis	61	62	65	58	61,5	
Mittel	48,3	48,8	49,5	47,5	48,5	

Messprotokoll der Messungen an der Stele des „Goethe“

3.3.4. Messergebnisse

Insgesamt erfolgten von 2011 bis 2014 acht Messkampagnen. Als Beispiel hier die Messungen am „Herder“.



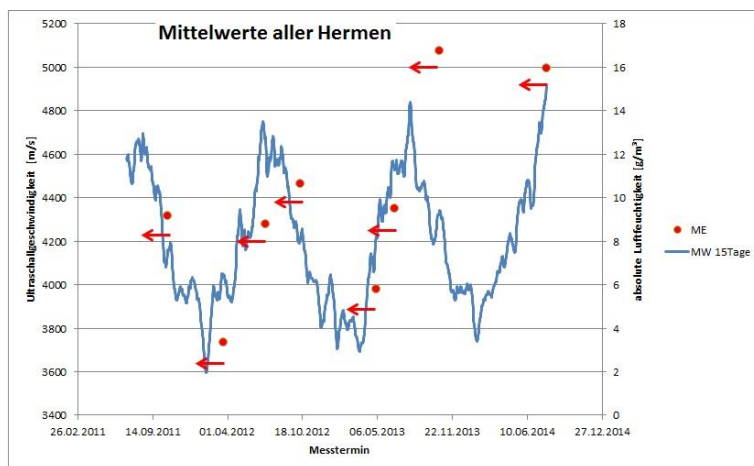
Box&Whisker-Diagramm der Wiederholungsmessungen an der Marmorstele des „Herder“

Um die Zusammenhänge zwischen den Klimabedingungen und den Ultraschallmessungen aufklären zu können, musste zunächst festgestellt werden, mit welchen Klimagrößen eine Korrelation möglich ist.

Direkte Temperatureinflüsse können ausgeschlossen werden, da sie sich innerhalb von wenigen Stunden im Tag-Nacht-Rhythmus auf die Ultraschallergebnisse auswirken müssten. Gleiches trifft auf kurzfristige Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit zu. Beide Effekte wurden am Probekörper („Kleiner Stein“) untersucht. Die dabei beobachteten täglichen Schwankungen sind weitaus geringer als die an den Stelen gemessenen jahreszeitlichen Unterschiede der Ultraschallgeschwindigkeiten.

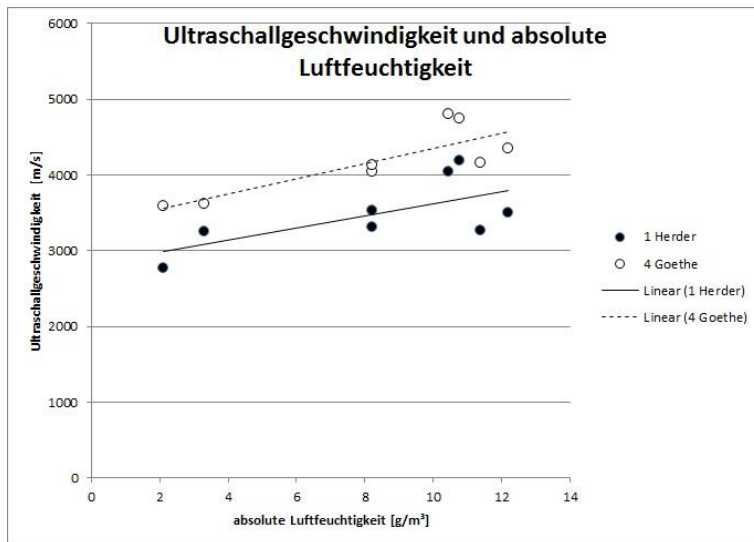
Im jahreszeitlichen Rhythmus der Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit sind die Werte im Winterhalbjahr höher als im Sommerhalbjahr, während die gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten im Winter deutlich niedriger als im Sommer sind. Betrachtet man jedoch die gleitenden 15tägigen Mittelwerte der absoluten Luftfeuchten, so folgen die Mediane der Ultraschallgeschwindigkeiten diesen mit einer mehrwöchigen Verzögerung.

Es wird davon ausgegangen, dass sich in diesem Zeitraum die absolute Feuchte im Porenraum des Marmors der mittleren absoluten Feuchte der Umgebung mit einer entsprechenden Verzögerung angleicht.



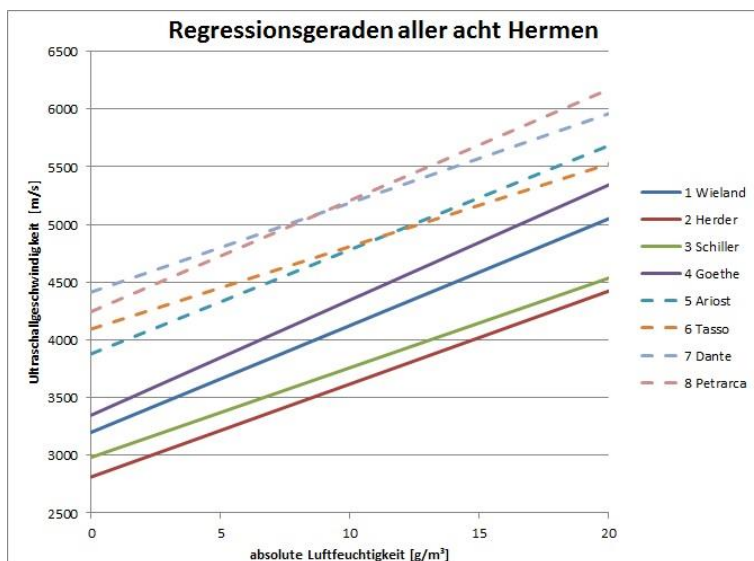
Zusammenhang zwischen Ultraschallgeschwindigkeit und absoluter Luftfeuchtigkeit mit Verzögerung (rote Pfeile) der Schallgeschwindigkeit gegenüber der absoluten Feuchte

Verbindet man nun die Mediane der Ultraschallmessungen der einzelnen Hermen mit den 7 Wochen zurückliegenden 15tägigen Mittelwerten der absoluten Luftfeuchten, so ergibt sich folgendes Bild:



Messungen des Zusammenhanges zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit und der absoluten Feuchte an den Hermen von „Herder“ und „Goethe“

Die Regressionsgeraden laufen nahezu parallel. Betrachtet man nun die Regressionsgeraden aller acht Hermen, so bestätigt sich dieser Eindruck.



Anstiege der Regressionsgeraden der Messungen der Ultraschallgeschwindigkeit und der absoluten Feuchte von allen acht Stelen

Bis auf zwei Geraden (Tasso und Dante), laufen alle anderen Geraden nahezu parallel. Gleichzeitig ist erkennbar, dass die Werte der deutschen Dichter deutlich unter denen der Italiener liegen. Tatsächlich wurden beide Gruppen von zwei unterschiedlichen Bildhauern gearbeitet. Die Deutschen wurden 1843 aufgestellt, während die italienischen Dichter erst 1851 folgten. Der Unterschied zwischen beiden Gruppen ist daher sicher in unterschiedlichen Marmorqualitäten zu suchen.

Die nahezu parallel verlaufenden Regressionsgeraden lassen den Schluss zu, dass sich die Zunahme der absoluten Luftfeuchtigkeit gleichermaßen erhöhend

auf die Ultraschallgeschwindigkeit des Marmors auswirkt, unabhängig von seinem Erhaltungszustand.

Für den praktischen Messeinsatz wird eine einfache Regressionsformel vorgeschlagen, der der Mittelwert der sechs vergleichbaren Dichterstellen zugrunde liegt.

$$v_{PM} = v_{PM} + a_{VP} * (d_{11} - d_M) \quad v_{PM} - \text{gemessene Ultraschallgeschwindigkeit in m/s}$$

$$v_{Po} = v_{PM} - a_{VP} * d_M \quad v_{Po} - \text{wasserfreie Ultraschallgeschwindigkeit in m/s}$$

a_{VP} – feuchtbedingter Anstieg der Ultraschallgeschwindigkeit in $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{g}$ (hier: $89,5 \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{g}$)

d_M – absolute Feuchte zum Messzeitpunkt in g/m^3 (hier: 15tägiger Mittelwert, 7 Wochen vor Messung)

d_{11} – absolute Feuchte der Vergleichsbedingungen in g/m^3 (hier: $11,0 \text{g}/\text{m}^3$ bei $T=17,0^\circ\text{C}$; $rH=75\%$)

Dabei sind die Referenzbedingungen für d_{11} so gewählt, dass sie den sommerlichen Klimabedingungen sehr nahe kommen. Gleichzeitig lassen sich Proben in Exsikkatoren bei 75% relativer Luftfeuchtigkeit über einer gesättigten Kochsalzlösung sehr einfach konditionieren, so dass Vergleichsmessungen bei 17°C durchgeführt werden können. Darüber hinaus wurden die bisher verwendeten Zustandsbeurteilungskriterien für fein- und mittelkristalline Marmore ebenfalls für mittlere relative Luftfeuchten von 75% erstellt, was deren Korrektur dadurch nicht notwendig macht.

Dadurch war nun ein Zusammenhang zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit und den Klimabedingungen gefunden, der es möglich macht, alle Messungen auf einheitliche Messbedingungen zu normieren und miteinander zu vergleichen.

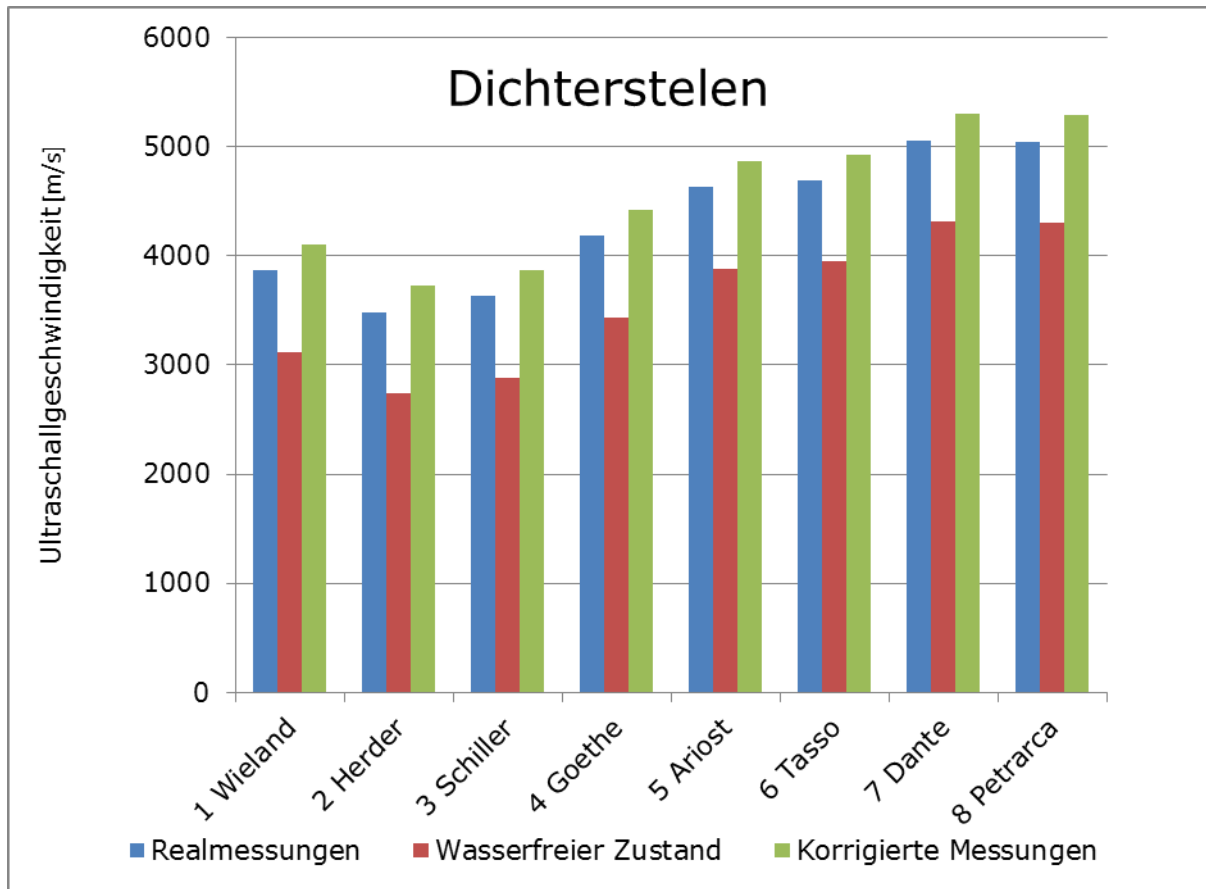
Für die Messungen an den acht Dichterstellen können nun die Ultraschallgeschwindigkeiten für den wasserfreien Zustand des Marmors und den 75%-Vergleichswert berechnet werden.

Messtag	absolute Feuchte [g/m ³]	Mediane der gemessenen Ultraschallgeschwindigkeit [m/s]							
		1 Wieland	2 Herder	3 Schiller	4 Goethe	5 Ariost	6 Tasso	7 Dante	8 Petrarca
25.10.2011	11,37	4039	3269	3532	4153	4479	4639	5103	5072
22.03.2012	2,11	3096	2774	3172	3589	3879	4052	4292	4150
12.07.2012	8,21	3708	3316	3406	4037	4519	4553	4786	4676
11.10.2012	12,2	3939	3504	3544	4355	4655	4569	4959	5024
03.05.2013	3,29	3634	3246	3242	3617	4326	4480	4918	4924
20.06.2013	8,22	3744	3533	3365	4125	4571	4682	5221	5000
18.10.2013	10,45	4534	4041	4389	4811	5456	5336	5748	5799
31.07.2014	10,77	4204	4188	4381	4748	5162	5212	5440	5736
Minimum [m/s]		3096	2774	3172	3589	3879	4052	4292	4150
Mittelwert [m/s]		3862	3484	3629	4179	4631	4690	5058	5048
Maximum [m/s]		4534	4188	4389	4811	5456	5336	5748	5799
Minimalabweichung [m/s]	-898	-766	-710	-457	-590	-752	-638	-766	-898
Maximalabweichung [m/s]	825	672	704	760	632	825	646	690	751
Minimalabweichung [%]	-20,4	-19,8	-20,4	-12,6	-14,1	-16,2	-13,6	-15,2	-17,8
Maximalabweichung [%]	20,9	17,4	20,2	20,9	15,1	17,8	13,8	13,6	14,9

Messtag	absolute Feuchte [g/m ³]	Rückrechnung der wasserfreien Ultraschallgeschwindigkeit [m/s] mit 89,5 m ³ /s*g							
		1 Wieland	2 Herder	3 Schiller	4 Goethe	5 Ariost	6 Tasso	7 Dante	8 Petrarca
25.10.2011	11,37	3021	2251	2514	3135	3461	3621	4085	4054
22.03.2012	2,11	2907	2585	2983	3400	3690	3863	4103	3961
12.07.2012	8,21	2973	2581	2671	3302	3784	3818	4051	3941
11.10.2012	12,2	2847	2412	2452	3263	3563	3477	3867	3932
03.05.2013	3,29	3340	2952	2948	3323	4032	4186	4624	4630
20.06.2013	8,22	3008	2797	2629	3389	3835	3946	4485	4264
18.10.2013	10,45	3599	3106	3454	3876	4521	4401	4813	4864
31.07.2014	10,77	3240	3224	3417	3784	4198	4248	4476	4772
Minimum [m/s]		2847	2251	2452	3135	3461	3477	3867	3932
Mittelwert [m/s]		3117	2739	2884	3434	3886	3945	4313	4302
Maximum [m/s]		3599	3224	3454	3876	4521	4401	4813	4864
Minimalabweichung [m/s]	-487	-270	-487	-431	-299	-424	-468	-446	-370
Maximalabweichung [m/s]	635	482	486	570	442	635	456	500	561
Minimalabweichung [%]	-17,8	-8,7	-17,8	-15,0	-8,7	-10,9	-11,9	-10,3	-8,6
Maximalabweichung [%]	19,8	15,5	17,7	19,8	12,9	16,3	11,6	11,6	13,0

Messtag	absolute Feuchte [g/m ³]	Berechnung der Ultraschallgeschwindigkeit [m/s] mit 11,0 g/m ³							
		1 Wieland	2 Herder	3 Schiller	4 Goethe	5 Ariost	6 Tasso	7 Dante	8 Petrarca
25.10.2011	11,37	4006	3236	3499	4120	4446	4606	5070	5039
22.03.2012	2,11	3892	3570	3968	4385	4675	4848	5088	4946
12.07.2012	8,21	3958	3566	3656	4287	4769	4803	5036	4926
11.10.2012	12,2	3832	3397	3437	4248	4548	4462	4852	4917
03.05.2013	3,29	4324	3936	3932	4307	5016	5170	5608	5614
20.06.2013	8,22	3993	3782	3614	4374	4820	4931	5470	5249
18.10.2013	10,45	4583	4090	4438	4860	5505	5385	5797	5848
31.07.2014	10,77	4225	4209	4402	4769	5183	5233	5461	5757
Minimum [m/s]		3832	3236	3437	4120	4446	4462	4852	4917
Mittelwert [m/s]		4101	3723	3868	4419	4870	4930	5298	5287
Maximum [m/s]		4583	4209	4438	4860	5505	5385	5797	5848
Minimalabweichung [m/s]	-487	-270	-487	-431	-299	-424	-468	-446	-370
Maximalabweichung [m/s]	635	482	486	570	442	635	456	500	561
Minimalabweichung [%]	-13,1	-6,6	-13,1	-11,2	-6,8	-8,7	-9,5	-8,4	-7,0
Maximalabweichung [%]	14,7	11,7	13,0	14,7	10,0	13,0	9,2	9,4	10,6

Zusammenfassend ergibt sich folgendes Bild:



Die korrigierten Werte der „deutschen Dichter“ liegen um 4000m/s und die Werte der „italienischen Dichter“ um 5000m/s und unterscheiden sich also signifikant voneinander.

3.4. Objektmessungen

3.4.1. Fontänenrondell in Sanssouci

3.4.1.1. Götterskulpturen

Die um das Fontänenrondell aufgestellten 12 Marmorfiguren sind Werke französischer Bildhauer. Davon kamen die von Jean Baptiste Pigalle 1748 geschaffenen Skulpturen "Venus" und "Merkur" 1750 als Geschenk des französischen Königs Ludwigs XI. in den Park von Sanssouci. Er revanchierte sich damit für die zuvor erhaltenen Pferde Friedrichs II.

Die allegorischen Gruppen "Luft" und "Wasser" schuf der Bildhauer Lambert Sigisbert Adam; sie waren ursprünglich für den Park von Choisy bestimmt.

Sein jüngerer Bruder Francois Gaspard Balthasar Adam, der 1747 nach Berlin berufen wurde, vervollständigte das Programm durch die Skulpturen "Erde" und "Feuer" sowie die sechs anderen Figuren griechischer Götter. Die letzte Statue, "Mars", wurde von dessen Neffen, Sigisbert Francois Michel, 1764 fertiggestellt.

Die Originalskulpturen "Venus" und "Merkur" wurden ins Bodemuseum nach Berlin überführt, standen zeitweilig in der Nationalgalerie, und befinden sich jetzt wieder im Bodemuseum am ursprünglichen Platz. Im Park von Sanssouci stehen Kopien.



Großes Fontänen Rondell

Der schlechte Erhaltungszustand der Skulpturen ließ ein weiteres Verbleiben der Originalfiguren an ihrem Standort nicht mehr zu. Daher entschloss man sich,

diese zu kopieren, die Kopien am Rondell aufzustellen und die Originale in das Depot zu verbringen.

Die dafür notwendigen Rohblöcke wurden in Carrara ausgesucht und mit Ultraschall vermessen, ehe sie nach Potsdam kamen.

Die Kopien wurden von mehreren deutschen Bildhauern von 1998 bis 2011 ausgeführt.

3.4.1.2. Untersuchungsprogramm

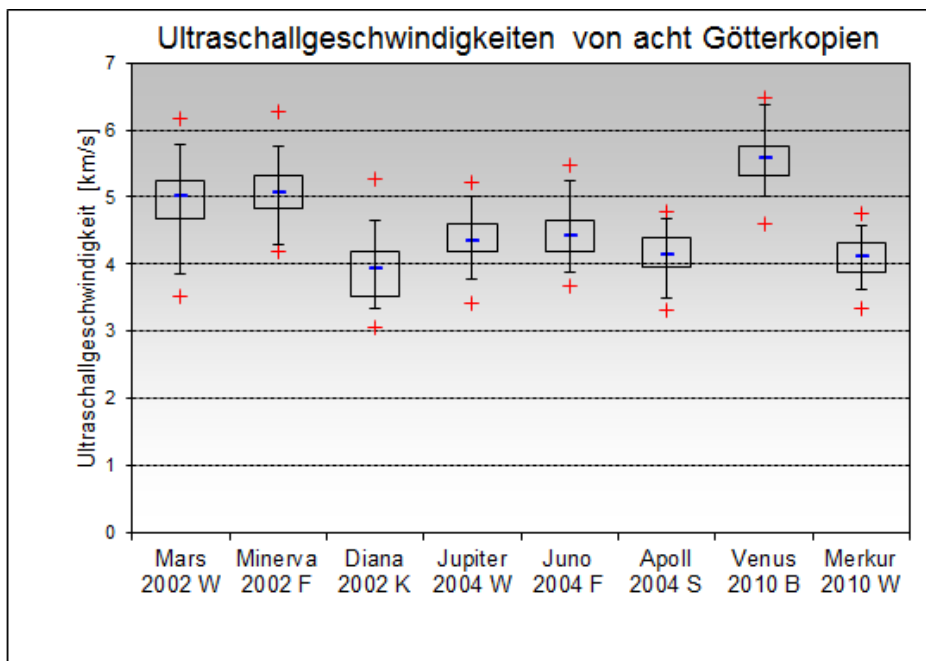
Es war vorgesehen, alle Rondellskulpturen einmalig mit Ultraschall zu vermessen, um den Ausgangszustand für ein künftiges Langzeitmonitoring festzustellen.

Das Ultraschalluntersuchungsprogramm bezog sich auf repräsentative und gut kartierbare Messpunkte, die auch bei späteren Wiederholungsmessungen wiederzufinden sein werden.

Bisher konnten die acht Götterfiguren vermessen werden.

3.4.1.3. Untersuchungsergebnisse

Zusammengefasst ergaben sich folgende Ergebnisse:



Ultraschallgeschwindigkeiten der acht Marmorkopien von 2002 bis 2010 durch sechs Kopisten

Auffällig sind die starken Unterschiede der mittleren Ultraschallgeschwindigkeiten der einzelnen Skulpturen. Besonders dann, wenn man bedenkt, dass teilweise zwei Kopien aus einem gemeinsamen Rohblock von zwei unterschiedlichen

Kopisten geschaffen wurden, die sich danach gravierend in ihren Ultraschallgeschwindigkeiten unterscheiden.

Es ist naheliegend, dass die Ursachen dieser Unterschiede in kopiertechnischen Unterschieden der einzelnen Kopisten zu suchen sind.

3.4.2. Vergleichsmessungen

3.4.2.1. München-Nymphenburg - Vergleichsmessungen

In den vergangenen Jahren wurden einmalig oder wiederholend an zahlreichen Marmorskulpturen von unterschiedlichen Laboren und Instituten Ultraschallmessungen durchgeführt. Damit ergibt sich zwangsläufig die Frage nach der Vergleichbarkeit dieser Untersuchungen, besonders in Bezug auf die Nutzung dieses Datenmaterials für ein Langzeitmonitoring der sehr umwelt- und klimasensiblen Objektgruppe der Parkskulpturen aus Marmor.

Neben den Skulpturen im Park von Potsdam-Sanssouci sind es besonders die Figuren im Park von München-Nymphenburg, die schon seit den 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts wiederholt und von unterschiedlichen Laboren untersucht wurden. Daher war es sinnvoll, an diesem Skulpturenensemble zu testen, ob unterschiedliche Labors bei zeitgleichen Parallelmessungen zu vergleichbaren Ergebnissen kommen.

An dem Arbeitstreffen in München-Nymphenburg am 22.Mai 2012 nahmen 17 Restauratoren und Naturwissenschaftler teil.

Prof. Rolf Snethlage (Bamberg)
Dr. Horst Schuh (München)
Dr. Ludwig Sattler (München)
Dr. Eberhard Wendler (München)
Prof. Gottfried Hauff (Potsdam)
Prof. Stefan Simon (Berlin)
Dipl.-Rest. Kathrin Lange (Potsdam)
Ing. Rolf Krompholz (Pirna)
Dipl.-Geol. Michael Krempler (Berlin)

Stud.-Rest. Sandra Damianowic (Potsdam)
Dipl.-Mus. Irene Köhler (Potsdam)
Dipl.-Phys. Wolfram Köhler
Dr. Michael Auras (Mainz)
Stud.-Rest. Anne Krugmann (Mainz)
Dr. Judit Zöldföldi (Stuttgart)
Dr. Rupert Utz (Bamberg)
Dipl.-Rest Klaus Häfner (München)



Ultraschallmessungen und Diskussion im Mai 2012 in München-Nymphenburg
(Foto: Rolf Krompholz 2012)

Es wurden vier Marmorskulpturen am Beginn der Hauptachse ausgewählt, die aus unterschiedlichen Marmoren gearbeitet sind, eine unterschiedliche Erhaltungsgeschichte aufweisen und seit dem Anfang der 90iger Jahre des 20. Jahrhunderts von unterschiedlichen Laboren wiederholt mit Ultraschall untersucht wurden.

Skulptur	Jahr	Bildhauer	Marmor	Massnahmen	Untersuchungen
Merkur	1778	Boos	Laaser		1991, 2001
Kybele	1765	Marchiori	Carrara	Reinigung und Wachsen	1993, 2004
Saturn	1765	Marchiori	Carrara	Acrylharzvolltränkung	1993, 1997, 2004, 2010
Diana	1785	Boos	Laaser	Acrylharzvolltränkung	1991, 1997, 2001

Ziel dieses Arbeitstreffens war es, neben dem Problem der quantitativen Gefügebeurteilung mittels Ultraschalluntersuchungen, auch die Fragen der qualitativen restauratorischen Zustandsbeurteilung der Marmorskulpturen und der quantitativen Beurteilung des Oberflächenzustandes der Figuren zu diskutieren.

Diese drei Beurteilungen sollen die Basis für den zu erarbeitenden Leitfaden für Ultraschallmessungen an Marmorskulpturen bilden.

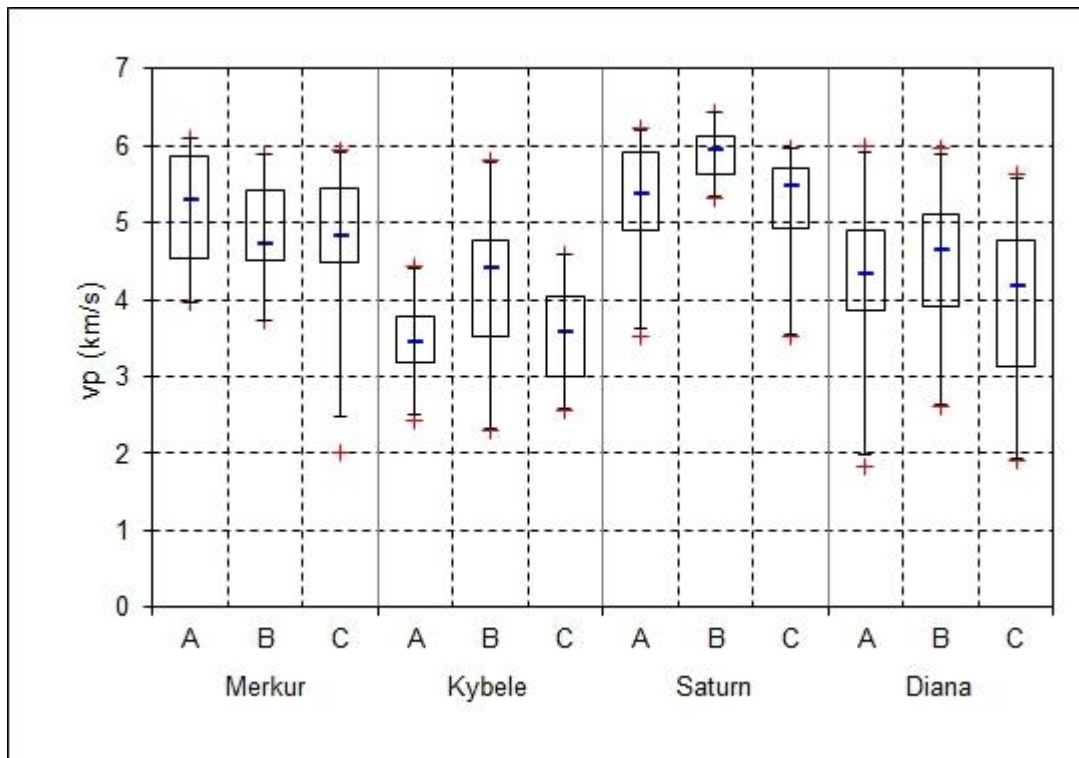


Untersuchte Marmorskulpturen in der Hauptachse im Park von München-Nymphenburg; von vorn nach hinten: Merkur, Kybele, Saturn, Diana (Foto: Horst Schuh 2012)

Das Untersuchungsprogramm war auf die Hauptaufgabenstellung, die vergleichenden Messungen unterschiedlicher Messteams, ausgerichtet. D.h., Aussagen zum langfristigen Verwitterungsverhalten der Skulpturen (Monitoring) waren nicht vordergründiges Ziel dieser Messungen. Die Messpunkte sollten reproduzierbar gemessen werden können und alle vier Messteams sollten in der Lage sein, in der zur Verfügung stehenden Zeit, in der die klimatischen Bedingungen vergleichsweise stabil waren, alle vier Skulpturen zu untersuchen.

Das Messprogramm umfasste 24 Messpunkte, die mit messtechnischen Informationen ergänzt wurden. Messpunkte, die an einzelnen Skulpturen nicht vorhanden oder unzugänglich waren, wurden weggelassen, so dass pro Skulptur zwischen 20 und 24 Messungen durchführbar waren.

Betrachtet man die Abweichungen der gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten von den Mittelwerten der Messungen der drei Teams an den einzelnen Messpunkten, so zeigen sich ebenfalls erhebliche Unterschiede.



Vergleich der Messungen der drei Messteams

Die Messergebnisse wichen stark voneinander ab.

		Abweichung vom Mittelwert in %		
		Messteam		
Skulptur		A	B	C
Merkur	Minimum	-18,3	-17,3	-24,6
	Mittelwert	-5,0	10,5	-4,0
	Maximum	12,5	32,4	17,1
	Median	-4,8	10,4	-3,0
Kybele	Minimum	-5,7	-15,1	-46,3
	Mittelwert	3,2	0,1	-3,2
	Maximum	26,8	24,0	16,2
	Median	2,2	0,1	-1,6
Saturn	Minimum	-20,0	-3,8	-32,3
	Mittelwert	-3,5	7,7	-3,3
	Maximum	16,2	17,1	20,0
	Median	-4,7	7,6	-0,6
Diana	Minimum	-40,3	-16,9	-49,9
	Mittelwert	2,0	5,3	-7,0
	Maximum	43,1	77,8	13,4
	Median	0,0	2,1	-1,0

Prozentuale Abweichungen der Ultraschallgeschwindigkeiten vom Mittelwert

Die Mittelwerte und Mediane weisen Abweichungen bis reichlich $\pm 10\%$ auf, was den bisher üblichen Genauigkeitsangaben entspricht und verbessert werden soll. Auffällig sind hier jedoch teamabhängige Unterschiede. Die Abweichungen

einzelner Messwerte erreichen nahezu $\pm 50\%$, was nur mit erheblichen kleinteiligen Materialinhomogenitäten erklärbar ist.

Wertet man die Ergebnisse entsprechend der im „Leitfaden Naturstein-Monitoring“, (Hrsg.: Michael Auras, Jeannine Meinhard, Rolf Snethlage, 2011) gegebenen Empfehlungen aus und stellt sie als Box&Whisker-Diagramm dar, sind die beschriebenen Unterschiede sichtbar.

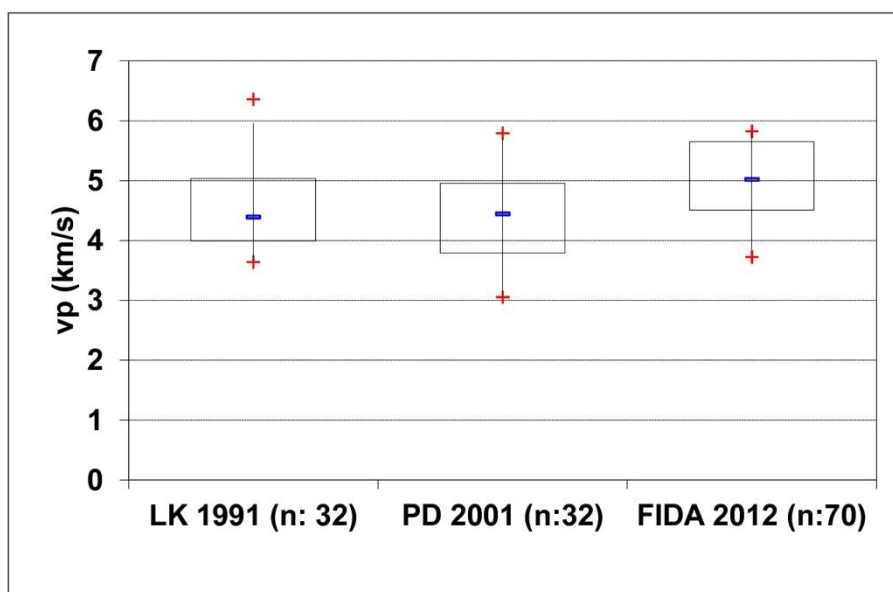
Bei allen Diagrammen sind auf der vertikalen Y-Achse die Ultraschallgeschwindigkeiten in km/s dargestellt.

Als Ergänzung zu diesen methodischen Vergleichsmessungen wurden durch Rolf Snethlage dankenswerter Weise in seinem Bericht „Schloss Nymphenburg München - Ultraschallmessungen an ausgewählten Parkfiguren - Vergleich der Messwerte 1991-2012“ die vorliegenden Langzeitmessungen seit 1991 ausgewertet und beurteilt.

Die folgenden Grafiken und Einzelbewertungen sind diesem Bericht wörtlich entnommen.

Merkur

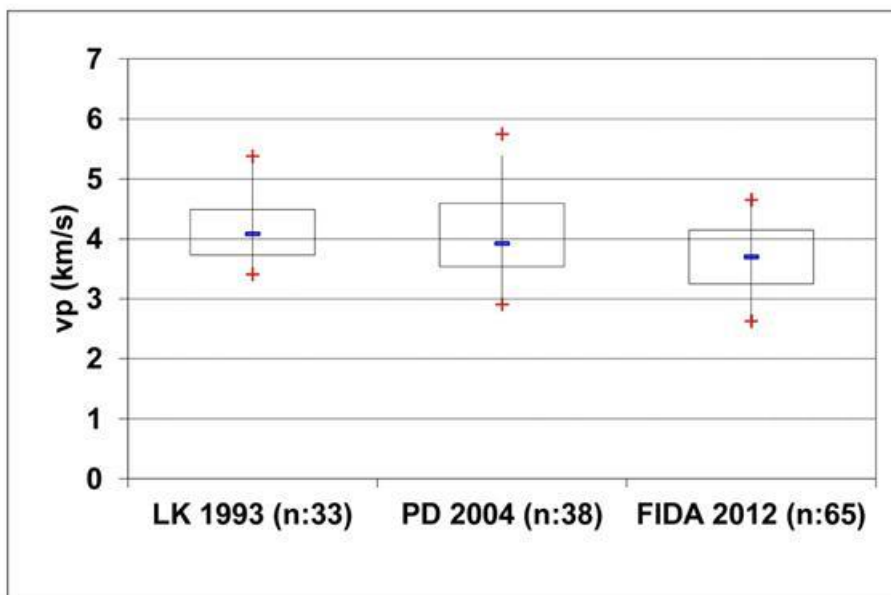
„Die Figur wurde dreimal gemessen: 1991 Labor Köhler, 2001 ProDenkmal, 2012 FIDA Gruppe. Die Messwerte liegen im Mittel bei ca 4,5 km/s. Erstaunlicher Weise übertreffen die Messwerte 2012 die der vorangegangenen Kampagnen. Das Mittel liegt um 0,5 km/s jetzt bei 5,0 km/s. Der Anstieg ist auf der Grundlage der vorhandenen Daten nicht zu klären. Die Spreizung der Messwerte hat sich kaum verändert. Der Zustand der Figur ist als gut zu bezeichnen.“



Langzeitmonitoring der Skulptur des „Mercur“

Kybele

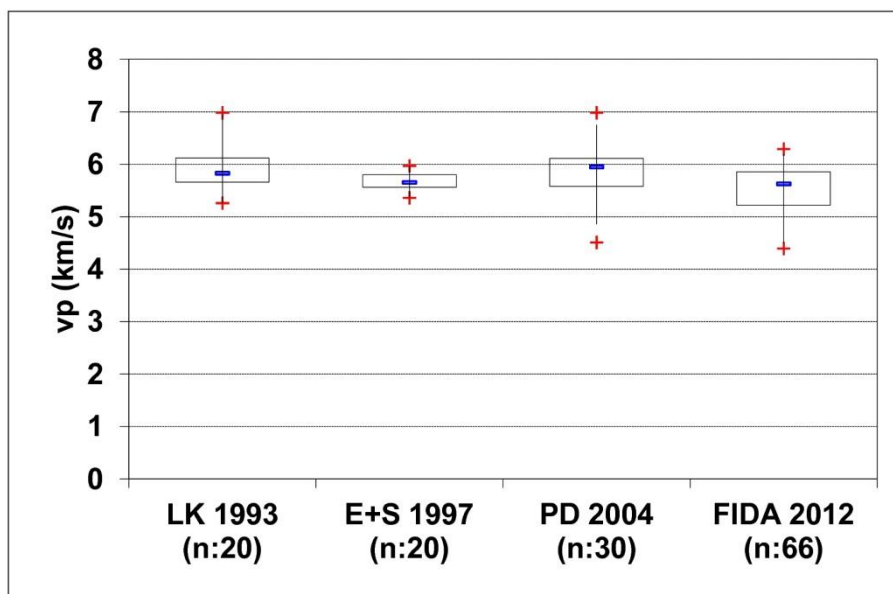
„Die Figur wurde drei Mal gemessen: 1993 Labor Köhler, 2004 ProDenkmal, 2012 FIDA Gruppe. Kybele weist die niedrigsten Ultraschallwerte der hier betrachteten Skulpturen auf. Seit 1993 ist eine stetige Abnahme der mittleren Schallgeschwindigkeit zu beobachten, die etwa 0,4 km/s beträgt. Die Verteilung der Messwerte ist annähernd gleich geblieben. Die Box mit der 50 % Perzentile ist praktisch gleich groß geblieben, ebenso wie die davon ausgehenden Maxima und Minima. Eine akute Gefährdung besteht derzeit nicht.“



Langzeitmonitoring der Skulptur der „Kybele“

Saturn

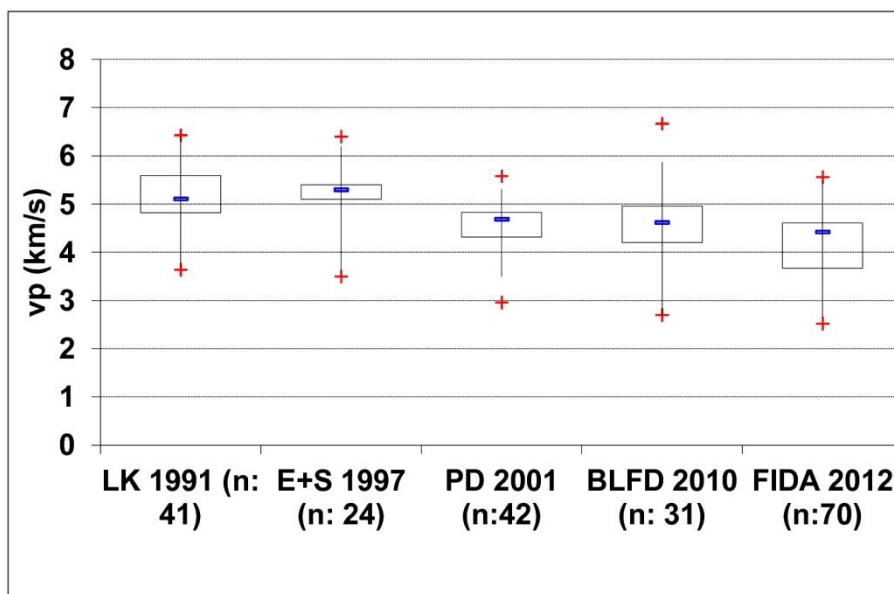
„Auch diese Figur wurde insgesamt vier Mal gemessen: 1993 Labor Köhler, 1997 Ettl & Schuh, 2001 ProDenkmal, 2012 FIDA Gruppe. Seit der letzten Messung ist eine leichte Abnahme des Mittelwerts um 0,25 km/s festzustellen. Die Spreizung der Messwerte hat sich etwas verändert. Die Box mit der 50 % Perzentile ist im Vergleich mit den ersten beiden Messungen etwa um das Doppelte gewachsen, hat seit 2001 aber nicht mehr stark zugenommen. Der Mittelwert liegt jetzt bei sehr guten 5,6 km/s. Auch der Minimalwert ist mit 4,3 km/s noch sehr gut. Die Figur ist nicht gefährdet.“



Langzeitmonitoring der Skulptur des „Saturn“

Diana

„Die Figur wurde fünfmal gemessen: 1991 Labor Köhler, 1997 Ettl & Schuh, 2001 ProDenkmal, 2010 BLFD, 2012 FIDA Gruppe. Die Figur wurde 1988 mit AVT behandelt. Sie besteht aus Sterzinger Marmor. Auffällig ist der Abfall des Mittelwerts der Ultraschallgeschwindigkeit von über 5 km/s im Jahr 1991 auf 4,5 km/s im Jahr 2012. Der Abfall ist seit 1997 stetig. Auch hat die Spreizung der Messwerte von 2001 bis 2012 deutlich zugenommen. Die Spreizung liegt zwischen dem Maximum um 5,5 km/s und dem Minimum bei 2,5 km/s. Besonders der letzte Wert ist für eine AVT behandelte Figur sehr niedrig. Eine Erklärung könnte darin zu suchen sein, dass an der Figur zahlreiche Risse im Vorfeld der AVT mit Kunstharzfüllungen versorgt wurden, die sich inzwischen gelöst haben, weil ihre Haftung nachgelassen hat und sich die Risse wieder geöffnet haben. Auch besteht die Figur aus dem grobkörnigen Sterzinger (Laaser ?, d.A.) Marmor, dessen Verhalten gegenüber der AVT vielleicht ungünstiger ist. Die Figur muss wegen ihrer Risse intensiv untersucht und weiterhin sorgfältig beobachtet werden.“



Langzeitmonitoring der Skulptur der „Diana“

Schlussfolgerungen

Die Vergleichsmessungen an vier Marmorskulpturen im Mai 2012 in München-Nymphenburg haben interessante Erkenntnisse zur Durchführung und Bewertung von Ultraschallmessungen an Marmorskulpturen erbracht.

Die gewählte Vorgehensweise erlaubte den Vergleich der einzelnen Messungen untereinander und zeigte, dass es sinnvoll und notwendig ist, eine Messvorschrift für Ultraschallmessungen an Marmorskulpturen für unterschiedliche Zielstellungen, in Anknüpfung und Ergänzung des o.g. „Leitfaden Naturstein-Monitoring“ zu erarbeiten und so die Aussagekraft dieser Messmethode weiter zu verbessern.

Rolf Snethlage ergänzt dies in seinen o.g. Bericht mit folgenden Worten:

„Die Messkampagne hat die Abfolge der Ultraschallmessungen um eine weitere wertvolle Datenreihe erweitert. Die Figuren Hermes und Saturn sind nach wie vor in sehr gutem Zustand. Die Figuren Kybele und vor allem Diana weisen Mängel auf. Diana muss hinsichtlich der Risse, welche schon vor der AVT bestanden haben, eingehend untersucht werden. Extrem kritische Stellen zum Beispiel an Handgelenken oder Fingern wurden nicht gefunden.“

3.4.2.2. Potsdam-Sanssouci - Bewertungskriterien

Im Mai 2013 wurden die Objektuntersuchungen in Potsdam-Sanssouci fortgesetzt.

An diesem Arbeitstreffen nahmen 17 Kollegen teil.

Prof. Rolf Snethlage (Bamberg)
 Dr. Horst Schuh (München)
 Dr. Eberhard Wendler (München)
 Prof. Gottfried Hauff (Potsdam)
 Prof. Stefan Simon (Berlin)
 Dipl.-Ing. Simon Kunz (Berlin)
 Dipl.-Rest. Kathrin Lange (Potsdam)
 Ing. Rolf Krompholz (Pirna)
 Dipl.-Geol. Michael Krempler (Berlin)

Stud.-Rest. Sandra Damianowic (Potsdam)
 Dipl.-Mus. Irene Köhler (Potsdam)
 Dipl.-Phys. Wolfram Köhler
 Dr. Michael Auras (Mainz)
 Dipl.-Ing. Evelyn Hanebütte (Mainz)
 Dr. Judit Zöldföldi (Stuttgart)
 Dr. Wolfgang Weinhold (Würzburg)
 Dipl.-Rest Klaus Häfner (München)



Fortuna und Satyr Antikenkopien aus der 2.Hälfte des 19.Jahrhunderts im Halbrondell am Neuen Palais

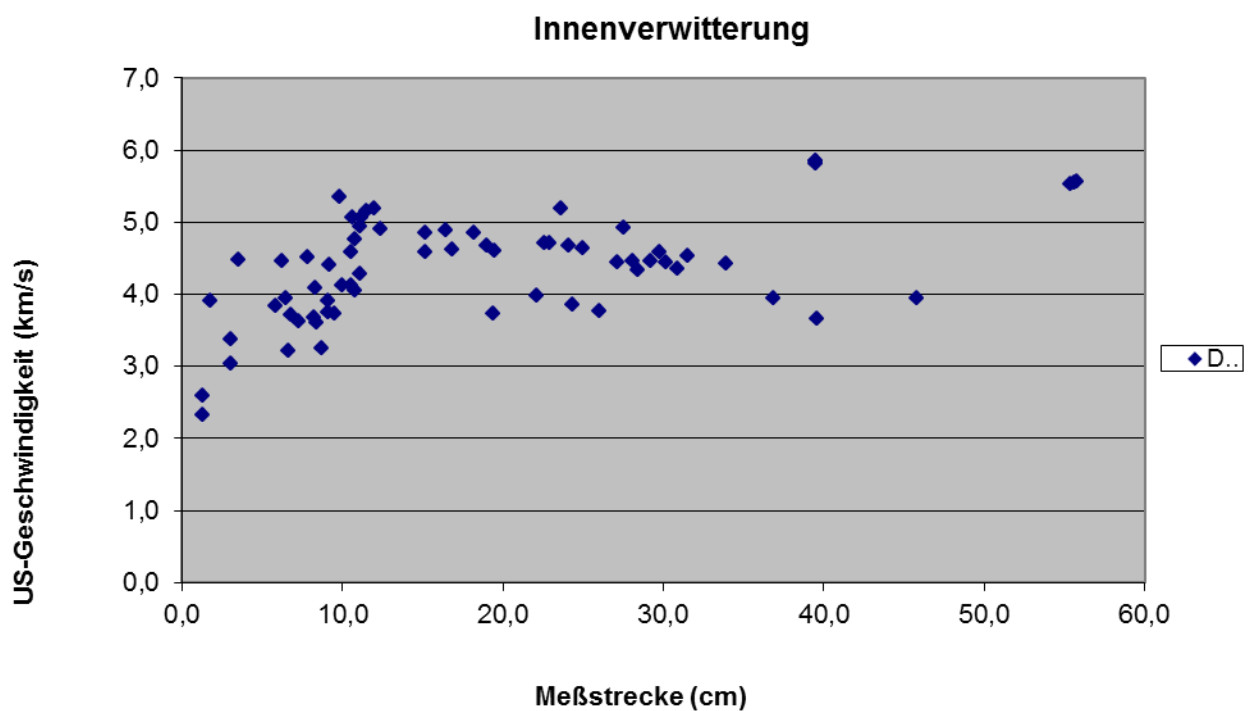


Arbeiten und Diskussionen

Mess- und Beurteilungsmethoden

- Ultraschallmessung (Gefüge)
- Messung der Wasseraufnahme
- Messung der Kantenabwitterung (Materialverlust)
- Oberflächenrauigkeitsmessung
- mineralogische Beurteilung
- kunsthistorische Beurteilung
- restauratorische Beurteilung

Ultraschallmessungen



Ultraschallmessungen durch das IFS-Mainz und das Rathgen-Forschungslabor

Wasseraufnahme



Messung W 8: Fortuna

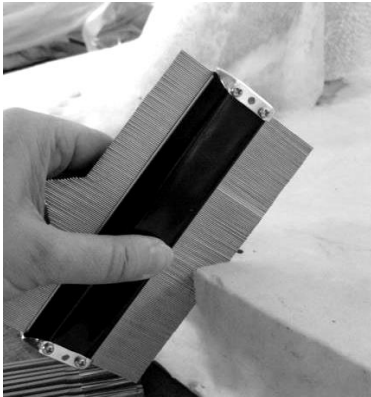


Messung W 9: Satyr



Der Sachverständige Dr. Horst Schuh bei der Durchführung schwieriger Untersuchungen

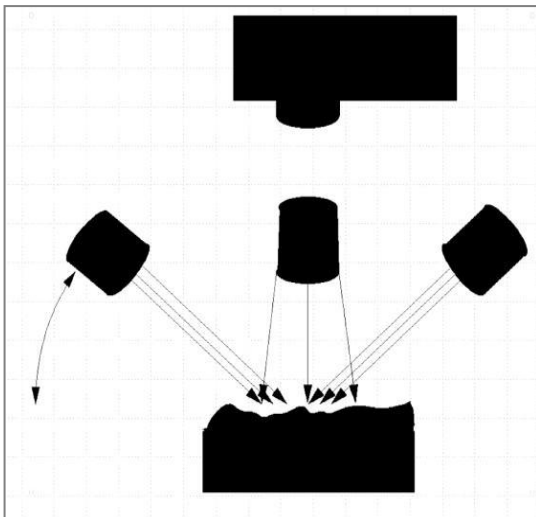
Messung der Kantenabwitterung (Materialverlust)



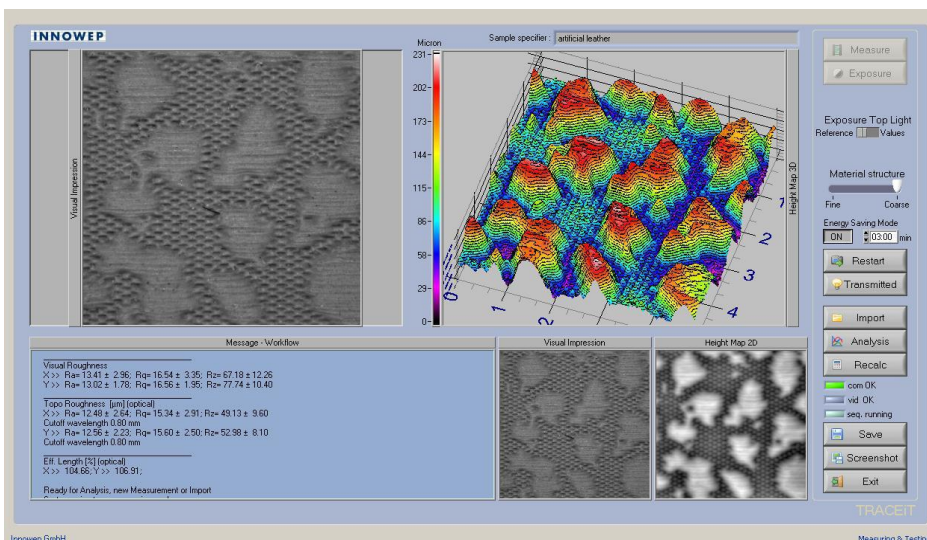
Messung mittels der Profillehre an der Plinthe einer Marmorskulptur

Oberflächenrauheitsmessung

(TRACEIT INNOWEP



TRACEiT-Messprinzip



TRACEiT-Messfenster

Bewertungskriterien für Marmorskulpturen

Auf Vorschlag und nach umfangreichen Vorarbeiten von Prof. Rolf Snthlage wurde erstmals der Versuch unternommen, an realen Skulpturen zu testen, ob es möglich und sinnvoll ist, unterschiedliche Bewertungskriterien für eine Gesamtbewertung des Zustandes einer Skulptur heranzuziehen.

Objektbewertung („weiche“ Kriterien)

- Objektbeschreibung
- Kunstwissenschaftliche Bewertung

Klima- und Materialeigenschaften („harte“ Kriterien)

- Standortbedingungen
- Materialeigenschaften
- Mechanische Schäden
- Ultraschallgefügediagnostik
- Oberflächenbeurteilung



Gesamtrisikobewertung (0 ... 1)

Wertungsgewichtung (0 ... 100%)

Ojektname:	Allegorie Wasser (nach Deponierung 2011)		Daten / Wert	Zahlen Bedeutung	Bewertungszahl B(i) 0 bis 10 normiert	
000001	Index		00001			
Objektbe						
01 wertung						
011 Objektbeschreibung (1 vorgegeben)						
011001	Sammlungsnummer	Skulpt.sl.g. 158		1	0	
011002	Objektname	Allegorie Wasser		1	0	
011003	Bildhauer	Lambert Sigisbert Adam		1	0	
011004	Entwerfer	Lambert Sigisbert Adam		1	0	
011005	Erschaffungsjahr	1749		1	0	
011006	Aufstellungsort	Große Fontäne		1	0	
011007	Aufstellungsjahr	1750		1	0	
011008	Objekthöhe	241		1	0	
011009	Objektbreite	131		1	0	
011010	Objekttiefe	109		1	0	
011011	Material	Marmor		1	0	
011012	Materialherkunft	Italien, Carrara		1	0	
011013	Materialfarbe	weiß		1	0	
011100 Gesamtbewertung Objekt						
012 Kunstwissenschaftliche Bewertung						
012001	Bedeutung des Künstlers	franz. Bildhauer, sehr hohe Wertschätzung in seiner heutiger Zeit		1	10	
012002	Künstlerischer Wert	Original des 18. Jh. hoch		1	8	
012003	Formcharakteristischer Wert (kompakt, filigran)	sehr hoch		1	10	
	Materialspezifischer Wert (Marmor, Sandstein)	Carrara Marmor, hoch		1	8	
	Erhaltungswert (Zustand)	deutliche Oberflächenverwitterung, Verlust von Details		1	6	
012004	Alterswert nach Riegl	Original 18.Jh. sehr hoch		1	10	
012005	Historischer Wert nach Riegl	im Kontext des Ensembles		1	5	
012006	Gebrauchswert nach Riegl	im Kontext des Gesamtparks		1	0	
012007	Kunstwert nach Riegl	marktüblich sehr hoch		1	10	
012008	Ensemblewert	im Depot		1	0	
012009	Originalstandort	im Depot		1	0	
012100 Gesamtbewertung Kunstwerk						
				1,00	0,61	
010000 Gesamtbewertung Objekt + Kunstwerk						

Objektbeschreibung und kunstwissenschaftliche Beurteilung

Objektname: Satyr		Daten / Wert	Zahlen	Bewertung	
000001	Index	00002	Messwerte	0 bis 10	normiert
023 Standortbedingungen					
023001	Klimazone Deutschland				
023002	Himmelsrichtung				
023003	Exposition				
023004	Expositionsschutz				
023005	Jahresmitteltemperatur				
023006	Jahresmittelfeuchte				
023007	Jahresmittelniederschlag				
023008	Frostgefahr				
023009	Kondensationshäufigkeit				
023010	Trocknung				
023011	Feinstaub				
023012	Schwefeldioxid				
023013	Stickoxide				
023014	Vandalismus				
023015	Graffiti				
023100 Standortrisiko					
024 Materialeigenschaften					
024001	Mineralzusammensetzung				
024002	Bindungstyp				
024003	Porosität				
024004	W-Wert				
024005	Korngröße				
024006	Kornform				
024007	Gefügeorientierung / Textur				
024008	Makrostruktur				
024009	Klang				
024100 Materialrisiko					
025 Mechanische Schäden					
025001	Hauptrisiform				
025002	Makrorisse				
025003	Haarisse				
025004	Rißcracuele				
025005	Standsicherheitsrisiko				
025006	Abbruchrisiko				
025100 Rißschadensrisiko					

Standortbedingungen, Materialeigenschaften und mechanische Schäden

026 Ultraschallgefügediagnostik					
026001	Ultraschallmessung				
026002	Gesamtultraschallgeschwindigkeit				
026003	Kopfultraschallgeschwindigkeit				
026004	Maximalultraschallgeschwindigkeit				
026005	Minimalultraschallgeschwindigkeit				
026100 Gefügerisiko					
027 Oberflächenbeurteilung					
027001	Hauptschadensform				
027002	Krusten				
027003	Versinterungen				
027004	Verfärbungen				
027005	Abmehlen				
027006	Absanden				
027007	Verzuckerung				
027008	Schalenbildung				
027009	Biobesiedlungshauptform				
027010	Pilze				
027011	Flechten				
027012	Moose				
027013	Pflanzen				
027014	Oberflächenrauheit				
027015	Kantenabwitterung				
027100 Oberflächenrisiko					
020000 Risikobewertung Klima Material					
100001	Gesamtkriterienanzahl				
100002	Verbalkriterien				
100003	Quantitätskriterien				
100004	Auswertungskriterien				
100005	Bewertungssicherheit				
101000 Gesamtrisikobewertung					

Ultraschalldiagnostik, Oberflächenbeurteilung und Gesamtrisikobewertung

3.4.2.3. Dresden-Großer Garten - Methodenkombinationen

In Dresden, im Mai 2014, sollte versucht werden, unterschiedliche Untersuchungsmethoden zur Gefüge- und Oberflächenbeurteilung miteinander zu kombinieren, um Hinweise für ein sinnvolles Standarduntersuchungsprogramm zur Zustandsbeurteilung von Marmorskulpturen zu erhalten.

An der Hauptallee des Großen Gartens flankieren zwei Skulpturengruppen den Weg, die das Thema der Entführung ebenfalls dramatisch veranschaulichen und in ihrer Bewegtheit mit zu den eindruckvollsten Werken in Dresden gehören. Es handelt sich dabei um zwei Kentauren, jene mythologischen Wesen halb Pferd halb Mensch, die in ihrer ungezügelten Wildheit in Konflikt mit Menschen und Göttern geraten. Beide Kentaurengruppen stammen von dem venezianischen Bildhauer Antonio Corradini (1668-1752).



Kentaurengruppen im Großen Garten (Foto von 1930)

Die Untersuchungskampagne fand in den Medien schon im Vorfeld Beachtung. Hier ein Beispiel:

Focus-Online

Montag, 12.05.2014, 17:22

Marmorskulpturen im Großen Garten bekommen Ultraschall

Die „Kentauren“ im Großen Garten in Dresden werden zum Forschungsobjekt.

Konkret geht es um Ultraschallmessungen an Marmorskulpturen, gab der Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement am Montag

bekannt. Das Vorhaben wird von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert. Marmor weist unter Einfluss von Schadstoffen aus der Luft Substanzschäden auf, die äußerlich nur bedingt sichtbar sind, hieß es. Im Anschluss an die Messungen sollen die Skulpturen gepflegt und restauriert werden. Die beiden Figurengruppen „Der Kentaur Eurytis vergreift sich an Hippodamia“ und „Die Entführung der Deianira durch Nessus“ wurden von dem venezianischen Bildhauer Antonio Corradini um 1730 geschaffen.



Eingerüstete Kentaurengruppen an der Hauptachse im Großen Garten

An diesen Untersuchungen nahmen folgende Kollegen teil:

Prof. Rolf Snethlage (Bamberg)
 Dr. Horst Schuh (München)
 Dr. Eberhard Wendler (München)
 Prof. Gottfried Hauff (Potsdam)
 Prof. Stephan Pfefferkorn (Dresden)
 Dipl.-Ing. Doreen Streicher
 (Potsdam)
 Dipl.-Rest. Kathrin Lange (Potsdam)
 Ing. Rolf Krompholz (Pirna)

Stud.-Rest. Sandra Damianowic
 (Potsdam)
 Dipl.-Mus. Irene Köhler (Potsdam)
 Dipl.-Phys. Wolfram Köhler
 Dipl.-Rest Frank Hoferick (Dresden)
 Dr. Judit Zöldföldi (Stuttgart)
 Dipl.-Arch. Panayiotis Andreou
 (Würzburg)
 Dipl.-Rest Klaus Häfner (München)



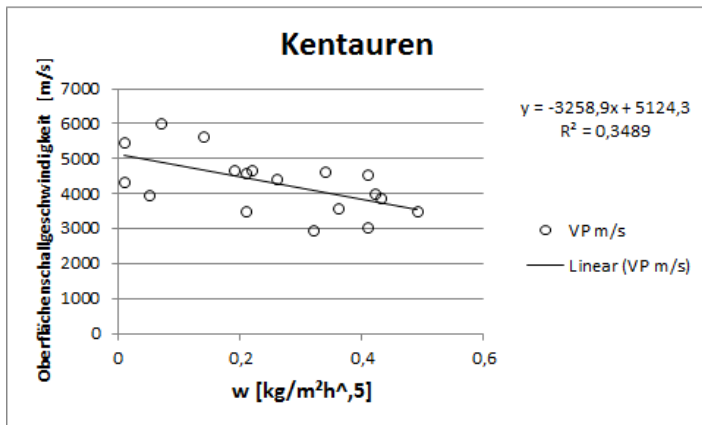
Wasseraufnahmemessungen, Ultraschallmessungen, kantenabwitterungsmessungen, Oberflächenrauigkeitsmessungen

Oberflächenultraschallgeschwindigkeit



Oberflächenultraschallsignal

Oberflächenultraschallgeschwindigkeit und Wasseraufnahme



Zusammenhang zwischen der Wasseraufnahme und der Oberflächen-schallgeschwindigkeit

Es zeigt sich, dass es möglich ist, beide Methoden miteinander zu kombinieren und so weitere Interpretationsmöglichkeiten zu erschließen.

3.5. Oberflächenbeurteilung

3.5.1. Untersuchungsziel

Neben den strukturellen Schäden des Marmors ist das Verwitterungsbild dieses Materials stark durch seine Oberflächenveränderungen geprägt. Dies sind besonders die Aufrauung der Oberfläche und vor allen, Materialverluste und Krustenbildungen unterschiedlicher Formen.

Die Oberflächenverwitterung von Marmorskulpturen beginnt mit dem Verlust der Politur und einer Zunahme der Rauigkeit. Diese nimmt kontinuierlich zu, bis sich die ersten Calcitkristalle aus dem Verbund lösen. In der Folge wittert die Oberfläche bei nahezu gleichbleibender Rauigkeit mit stetigem Materialverlust zurück.

Schon seit vielen Jahren wird versucht, die Zunahme der Oberflächenrauigkeit und der Materialverluste quantitativ zu erfassen.

Dabei kamen schon in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts mechanische Rauigkeitsmessgeräte zum Einsatz, die erste Erkenntnisse über den zeitlichen Fortschritt der Oberflächenverwitterung des Marmors erbrachten.

Ziel unserer Arbeiten war es, diese Untersuchungsmethoden unter dem Gesichtspunkt der technischen Weiterentwicklung der vergangenen Jahrzehnte zu testen und eventuell neue Methoden auf ihre Tauglichkeit hin zu überprüfen.

Ein wichtiger Gesichtspunkt war in diesem Zusammenhang auch, Methoden zu testen, die einfach zu handhaben und nicht kostenintensiv sind, so dass sie von möglichst vielen Restauratoren selbst angewendet werden können.

Die folgenden Passagen sind einem Vortrag von Frau Sandra Damianovic 2014 in Potsdam entnommen.

3.5.2. Untersuchungsmethoden

3.5.2.1. Rauigkeitsmessungen

Der Begriff Rauheit bezeichnet in der Oberflächenphysik, die Unebenheiten von Oberflächenhöhen. Nach persönlichem Empfinden stufen wir Materialien als eben, glatt, rau, wellig, matt oder glänzend ein. Wir können Oberflächen visuell mit dem menschlichen Auge und haptisch mit unserem Tastsinn erfassen. Genauer genommen ist unter Rauheit die Feingestalt der Oberfläche im mikroskopischen Bereich zu verstehen, in jedem Bereich der mit dem Auge nicht mehr wahrgenommen werden kann.

Zur quantitativen Charakterisierung der Rauheit werden reproduzierbare Messvarianten genutzt, um die Oberfläche präzise zu beschreiben. Im physikalischen Sinn wird ein Ausschnitt aus einer Gesamtoberfläche durch Rauheitsparameter beschrieben und als statistische und stochastische Verteilung von Profilspitzen sowie Profiltälern definiert, deren Ergebnisse meist in Mikrometer ($1\mu\text{m} = 0,01\text{mm}$) angegeben werden. „Der Begriff Rauheit bezeichnet weiterhin eine Gestaltabweichung dritter bis fünfter Ordnung bei technischen Oberflächen nach DIN 4760“.

„Unter der Gestaltabweichung ist die Gesamtheit aller Abweichungen der Istoberfläche von der geometrischen Oberfläche zu verstehen. Zu unterscheiden sind hierbei Abweichungen, die nur beim Betrachten der gesamten Oberfläche erkennbar sind und solchen, die sich schon an einem Flächenabschnitt erkennen lassen.“ Somit weichen alle realen Objektflächen (Istoberfläche) von ihrer idealen Form (wirklichen Oberfläche) ab. Diese Umstände werden in DIN 4760 in sechs Kategorien unterteilt. Dies betrifft Formabweichungen, Welligkeiten und Rauheiten. Die Rauheiten werden dabei in drei Größenklassen unterteilt: Rauheiten durch den Bearbeitungsvorgang, durch die Gefügestruktur sowie durch den atomaren Gitteraufbau des Werkstoffes. Die Gestaltabweichung 1., 2. und 6. Ordnung ist zu spezifisch und für die vorliegende Arbeit nicht relevant. Somit spielen nur die Kenngrößen der 3. (Rillen), 4. (Riefen) und 5. (Gefügestruktur) eine bedeutende Rolle.

Nur durch die Filterung bzw. Gestaltabweichungen von Oberflächen, welche langwellige Anteile des Istprofils nur teilweise oder gar nicht in das Messergebnis einbringen, können Rauheitsprofile dargestellt und gemessen werden. Dabei handelt es sich nur um ein Abbild der wirklichen Oberfläche.

Durchführung der objektiven Oberflächenmessung

Um die Oberflächen der Probekörper objektiv bewerten zu können, wird das optische Messsystem TRACEIT® benutzt, welches bei der Beurteilung von Papieroberflächen und in der Autoindustrie eingesetzt wird. In den vergangenen Jahren wurde diese Methodik unter anderem auch zur Beurteilung von Werksteinoberflächen, Gemälden und historisch wertvollen Dokumenten angewandt.

Das TRACEIT System von der Fa. INNOWEP, Würzburg, ist ein mobiles, berührungsloses Oberflächen-Analysetool. Es ermöglicht 3D-Topografieanalysen, Messungen von Rauheitskenngrößen und dokumentiert ebenso den visuellen Eindruck ähnlich dem menschlichen Auge sowie visuelle Kennzahlen.

Während des TRACEIT- Vorgangs, dokumentiert, analysiert und bewertet das System den visuellen Eindruck, das Erscheinungsbild und die wahrgenommene Produktoberfläche durch ein reproduzierbares Verfahren.

Das TRACEIT basiert auf einer "shape-from-shading"- Technologie bei der aus Grauwertbildern ein Höhenprofil errechnet wird. Eine TRACEIT-Messung besteht aus 4 Bildern, jedes unter verschiedenen Beleuchtungswinkeln aufgenommen.

Die ersten drei Bilder werden unter Lichtquellen erfasst, welche im 0° , 120° und 240° Winkel angeordnet sind. Das vierte Bild wird mit Hilfe eines Toplichtes erfasst, um den visuellen Eindruck der Oberfläche zu erhalten. Die Bilder werden über eine CCD-Einheit senkrecht über der Probe aufgenommen.

Die zu bewertende Oberfläche wird durch das manuelle Auflegen des Messensors nach außen hin optisch getrennt. Gemäß eines Algorithmus bewertet die TRACEIT® Software die Bilder und berechnet die Topografie der vermessenen Fläche. Basierend auf dieser Information erhält der Benutzer Daten über die Rauheitskenngrößen R_a , R_q , und R_z . Das TRACEIT® System besteht aus dem Messkopf, einem modifiziertes Dell® Notebook, welches zur Steuerung des Messensors, Datenerfassung sowie der Messdatenanalyse und Stromversorgung dient, einem USB-Kabel und einer WINDOWS® Software. Aufgrund dieser Modifikationen ist es nicht möglich, TRACEIT® mit einem anderen Computer oder Notebook zu benutzen.

Der Messkopf des TRACEIT® Systems besteht aus einer CCD-Einheit (der Kamera), Steuer- und Beleuchtungselektronik sowie Optiken und Beleuchtungseinheiten (Abb.8).

Rauheitsparameter

Wie schon erwähnt ist die Rauheit ein Maß für die Struktur der Oberfläche. Sie gibt die vertikale Abweichung der realen von der idealen, also perfekt flachen Oberfläche an. Ist die Abweichung groß, fühlt sich die Oberfläche rau an; ist sie klein, fühlt sich die Oberfläche glatt an. Die Rauheit wird typischerweise als die hochfrequente, kurzwellige Komponente einer gemessenen Oberfläche betrachtet.

Die Rauheit spielt eine wichtige Rolle bei der Bewertung, wie eine Oberfläche mit ihrer Umgebung interagiert. Raue Oberflächen werden normalerweise schneller abgerieben und haben höhere Reibkoeffizienten als glatte Oberflächen. Die Rauheit ist auch häufig ein Maß für die Leistungsfähigkeit einer mechanischen Komponente, da Unebenheiten in der Oberfläche zur Keimzelle von Rissen oder Korrosionen werden können.

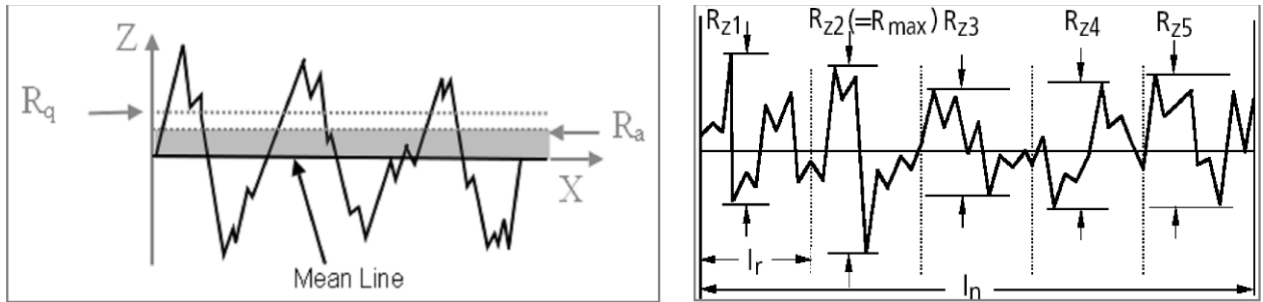
Im Alltag haben sich drei Rauheitsdefinitionen etabliert, die alle in die TRACEIT-Software implementiert wurden:

1. Arithmetischer Mittenrauwert (R_a)

R_a ist das arithmetische Mittel aller Abweichungen y des Rauheitsprofils von der mittleren Linie innerhalb einer Bezugsstrecke. R_a wird üblicherweise in der allgemeinen Ingenieurspraxis angewandt.

2. Quadratischer Mittenrauwert (R_q)

R_q ist der quadratische Mittelwert der Profilabweichungen y^2 innerhalb einer Bezugsstrecke. R_q ist bei den meisten Oberflächenprofilen ca. 25 % größer als R_a .



Grafische Darstellung der Rauheitsparameter R_a , R_q und R_z 3. Gemittelte Rautiefe (R_z)

R_z ist der Mittelwert von den Einzelrautiefen aus fünf aufeinanderfolgenden Einzelmessstrecken. Dabei handelt es sich bei den Einzelrautiefen um den vertikalen Abstand zwischen höchstem und niedrigstem Profilwert innerhalb einer Einzelmessstrecke. Welche Rauheitsparameter signifikant für die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse sind, hängt von der Art der Oberfläche und dessen Ausdrucksstärke der Kennzahlen ab. Da es keine allgemeingültige Kennzahl gibt, muss von Fall zu Fall verglichen und entschieden werden.

Anwendung von TRACEIT®

Nachdem der Messkopf auf die Oberfläche der Marmorskulptur aufgelegt und die Schaltfläche Exposure im Messfenster der TRACEIT® Software am Rechner betätigt wird, erscheint das Videosignal und das System ist bereit, die Sequenz zu starten. Durch das Anklicken des Buttons Exposure wird die Lichtquelle automatisch an das Objekt angepasst. Je nach Reflexion und Farbe der Oberfläche, kann die Lichtquelle manuell eingestellt werden.

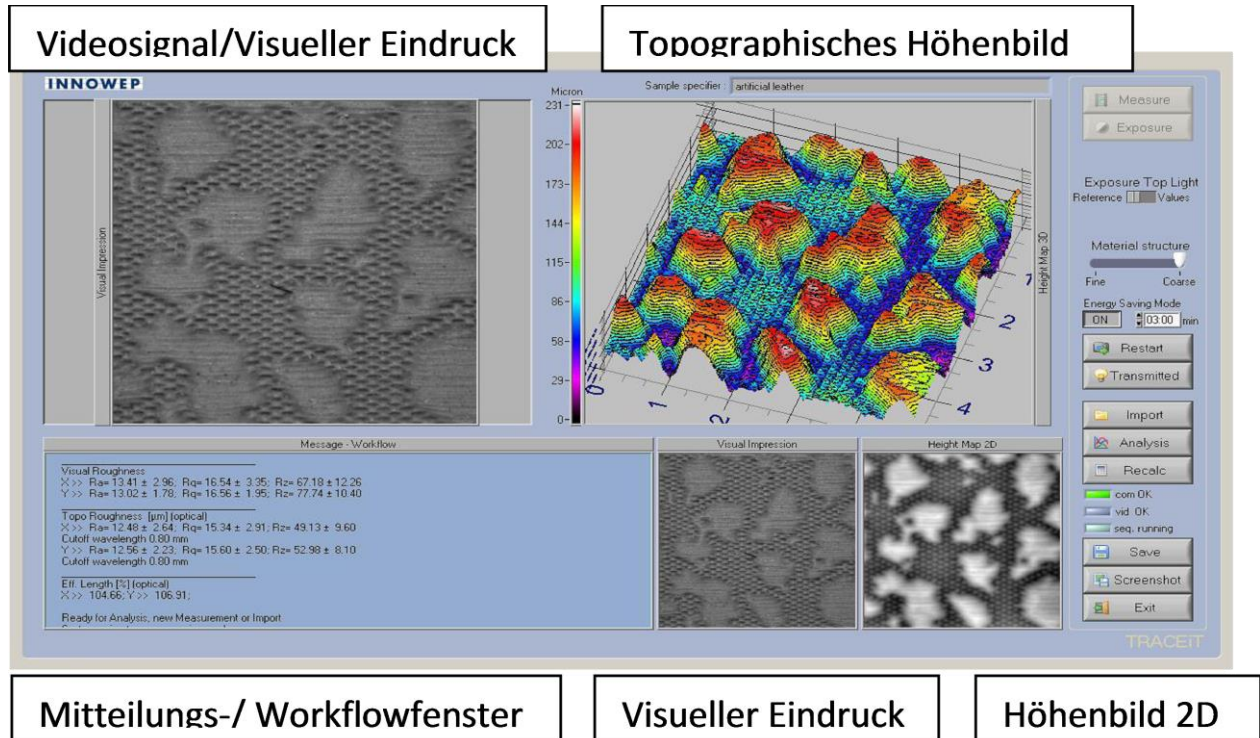


Mobiles TRACEIT® Systems



Anbringung des Messkopfes auf der Oberfläche der Marmorskulptur

Nun kann die Messsequenz durch Klicken der Schaltfläche Measure gestartet werden. Nach den Aufnahmen wird die Auflösung für die Berechnung in x- und y-Richtung eingestellt. Für die Carrara - Marmorfigur wurde die Auflösung 500 x 500 Pixel gewählt. Nach Beendigung dieser Einstellung berechnet die Software automatisch die Topografie der vermessenen Oberfläche.



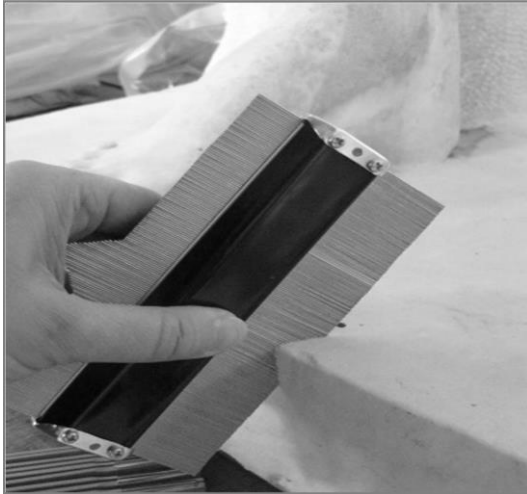
Messfenster der TRACEIT® Software

Daraufhin berechnet das System die Rauheit der Probenflächen, basierend auf den Berechnungsgrundlagen der DIN EN ISO 4287. Die Resultate der topografischen Rauheit sowie die visuellen Rauheit werden jeweils in x- und in y - Richtung, im Mitteilungs-/Workflow-Fenster angezeigt. Die Daten können importiert und abgespeichert werden, um diese auch mit x-beliebigen Rechnern ohne TRACEIT® Software zu öffnen.

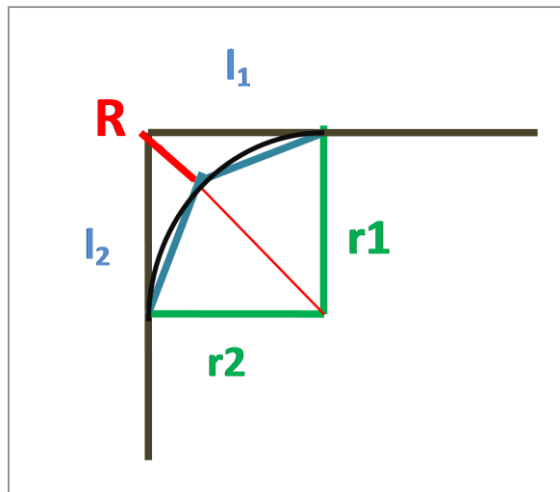
3.5.2.2. Kantenabwitterung

Einen Vorschlag Prof. Rolf Snethlages folgend, hat Frau Andra Damianovic eine Messmethode zur Kantenabwitterung entwickelt und getestet. Ziel war es, den realen Materialverlust mittels einer Profillehre quantitativ messbar zu machen.

Die Profillehre wird auch als Formenlehre, Figurenlehre, Profiltaster sowie als Profilmesser bezeichnet und eignet sich zum Abnehmen und Übertragen von Formen. Das Messgerät besteht aus feinen Stahlstiften, welche im Abstand von 0,79 mm mittig in einem Stahlblechgehäuse eingefügt sind, so dass die Abbildungsgenauigkeit bei Normalausführung ebenfalls 0,79 mm beträgt.



Anwendung der Profillehre an der Plinthe einer Marmorskulptur im Park Sanssouci in Potsdam



Profilkurve und die daraus ermittelbaren Werte



Abgenommenes Profilbild der Plinthe an der Marmorskulptur

Die Änderung der Oberflächentopographie an Ecken und Kanten von Skulpturen, wird durch die Metallstifte erfasst und mit geringem Druck in einer Vertikalbewegung, auf der parallel liegenden Seite als positiven Abdruck übersetzt.

Beim Auflegen der Profillehre am Millimeterpapier zeigt sich ein Höhenunterschied von ca. 8 mm, der auf das Stahlblechgehäuse zurückzuführen ist. Der Unterschied wird mit einer Vorrichtung aus Kunststoffschäumplatten ausgeglichen. Somit kann eine plane Fläche erzeugt und das daraus resultierende Profil abfotografiert und auf einem Rechner übertragen werden, wodurch der hypothetische Rückwitterungswert R ermittelt wird.

Da die ursprünglichen Ecken und Kanten, welche der Bildhauer im Sinne hatte herzustellen nicht bekannt sind, wird ein hypothetischer Rückwitterungswert angenommen. Aus einer Profilmessung ergeben sich fünf Werte der hypothetische Rückwitterungswert, die Diagonallänge, die Ideallänge horizontal, die Ideallänge vertikal, der Radius horizontal und der Radius vertikal.

Dabei gelten für alle Messungen:

R... hypothetischer Rückwitterungswert [mm]

l1... Ideallänge horizontal [mm]

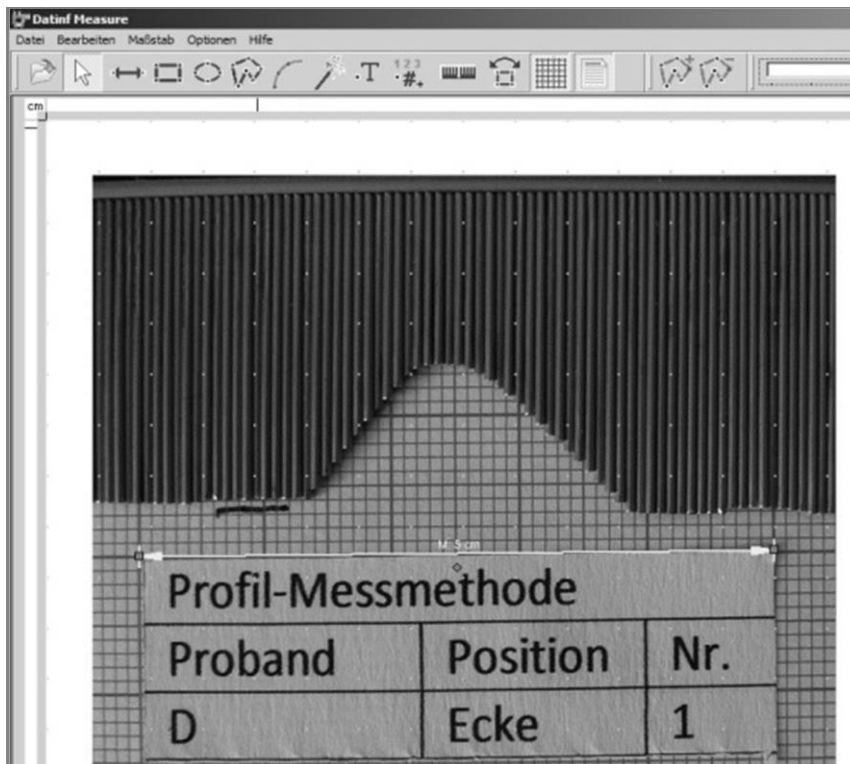
l2,...Ideallänge vertikal [mm]

r1...Radius horizontal [mm]

r2 ...Radius vertikal [mm]

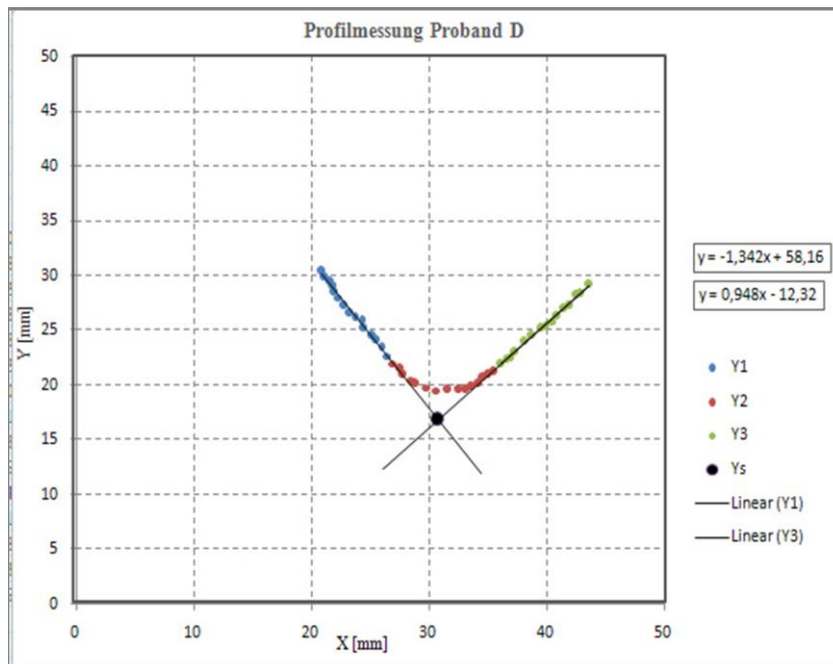
Um wiederholbare Messwerte der Profilmessmethodik zu erzielen, entwickelte Herr *Dipl.-Phys. Wolfram Köhler* ein Verfahren zur objektiven Bewertung der Profilmessmethode. Dabei handelt es sich um ein bereits auf dem Markt bestehendes kostengünstiges Messprogramm namens *DatInf Measure* (ca.30€), in dem die abfotografierten Profilbilder eingespielt, die Eckpunkte der Stahlstifte angeklickt und mit einer von Köhler (2013) programmierten Version basierend auf Microsoft Excel, die Längen ermittelt werden.

Die abfotografierten Profilbilder werden mit Hilfe der Software *DatInf Measure* eingespielt und mit dem Tool Maßstab 1:1 angepasst (Abb.5).Die Profilkurve wird in drei Teile, zwei Seitenlängen und eine Krümmung (Kurve), gegliedert. In jedem Bereich werden 15 Messpunkte an den Ecken der Stahlstifte gesetzt (angeklickt) und sind in Summe 45 Klicks. Je genauer das Bild aufgenommen wurde, desto genauer können die Messpunkte gesetzt werden. Somit soll das abgenommene Profil mit Hilfe der Profillehre von beiden Seiten beleuchtet werden, um keine Schattenwürfe zu erzeugen, welche das Kurvenbild verfälschen.



Abfotografiertes Profilbild in DatInf Measure exportiert

Die Abnahme mit der Profillehre an der Kante bzw. Ecke sollte genügend lange Winkel (Seitenlängen) aufweisen, um 15 Messpunkte setzen zu können. Die angeklickten Messpunkte werden in einem Messfenster angezeigt, und in die Excel Tabelle – Dateneingabe exportiert. Anschließend werden die 45 Werte in x- und y- Richtung in die programmierte Microsoft Excel Tabelle-Berechnung kopiert, berechnet und in einem Diagramm als Profilkurvenbild dargestellt -Der hypothetische Rückwitterungswert R wird aus dem Schnittpunkt der Geraden, der am nächsten zur Kurve ist, berechnet.



Profilkurven-Diagramm mit errechneten hypothetischen Rückwitterungsdifferenzwert R

3.5.3. Ergebnisbeurteilung

Bei der Anwendung des TRACAIT-Systems an einer Marmorskulptur am Rondell im Park Sanssoucis in Potsdam, zeigte sich, dass sich beispielsweise jene Flächen, welche das menschliche Auge als leicht verschmutzt annahm, messtechnisch mit Hilfe des TRACEIT®-System, höhere Rauheitswerte aufweisen als jene, die keine Verfärbung auf der Oberfläche vermuten lassen. Dennoch wurden die dunkleren Stellen haptisch und optisch als glatter empfunden. Wenn es sich tatsächlich um Schmutz handeln sollte, könnten die Verunreinigungen, welche als Gleitmittel an der Oberfläche haften, den Reib- und Fühlwert verändern. Somit erscheint die wirkliche Oberfläche glatter, als die Istoberfläche (messtechnisch erfasste Oberfläche).

Jene Beobachtung wurde jedoch auch an unverschmutzten Probeflächen gemacht. Da möglicherweise die Verwitterungsprozesse durch thermohygrische Mikrorissbildung vorangetrieben werden, die letztlich zur Erhöhung der Porosität und Erweiterung der Poren führt, die das menschliche Auge und unser Tastsinn nur begrenzt als chemische Lösung an der Kristalloberfläche wahrnehmen kann.

Das TRACEIT®-Analysesystem berechnet bei den topographischen Oberflächen die Höhenprofile als Graustufenbild und erzeugt somit Höhen und Tiefen im Mikrometerbereich, also in jenem Bereich, in dem unser visueller und haptischer Sinn an seine Grenzen gelangt.

Des Weiteren muss unterschieden werden zwischen dem, was ich sehe, fühle und messe. Da es sich hierbei um drei unterschiedliche Wahrnehmungen bzw. Untersuchungen handelt, müssen diese auch separat analysiert und interpretiert werden.

Obwohl die Anwendung von TRACEIT® einfach in der Handhabung sowie Auswertung der Daten ist, bleibt noch zu klären, ob bei geschliffenen Carrara Marmoroberflächen die Reflexion der trigonalen Calcitkristalle die Istoberfläche (die wirkliche Rauheit) verfälscht. Außerdem ist die kostenintensive Investition des TRACEIT®-Systems, im Vergleich zu preiswerteren Profilmessgeräten in der Kosten-Aufwands-Effizienz noch abzuwiegen.

Im Gegensatz dazu ist die Anschaffung einer Profillehre weitaus kostengünstiger. Die Investition von ca. 20€ für die Profillehre und ca. 30€ für die Software, lohnt sich zur einfachen und wiederholbaren Beurteilung von Rückwitterungsraten an Kanten und Ecken. Pro Profilabnahme und Auswertung der Daten werden ca. 5-10 Minuten berechnet, sodass für eine Untersuchung an einer Skulptur mit Sockel mit insgesamt 40 Messpunkten, drei bis sechs Stunden in Anspruch nimmt.

3.6. Leitfaden

3.6.1. Fehlerbetrachtung

Die durchgeführten Untersuchungen gelten nur für Messungen der P-Wellengeschwindigkeit in Transmission. Dabei wird angenommen, dass das Gefüge des Marmors auf der Messstrecke homogen und gleichmäßig feucht ist.

In den Gesamtfehler der Ultraschallmessungen gehen der Fehler der Messung selbst, der tageszeitlich bedingte Fehler, der jahreszeitlich bedingte Fehler und der Standortfehler ein. Diese relativen Fehler müssen addiert werden, um die Gesamtgenauigkeit der Messmethode zu ermitteln.

Messfehler

Der Messfehler hängt von der Genauigkeit der Messung der Messstrecke und der Laufzeit ab.

Die notwendigen Messgenauigkeiten kann man in folgender Tabelle zusammenfassen:

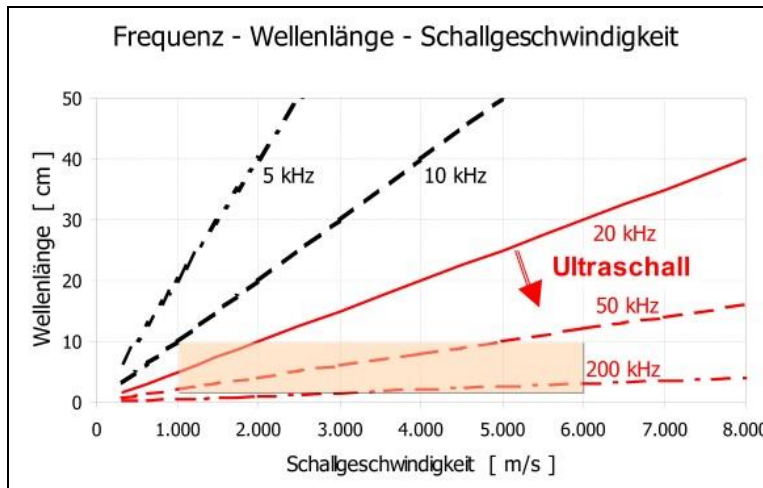
Messstrecke in cm	Messgenauigkeit			Strecke messbar mit
	Schalllaufzeit in $\pm\mu\text{s}$	Messstrecke in $\pm\text{cm}$	Fehler in $\pm\%$	
2 < 5	$\pm 0,01$	$\pm 0,05$	$\pm 5,0$	digitalem Messschieber
5 < 10	$\pm 0,05$	$\pm 0,10$	$\pm 2,0$	
10 < 20	$\pm 0,10$	$\pm 0,20$	$\pm 2,0$	Messzirkel als Greifzirkel (bis 40 cm)
20 < 50	$\pm 0,50$	$\pm 0,50$	$\pm 2,0$	
50 < 100	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	$\pm 2,0$	Greifzirkel und Gliedermaßstab (Zollstock)
100 < 150	$\pm 1,50$	$\pm 1,50$	$\pm 2,0$	
150 \leq	$\pm 2,00$	$\pm 2,00$	$\pm 2,0$	

Messgenauigkeiten für Strecken- und Laufzeitmessungen

Damit wird klar, dass Ultraschallmessungen an Dimensionen unter 5cm mit zunehmend größeren Fehlern behaftet sind und mit Vorsicht zu genießen sind, selbst wenn die Ultraschallfrequenzen über 80kHz liegen.

Eine wichtige Voraussetzung für möglichst genaue Messungen ist die richtige Wahl der Ultraschalluntersuchungsfrequenz.

Die bei der jeweiligen Frequenz sich herausbildende Wellenlänge des Ultraschallsignals sollte nicht unter der Größe der Messstrecke liegen, da sich sonst keine vollständigen P-Wellenzüge ausbilden können und keine sauberen P-Wellen entstehen.



Zusammenhang zwischen Messfrequenz, Wellenlänge und Ultraschallgeschwindigkeit

Eine Alternative für Messungen an Marmorskulpturen stellt die Verwendung von breitbandigen Schallwandlern mit leicht abgeflachten Spitzen dar. Diese können auch trocken angekoppelt werden, was zur Schonung der empfindlichen Marmoroberflächen beiträgt.

Unter Beachtung dieser Bedingungen muss man mit einem methodischen Fehler von $\pm 2,0\%$ rechnen.

Tageszeitlicher Fehler

Der tageszeitliche Fehler hat seine Ursachen in kurzfristigen Feuchteschwankungen und kann nur anhand von Messungen abgeschätzt werden.

Mehrtägige Ultraschalluntersuchungen am Probestein ergaben bei Messungen zwischen 10:00 und 15:00Uhr Schwankungen um den Mittelwert 2450m/s von $\pm 50\text{m/s}$. Daraus läßt sich ein Fehler von $\pm 2,0\%$ berechnen.

Jahreszeitlicher Fehler

Die größte Unsicherheit besteht bei der jahreszeitlichen Feuchtekorrektur der Messwerte.

Zur Abschätzung dieses Fehlers wurden mit den Messergebnissen an den Stelen umfangreiche Simulationen vorgenommen, um die Messgenauigkeit zu verbessern.

Dabei ergab sich, dass Messungen die unabhängig von jahreszeitlichen Bedingungen, also von März bis November ausgeführt werden, einen sehr großen Fehler von $\pm 20\%$ aufweisen können.

Schränkt man die Messtermine auf die Sommermonate von Juni bis September ein, kann dieser Fehler auf $\pm 7,5\%$ reduziert werden.

Finden die Messungen nur in den Monaten Juni und Juli statt, kann der Fehler nochmals auf $\pm 5\%$ verringert werden, greift man auf die regionalen DWD-Datensätze zurück.

Standortfehler

Der Standortfehler setzt sich aus dem regional bedingten Fehler und dem lokal bedingten Fehler zusammen.

Der regional bedingte Fehler kann anhand der TRY-Datensätze abgeschätzt werden und ist sehr gering. Seine Größe liegt unter $\pm 0,1\%$, ist also vernachlässigbar.

Der lokale Standortfehler beträgt $\pm 4\%$ und kann nur durch spezielle Klimamessungen an den Messobjekten selbst verringert werden. Diese Messungen sollten wenigstens zwei Monate vor dem geplanten Messtermin beginnen. Hierbei ist ein stündliches Messintervall ausreichend.

Gesamtfehler

Die Messung selbst kann mit einer Genauigkeit von $\pm 2\%$ durchgeführt werden.

Will man den Gesamtzustand einer Skulptur ermitteln oder werden Messungen für ein Langzeitmonitoring durchgeführt, müssen alle relativen Einzelfehler mit einbezogen werden. Rechnet man alle Fehler zusammen, so zeigt sich, dass es nur sehr schwer sein wird, die bisher angenommenen Messgenauigkeiten zu verbessern. Es muss nach wie vor mit einem Fehler von $\pm 10\%$ gerechnet werden.

Gleichzeitig gibt es Grund zu der Annahme, dass viele der bisherigen Messungen mit einem noch größeren Fehler behaftet sind, wie die Vergleichsmessungen 2012 in München gezeigt haben.

Unter Beachtung dieser Erkenntnisse wurden in den letzten Monaten zwei Wiederholungsmessserien in Jena und Potsdam nachträglich korrigiert, die mehr als 20 Jahre zurückreichen und in sich widersprüchliche Ergebnisse aufwiesen. Jüngere Messungen ergaben deutlich höhere Ultraschallgeschwindigkeiten als die Messungen im 20. Jahrhundert. Da die Messtermine aber im März, Sommer und Oktober lagen, konnten die Messungen mit Hilfe der betreffenden TRY-Datensätze erfolgreich korrigiert werden.

3.6.2. Bewertungs-Leitfaden für Ultraschallmessungen an umweltgeschädigten Marmorskulpturen

Die für die Erarbeitung eines „Bewertungs-Leitfadens für Ultraschallmessungen an Marmorskulpturen“ relevanten Messempfehlungen beziehen sich nur auf die Genauigkeit der Messung der Messstrecke und der Laufzeit, die Messfrequenz, die Ankopplungsbedingungen, den Messzeitpunkt, den Klimamessungen und auf unbedingt notwendige Dokumentationen.

Messgenauigkeit

Messstrecke in cm	Messgenauigkeit			Strecke messbar mit
	Schalllaufzeit in $\pm\mu\text{s}$	Messstrecke in $\pm\text{cm}$	Fehler in $\pm\%$	
2 < 5	$\pm 0,01$	$\pm 0,05$	$\pm 5,0$	digitalem Messschieber
5 < 10	$\pm 0,05$	$\pm 0,10$	$\pm 2,0$	
10 < 20	$\pm 0,10$	$\pm 0,20$	$\pm 2,0$	Messzirkel als Greifzirkel (bis 40 cm)
20 < 50	$\pm 0,50$	$\pm 0,50$	$\pm 2,0$	
50 < 100	$\pm 1,00$	$\pm 1,00$	$\pm 2,0$	Greifzirkel und Gliedermaßstab (Zollstock)
100 < 150	$\pm 1,50$	$\pm 1,50$	$\pm 2,0$	
150 \leq	$\pm 2,00$	$\pm 2,00$	$\pm 2,0$	

Die Laufzeitmessungen müssen mit einem gut auflösenden Oszilloskop durchgeführt werden, das die geforderten Genauigkeiten übererfüllt.

Bei der Messung von Ultraschallgeschwindigkeiten an Messstrecken unter 5cm ist Vorsicht geboten. Die Ergebnisse können vollständig falsch sein.

Messfrequenz

Die Messfrequenz sollte nicht unter 80kHz und besser über 200kHz liegen.

Wandlerankopplung

Nach Möglichkeit sollten spitze Schallwandler verwendet und trocken angekoppelt werden.

Messzeitpunkt

Es sollte nach Möglichkeit nur in den Sommermonaten von Juni bis September, besser im Juni und Juli, gemessen werden.

Die bevorzugte Tageszeit liegt zwischen 11:00 und 15:00, unter gleichmäßigen Wetterbedingungen (bedeckt) bis 16:00Uhr.

Klimamessung

Wenn möglich, sollten an den Objektstandorten individuelle Klimamessungen mit einem stündlichen Messintervall, wenigstens acht Wochen vor dem geplanten Messtermin beginnend, bis zum Messzeitpunkt durchgeführt werden.

Messungen nach mehrtägigen Hitze- oder Regenperioden sind zu vermeiden.

Dokumentation

Für die Auswertung, sind neben dem Bericht, wenige Angaben notwendig.

Zu erfassen sind:

- Name des Untersuchenden
- Messdatum
- Objektbezeichnung, Datierung usw.
- Material
- Standortbeschreibung
- zeitlicher Beginn und das Ende der Messungen (Uhrzeit)
- aktuelle Wetterbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Sonnenschein, Bedeckung, Niederschlag usw.)
- Bauform, Messfrequenz und Totzeitkorrektur der Wandler

Der Bericht sollte für alle Messpunkte die Messpunktbezeichnung, die Messrichtung, die Messstrecke, die gemessene Schalllaufzeit, die berechnete Ultraschalllaufzeit und Beobachtungen während der Messungen enthalten.

Alle Messpunkte sind möglichst genau auf Fotos zu kartieren.

Die Messwerte sind mit Extrem- und Mittelwerten zusammenzufassen und in Beziehung zu den aktuellen Schadensklassen zu setzen.

Schadensklasse	p-Wellengeschwindigkeit v_p [m/s]	Zustand	Porosität P [%]
0	> 5000	frisch	< 0,5
I	3000...5000	zunehmend porös	0,5...1,3
II	2000...3000	absandend	3,0...1,3
III	1500...2000	brüchig	3,0...5,0
IV	<1500	zerfallend	> 5,0

Ultraschallgeschwindigkeiten und Schadensklassen von mittel- und feinkristallinen weißen Marmoren

Empfehlenswert sind die Darstellung der Messungen in einem Messstrecken-Schallgeschwindigkeitsdiagramm und die Zusammenfassung in einem Box&Whisker-Diagramm.

4. Probleme und Perspektiven

Ultraschallmessung

Die kontinuierlichen Ultraschallmessungen am Probestein sollen auch nach Projektende fortgesetzt werden. Von besonderem Interesse ist dabei der Einfluss von Frost auf das Ultraschallsignal, um Aussagen über das Gefrierverhalten des Marmors zu erhalten.

Die klassische Methode der P-Wellengeschwindigkeitsmessung in Transmission wird bei Objektuntersuchungen mit trocken angekoppelten Spitzenwandlern durchgeführt. Das Empfangssignal beinhaltet, neben der P-Wellenlaufzeit, zahlreiche weitere Informationen, die in der Regel bei der Signalauswertung keine Beachtung finden. Besonders die Messung der S-Wellengeschwindigkeit kann den Zugang zu weiteren Messgrößen, wie zum Beispiel dem dynamischen E-Modul ermöglichen. Daher ist eine erweiterte Online-Signalauswertung bei Objektmessungen anstrebenswert.

Neben der S-Welle kommt der Oberflächenwelle eine besondere Bedeutung zu, da sie Informationen über die ersten Millimeter eines Festkörpers enthält. Die messtechnischen Voraussetzungen zur sicheren Messung der Oberflächenwelle sind vorhanden. Probleme gibt es bei der Interpretation dieser Messergebnisse, da kaum systematische Untersuchungen dazu vorliegen. Durch die sinnvolle Kombination dieser Methode mit anderen Messmethoden kann dieses Interpretationsdefizit verringert werden.

Feuchtigkeitsmessung

Der vorliegende Leitfaden geht davon aus, dass die Ultraschallgeschwindigkeit von der Feuchtigkeit im Porenraum des Marmors abhängig ist, diese nicht genau bekannt ist und auch nicht direkt gemessen werden kann. Für die Interpretation und Feuchtekorrektur der Ultraschallmessungen stehen nur indirekte Zusammenhänge zwischen der Ultraschallgeschwindigkeit und klimatischen Standortbedingungen zur Verfügung.

Wünschenswert ist daher die Entwicklung einer zerstörungsfreien Messmethode zur direkten quantitativen Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes im Marmor. Denkbar wäre z.B. eine Mikrowellenlaufzeitmessung, da die Mikrowellengeschwindigkeit direkt feuchteabhängig ist.

Oberflächenuntersuchungen

Neben den zerstörungsfreien Gefügeuntersuchungen kommen den Oberflächenuntersuchungen zunehmend größere Bedeutungen zu, besonders wenn es um die Beurteilung von Oberflächenveränderungen und -verschmutzungen sowie deren Beseitigung geht.

Das Projekt hat gezeigt, dass es Methoden gibt, die dies leisten können. Systematische Anwendungsversuche müssen diese Methoden für den Routineeinsatz für Objektuntersuchungen weiterentwickeln.

Bewertungskriterien

Das im Projekt entwickelte Konzept der Ermittlung einer Risikokennziffer für Marmorskulpturen anhand von unterschiedlichen Bewertungskriterien sollte anhand konkreter Objekte weiterentwickelt und getestet werden. Hierbei kommt der Diskussion der Bewertung der „weichen“ Kriterien, wie zum Beispiel der künstlerischen, kunsthistorischen und denkmalpflegerischen Bedeutung eines Kunstwerkes, besondere Bedeutung bei.

Gesteinsmodell

Im beendeten Forschungsprojekt konnten geophysikalische Aspekte von Gesteinsmodellen nur angeschnitten werden. Das vorliegende Datenmaterial gestattet eine erweiterte Auswertung unter theoretischen Aspekten. Dies betrifft besonders die Probleme der Feuchteverteilung und -transporte im Porenraum von Gesteinen und im Besonderen von Marmoren. Dabei sollte der „feuchte poröser Festkörper“ Marmor konsequent als komplexes thermodynamisches System betrachtet werden.

Daher sollen die Untersuchungen an dem Probestein auch nach Projektende weiterlaufen und durch systematische Ultraschallmessungen begleitet werden.

5. Veröffentlichungen und Öffentlichkeitsarbeit

Während der Projektlaufzeit fanden drei Arbeitstreffen zu projektrelevanten Themen in München, Potsdam und Dresden statt, an denen sich mehrere Kollegen aus Deutschland beteiligten. Dabei konnten unterschiedliche Aspekte der Untersuchung und Erhaltung umweltgeschädigter Marmorskulpturen in Parkanlagen diskutiert und Untersuchungs- und Beurteilungsmethoden getestet werden, für deren versuchsweise Anwendung in der denkmalpflegerischen Tagesarbeit kaum Zeit bleibt.

Die Projektzwischenergebnisse wurden 2012 und 2013 auf den in Potsdam stattfindenden Konservierungswissenschaftlichen Kolloquien vorgestellt und diskutiert.

2014 fand das Abschlusskolloquium zum Thema „Erhaltung von Marmorskulpturen unter mitteleuropäischen Umweltbedingungen“ statt, auf dem die Projektergebnisse präsentiert wurden.

Das Arbeitsheft Nummer 32 des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums enthält wesentliche Beiträge zu den wichtigsten Projektergebnissen.

Im Internet sind Informationen über das Projekt, die Arbeitstreffen und das Abschlusskolloquium unter www.fida-potsdam.com zu finden.

6. Zusammenfassung

Das DBU-Projekt „Erarbeitung eines Bewertungs-Leitfadens für Ultraschallmessungen an umweltgeschädigten Marmorskulpturen am Beispiel u.a. des Parks Potsdam Sanssouci (UNESCO-Weltkulturerbe)“ hatte zum Ziel, die zerstörungsfreie Ultraschalldiagnostik zu verbessern, um auch geringe Zustandsveränderungen der Marmorskulpturen in Parkanlagen objektiv beurteilen zu können. Besonderes Augenmerk galt dabei der Erfassung der feuchtebedingten Klimaeinflüsse auf die Ultraschallgeschwindigkeit.

Es konnte gezeigt werden, dass ein quantifizierbarer linearer Zusammenhang zwischen der P-Wellengeschwindigkeit und der absoluten Feuchte im Marmor besteht, die wiederum langfristig von den äußeren Feuchtebedingungen des jeweiligen Objektstandortes abhängig ist.

Mit Hilfe einer einfachen Korrekturformel ist es möglich, feuchtebedingte Einflüsse auf die Ultraschallgeschwindigkeit zu erfassen und so Messungen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt wurden, vergleichbar zu machen.

Im Rahmen des Projektes wurden die Einflüsse der regionalen, lokalen und standortspezifischen Klimabedingungen auf die Ergebnisse der Ultraschallmessungen und die zu erwartenden Fehler untersucht.

Diese Ergebnisse wurden in einem „Leitfaden für Ultraschalluntersuchungen an Marmorskulpturen“ zusammengefasst.

Neben den aus der Ultraschalldiagnostik gewonnenen Aussagen über den aktuellen Gefügestand des Marmors konnte eine Möglichkeit gefunden werden, mit Hilfe der Messung der Kantenabwitterung und der Oberflächenrauigkeit quantifizierbare Aussagen über den Materialverlust und den witterungsbedingten Oberflächenzustand zu erhalten.

Die quantifizierbaren Aussagen des Gefüge- und des Oberflächenzustandes der Marmorskulpturen wurden mit der jeweiligen Standortbeschreibung der Skulpturen, sowie deren quantitativen restauratorischen und kunsthistorischen Beschreibungen verknüpft. Alle Aussagen wurden in „Bewertungskriterien für umweltgeschädigte Marmorskulpturen“ zusammengefasst und eine allgemeine Risikokennziffer für das jeweilige Objekt berechnet.

An mehreren Marmorskulpturen München-Nymphenburg, in Potsdam-Sanssouci und im Großen Garten in Dresden wurden zahlreiche Untersuchungsmethoden und Vorgehensweisen im Rahmen von interdisziplinären Arbeitstreffen getestet und diskutiert.

Es konnte festgestellt werden, dass die Untersuchungsergebnisse gut mit gebräuchlichen geophysikalischen Gesteinsmodellen, wie dem Pore Aspect Ratio – Modell in Übereinstimmung gebracht werden können.

7. Quellen und Literatur

Damjanovic, Sandra (2014): Prüfmethode zur Messung von umweltbedingten Oberflächenveränderungen und Materialverlusten am Marmorskulpturen. In: 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: 45-50.

Dennings, Eberhard (1968): Ergebnisse aus Untersuchungen zum mineralogischen Aufbau von Marmor. Denkmalpflege Baden-Württemberg. Stuttgart.

ICOMOS, International Scientific Committee for Stone (ISCS) (2010):, Illustrated glossary on stone deterioration patterns, English-German Version, 2010; http://www.international.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Icomos_Glossar_deutsch-englisch%5B1%5D.pdf

Köhler, W. (1989):, Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara Marmor in Potsdam Sanssouci, Jahr der Veröffentlichung: 1991, veröffentlicht im Kulturabkommen, Dresden 1991 durch Herausgeber LDA Hannover, S. 50-54

Köhler, W.(1990): Das Französische Figurenrondell im Park Sanssouci. Kurztexzte zur Denkmalpflege; IRB-Bibliothek: DEUBA. MONUFAKT

Köhler, W., Krannich, K. (1981): Untersuchungen zu Schadensursachen an Marmorskulpturen, Herausgeber: Neue Museumskunde Theorie und Praxis der Museumsarbeit 24/4, S. 272-274

Köhler, Wolfram (2014): Leitfaden für Ultraschallmessungen an Marmorskulpturen. In: 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: 37-44.

Lange, Kathrin, Will, Roland (2014): Verwittert-Deponiert-Konservieren-Rekonstruieren? Die 24 Marmorskulpturen von der Fassade der Neuen Kammern im Park Sanssouci. In: 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: 71-81.

Röhler, Hansjürgen (1979): Lehrbuch der Mineralogie. 4. Auflage. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

Snethlage Rolf, Pfanner Michael (2013):. Leitfaden Steinkonservierung. Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart, 2013.

Snethlage, Rolf (2014): Marmorkonservierung: Maßnahmen mit einer Risikokennziffer begründen und entscheiden – Realistischer Wunsch oder Fiktion?. In: 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: 51-70.

Snethlage, Rolf (2014): Skulpturenmarmor – Beispiele-Pore Aspect Ratio-Bewertung mit Ultraschall. In: 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: 21-30.

8. Danksagung

Das DBU-Projekt „Erarbeitung eines Bewertungs-Leitfadens für Ultraschallmessungen an umweltgeschädigten Marmorskulpturen am Beispiel u.a. des Parks Potsdam Sanssouci (UNESCO-Weltkulturerbe)“ wurde nur durch die Unterstützung von Dr. Lutz Töpfer und Dr. Paul Bellendorf möglich, die die Beantragung, die Durchführung und den Abschluss des Projektes mit stetigem Interesse unterstützt und begleitet haben, wofür sich alle Projektbeteiligten bedanken.

Darüber hinaus wäre ein erfolgreicher Projektabschluss ohne die Unterstützung der Stiftung Preußischer Schlösser und Gärten in Berlin/Brandenburg nicht denkbar gewesen. Besonderer Dank gilt dabei dem Chefrestorator Christian Klenner und den Mitarbeitern der Restaurierungswerkstatt für Skulpturen mit ihrer Leiterin Frau Kathrin Lange.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Rolf Sneathlage, der das gesamte Projekt aktiv begleitet und durch zahlreiche Anregungen und kritische Diskussionen bereichert hat. Ohne sein Mitwirken wäre das vorliegende komplexe Projektergebnis nicht denkbar gewesen.

Die interessanten Arbeitstreffen in München, Potsdam und Dresden waren nur durch die Unterstützung der jeweiligen Schlösser- und Gartenverwaltungen und den dort tätigen Restauratoren, Herrn Klaus Häfner (München), Frau Kathrin Lange (Potsdam) und Herrn Frank Hofferick (Dresden) möglich.

Bei dem Brandenburgischen Landesamt für Denkmalpflege und besonders bei Frau Dr. Bärbel Arnold bedanken wir uns für ihre Unterstützung bei der Durchführung unseres Abschlusskolloquiums und der Möglichkeit der Veröffentlichung der Projektergebnisse in einem Arbeitsheft des Landesdenkmalamtes.

Nicht zuletzt gilt der Dank allen Mitgliedern des Forschungsinstitutes für Denkmalpflege und Archäometrie (FIDA e.V.) für ihre aktive Hilfe und Beteiligung an der erfolgreichen Durchführung des Projektes.



(Wolfram Köhler)