

---

ENTWICKLUNG UND ÜBERPRÜFUNG VON EINHAUSUNGSSYSTEMEN  
ZUR REDUZIERUNG UMWELTBEDINGTER SCHÄDIGUNGEN VON  
AUßENEXPONIERTE MARMOROBJEKTEN MIT DEM ZIEL DES LANGFRISTIGEN  
ERHALTS IN SITU AN EINEM NATIONAL BEDEUTENDEN OBJEKTKOMPLEX, DEN  
SCHLOSSBRÜCKENFIGUREN UNTER DEN LINDEN, BERLIN

DBU PROJEKT Nr.: 24000-45

2006 – 2010



## **Antragsteller**

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (SenStadt)  
Abteilung V  
Fehrbelliner Platz 2  
10707 Berlin  
Birgitt Kalthöner  
Tel. 030.9012-4992  
Birgitt.Kalthöner@senstadt.verwalt-berlin.de

Projektleitung und -koordination:  
Landesdenkmalamt Berlin ((LDA)  
Klosterstrasse 47  
10179 Berlin  
Prof. Dr. Jörg Haspel  
Dipl. Rest. York Rieffel M.A.  
Tel. 030.90259-3600 / 3633  
landesdenkmalamt@senstadt.verwalt-berlin.de  
York.Rieffel@senstadt.verwalt-berlin.de

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung  
Ralf-Burkhard Hammelbeck  
Tel. 030.90139-3160  
Ralf.Hammelbeck@senstadt.verwalt-berlin.de

## Kooperationspartner

Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM)  
Fachgruppe VII.1 Baustoffe  
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin  
Dr.-Ing. Frank Weise  
Tel. 030.81043237  
[frank.weise@bam.de](mailto:frank.weise@bam.de)

Technische Universität Dresden (TUD)  
Institut für Bauklimatik  
Zellescher Weg 17, 01069 Dresden  
Dr.-Ing. Rudolf Plagge  
Tel. 0351.463-33756  
[rudolf.plagge@tu-dresden.de](mailto:rudolf.plagge@tu-dresden.de)

Georg-August Universität Göttingen  
Abteilung Strukturgeologie und Geodynamik (GZG)  
Goldschmidtstr. 3, 37077 Göttingen  
Prof. Dr. Siegfried Siegesmund  
Dr. Jörg Rüdrieh  
Tel. 0551.397929  
[ssieges@gwdg.de](mailto:ssieges@gwdg.de) / [joerg.ruedrieh@geo.uni-goettingen.de](mailto:joerg.ruedrieh@geo.uni-goettingen.de)

Entwurf und Konstruktion Prototyp Wintereinhausung  
Universität der Künste (UdK)  
Konstruktives Entwerfen und Tragwerkslehre  
Hardenbergstrasse 33, 10623 Berlin  
Prof. Dr.-Ing. Christoph Gengnagel  
Dipl.-Ing. Holger Alpermann  
[gengnagel@udk-berlin.de](mailto:gengnagel@udk-berlin.de) / [alpermann@udk-berlin.de](mailto:alpermann@udk-berlin.de)

## INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung	5
Gegenstand und Zielsetzung des Projektes	6
 <u>Abschlussbericht Landesdenkmalamt Berlin</u>	
1. Kunstgeschichte und Denkmalbedeutung	11
2. Restaurierungsgeschichte	13
3. Überblick zur Objektgeschichte	20
4. Inspektion und Wartung	22
5. State of the Art der Einhausung von Denkmälern	24
6. Bestands- und Zustandserfassung	35
7. Entwurf und Entwicklung einer innovativen und denkmalgerechten Einhausung	40
8. Fazit	48
9. Literaturverzeichnis	50
10. Abbildungsnachweis	54

### Anhang

Abbildungen, Aufmass, Schadenskartierung mit Schadbildkatalog

### Abschlussberichte

BAM, GZG, TUD, UdK

## **EINLEITUNG**

Im Zentrum Berlins befindet sich am Rande der Pufferzone des UNESCO-Weltkulturerbes Museumsinsel die Schlossbrücke von Karl Friedrich Schinkel mit ihren monumentalen Figurengruppen aus Carrara-Marmor. Die Skulpturen der Berliner Bildhauerschule weisen aufgrund ihrer wechselvollen Geschichte und der exponierten Bewitterungslage umfangreiche Schädigungen auf. Neben einer gesteinsdurchdringenden Rissentfestigung, welche sich lokal in einem feinkörnigen Abzuckern der Oberfläche äußert, ist auch eine ausgeprägte Reliefbildung, bedingt durch oberflächennahe chemische Lösungsvorgänge, zu beobachten. Auffallend ist, dass die Figuren trotz zahlreicher Restaurierungsmaßnahmen bereits wieder starke Verschmutzungen aufweisen, u.a. bedingt durch das hohe Verkehrsaufkommen auf der Straße Unter den Linden mit 32.000 Fahrzeugen täglich. Gasförmige Verbindungen und feste Schmutzpartikel wie Russ, Feinstaub, Gummiabrieb etc. sind neben mikrobiologischer Kolonisation für die Verschmutzung und die Beanspruchung oberflächenaher Bereiche ursächlich. Für die Erhaltung dieser hochwertigen Bildhauerarbeiten am überlieferten Standort besteht daher ein akuter Handlungsbedarf.

Carrara-Marmor gehört in dem Zusammenhang zu den besonders gefährdeten Materialien und bedarf für eine langfristige Erhaltung im Außenbereich der kontinuierlichen Inspektion und Pflege. Aufgrund der herausragenden künstlerischen, geschichtlichen und städtebaulichen Werte ist die kontinuierliche Pflege aller überlieferten Marmor-Skulpturen in Bezug auf den historischen Standortzusammenhang entlang der Straße „Unter den Linden“ ein besonderes konservatorisches Anliegen. Entsprechend wurde vom Landesdenkmalamt Berlin ein Inspektions- und Wartungskonzept für das Skulpturenensemble entwickelt, welches seit 2009 in die Praxis umgesetzt wird und bundesweit in dieser Größenordnung als einmalig gilt. In diesem Pflegekatalog ist auch eine Einhausung der Schlossbrückenskulpturen im Winter vorgesehen, weil empirisch gewonnene Erkenntnisse darauf hindeuten, dass selbst traditionelle Holzeinhausungen die schädigenden Einwirkungen auf die Skulpturen reduzieren können. Eine wissenschaftliche Überprüfung der Änderungen des Feuchtehaushaltes sowie eine Analyse der klimatischen Bedingungen in einer entsprechenden Einhausung und des damit verbundenen Einflusses auf die Verwitterungsprozesse von Marmor stehen bislang jedoch aus. Des Weiteren fand die besonders exponierte Lage von Brückenskulpturen, frei stehend am Brückenrand oberhalb eines fließenden Gewässers, in bisherigen Forschungsarbeiten keine Berücksichtigung.

Für die Marmorskulpturen der Schlossbrücke gilt zusätzlich die Anforderung, dass die Bildwerke für Passanten auch in den Wintermonaten wahrnehmbar sein sollten. Bisher bekannte Einhausungssysteme entbehren bisher wissenschaftlich fundierter Nachweise über eine messbare Schutzwirkung der betroffenen Skulpturen; auch bedarf es einer Lösung für die komplizierten statischen Anforderungen auf einer Brückenanlage.

In einem interdisziplinären Modellvorhaben sollte ein innovatives Wintereinhausungssystem für die auf Vorstellungen Schinkels zurückgehenden Schlossbrückenfiguren an der Einmündung des Boulevards Unter den Linden auf die Spreeinsel entwickelt werden, welches die vielschichtigen Anforderungen an Statik, Ästhetik, Klima und eine praktikable Anwendung erfüllt.

### **GEGENSTAND UND ZIELSETZUNG DES PROJEKTES**

Das Skulpturenensemble der Schlossbrücke im historischen Stadtzentrum Berlins ist ein wesentlicher Bestandteil des Inspektions- und Wartungsprogramms. Für die bisher der winterlichen Witterung schutzlos ausgelieferten Skulpturen wird innerhalb des vom LDA und der Senatsverwaltung initiierten Forschungsprojektes anhand der Figurengruppen 1 bis 3 geprüft, ob Einhausungen – und wenn ja, welche Art – sowohl die schädlichen Umwelteinflüsse reduzieren als auch dem Wunsch entgegenkommen können, die Skulpturen auch in den Wintermonaten für Passanten im Stadtbild zu präsentieren.

Um den hohen konservatorischen, bauphysikalischen, bautechnischen, künstlerischen und stadträumlichen Anforderungen gerecht zu werden und mögliche Lösungen erstmalig umfassend auf ihre Effektivität zu untersuchen, ist die Zusammenarbeit von Denkmalpflegern, Restauratoren, Architekten, Ingenieuren, Geologen, Materialwissenschaftlern und Bauphysikern notwendig. Das durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte Projekt zielt darauf ab, in einem Modellvorhaben mit seinen Partnern, der Technischen Universität Dresden (Institut für Bauklimatik), der Universität Göttingen (Abt. Strukturgeologie und Geodynamik), der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Fachgruppe 7.1, Baustoffe) und unter Beteiligung der Universität der Künste (Fachbereich Konstruktives Entwerfen und Tragwerkslehre) in Berlin, eine innovative und nachhaltige Wintereinhausungskonstruktion auf die besondere Situation der Marmorskulpturen der Schlossbrücke anzupassen und ihre Wirksamkeit zu überprüfen. Europaweit ist kein Einhausungssystem bekannt, das der

erforderlichen komplexen, gestalterischen, bauphysikalischen und statisch-konstruktiven Anforderung genügt. Es soll erstmals eine Konstruktion entworfen werden, welche die hohen ästhetischen Ansprüche an Objekte in exponierten Lagen im Zentrum pulsierender Städte erfüllt. Wünschenswert ist dabei, dass die Skulpturen und ihre herausragende künstlerische Qualität auch im eingehausten Zustand erlebbar bleiben. Die Einhausung der Schlossbrückenskulpturen im Winter zielt auf eine deutliche Reduzierung der Temperaturschwankungen, des Feuchteintrags und der durch den verkehrsbedingten Schadstoffausstoß entstehenden Deposition.

Ein weiterer wesentlicher Teil des Forschungsprojektes bestand darin, in einer umfangreichen wissenschaftlichen Untersuchung eine Wintereinhausung auf ihre Nachhaltigkeit zu überprüfen. Bislang lagen keine wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Wirksamkeit von Wintereinhausungen von Marmorskulpturen vor, wobei sogar ein schädigender Einfluss nicht auszuschließen war. Für diese grundlegende Forschung wurden komplexe wissenschafts-basierte Instrumente, wie spezielle Labor- und Analysetechnologien, numerische Simulationswerkzeuge, Datenbanken und Expertenwissen zum Einsatz. Die Berücksichtigung von Wechselwirkung zwischen Umwelt und Objekten in Verbindung mit den neuartigen Einhausungskonstruktionen erfolgt über ein Klima-Monitoring.

Gegenwärtig wird der winterliche Schutz für Kunst- und Kulturgut in exponierten Lagen, wie auf Brücken oder Attikas, und auf schwer zugänglichem Gelände durch die Eigentümer vernachlässigt, u.a. auch aus ungelösten konstruktiv-statischen Gründen und in Ermangelung eines flexibel einsetzbaren Systems. Daher ist die Entwicklung eines modellierbaren und nachweisbar wirksamen Einhausungssystems für Marmorskulpturen ein wesentlicher Beitrag zur Bewahrung national wertvoller Kulturgüter und zum Ressourcenschutz und stellt damit ein Element nachhaltigen Umweltschutzes dar.

Das Anforderungsprofil für die Anpassung einer Einhausung auf die Situation der Schlossbrückenfiguren betrifft im Wesentlichen zunächst die Statik, da die Windlast für die bis zu 12 Meter hohen Schutzkonstruktionen hohe Festigkeit bei gleichzeitig geringem Eigengewicht erfordert. Zugleich bedingt die exponierte Lage der Brückenskulpturen die Berücksichtigung der städtebaulichen Einbindung der Einhausungen in Bezug auf die Beziehung von Form, Proportion, Materialität. Die Positionierung auf einem Brückenbauwerk macht eine leichte Montierbarkeit und berührungsarme Montage der Einhausungen notwendig. Da es sich um eine temporäre und periodisch wiederkehrende Maßnahme handelt, sind die Betriebskosten im Hinblick auf die Transportierbarkeit und Lagermöglichkeiten zu bedenken. Ein weiterer wichtiger Aspekt stellt die Dauerhaftigkeit

der Konstruktion dar. Dazu gehört die Beständigkeit gegenüber Verschmutzung sowie Vandalismus und Graffiti. Besondere Anforderungen sind auch an die Hülle zu stellen. Hier gilt es, neben der Festigkeit, Verformbarkeit und Fügbarkeit vor allem eine hohe Verwitterungsunempfindlichkeit und UV-Beständigkeit zu gewährleisten, zugleich aber die gewünschte Erlebbarkeit der Figurengruppen durch Transparenz oder Transluzenz der Membran zu ermöglichen. Gleichermaßen muss eine Entflamm- und Brennbarkeit ausgeschlossen werden. Ein weiterer Aspekt einer Systementwicklung besteht darin, einen variablen konstruktiven Aufbau zu gewährleisten und damit eine freie Skalierbarkeit für Skulpturen unterschiedlicher Größe und Form zu ermöglichen.

Zusammenfassend beinhalten die wesentlichen Inhalte des Projektes

- die Ermittlung des „State of the Art“ von Einhausungen im nationalen und internationalen Kontext
- die Erstellung eines Anforderungsprofils an eine innovative temporäre Einhausung
- die Zustandserfassung und Materialcharakterisierung der Brückenskulpturen
- die Messung der klimatischen Bedingungen
- die Bestimmung der hygrothermischen Materialeigenschaften von Naturstein und Membran
- die vergleichende Erfassung des Mikroklimas sowohl der frei bewitterten Objekte als auch einer durch temporäre Holzeinhausung und durch Neueinhausung geschützten Skulptur
- die Entwicklung einer innovativen und denkmalgerechten Einhausung
- die Verwitterungssimulation zur Überprüfung der Wirksamkeit von Einhausungen

Aus konservatorischer Sicht steht der Schutz der Skulpturen vor physikalischen, chemischen und biologischen Umwelteinflüssen im Vordergrund. Hier müssen vor allem die Auswirkungen von Niederschlägen, Temperaturschwankungen und den Strahlungsanteilen auf das Innenklima und in Folge auf den Marmor untersucht und ausgewertet werden.

Das Projekt wurde in sieben Arbeitspakete untergliedert und inhaltlich durch die Projektpartner und der UdK-Berlin bearbeitet.

#### AP 1 Quellenstudium und Datenbankanalyse

Das Arbeitspaket 1 beinhaltete eine Recherche der allgemein üblichen Einhausungen zum Schutz von denkmalgeschützten Objekten und Skulpturen mit einer Ermittlung von Material- und Klimadaten sowie Informationen zu klimaschädlichen Emissionen.

#### AP 2 Materialcharakterisierung und Zustandserfassung

Das Arbeitspaket 2 zielte auf eine qualitative und quantitative Zustandserfassung der Marmorskulpturen. Das beinhaltete eine Schadensanalyse, eine Zustandsbeschreibung und Schadenskartierung sowie eine Ermittlung von Basiswerten zur Wirksamkeit von Einhausungssystemen. Im Wesentlichen wird die mineralogische, gefügekundliche und petrophysikalische Charakterisierung der verwendeten Marmortypen zur Einschätzung der Verwitterungssensibilität und zur Auswahl eines geeigneten Referenzmaterials untersucht. Zudem erfolgt die Aufstellung von Auslagerungskörpern bzw. Referenzobjekten zur Messung der Feuchteaufnahme und Feuchtespeicherung vor Ort sowie die Durchführung von Simulationsstudien zur Beurteilung der Schädigungsprozesse.

#### AP 3 Bestimmung der hygrothermischen Materialeigenschaften

Das Arbeitspaket 3 beinhaltete die Bestimmung der spezifischen Materialeigenschaften der Marmorstatuen anhand von Referenzmaterial aus Carrara-Marmor. Dazu war es erforderlich Materialfunktionen zur Simulation der hygrothermischen Eigenschaften und der Stofftransporte innerhalb der Marmorskulpturen zu ermitteln. Im Einzelnen bedurfte es hierzu der Herstellung geeigneter Auslagerungskörper für die hygrothermische Materialuntersuchung und einer Ermittlung der Materialkennwerte von Marmor sowie unterschiedlicher Einhausungsmaterialien, darüber hinaus einer Freilandexposition des Referenzmarmors.

#### AP 4 Entwicklung einer innovativen Einhausung

Das Arbeitspaket 4 zielte auf den Entwurf, die Planung und die Anpassung einer Einhausung für Brückenskulpturen ab. Das beinhaltete die Erstellung eines Anforderungsprofils in Bezug auf städtebauliche, architektonische, klimatische und statische Anforderungen. Der finale Entwurf des Prototyps wurde einer bauklimatischen Simulation unterzogen und auf statisch-konstruktive Realisierbarkeit geprüft. Hierbei sollte

unter unterschiedlichen außenklimatischen Randbedingungen modelliert werden, wie sich die geplante Einhausung auf die thermischen und hygri-schen Eigenschaften der Skulpturen auswirken wird.

#### AP 5 Klima-Monitoring an den Skulpturen und Einhausungen

Arbeitspaket 5 ermittelte die Klimadaten an den Skulpturen sowie innerhalb und außerhalb der Einhausungen. Dazu war der Aufbau einer Wetterstation erforderlich zur kontinuierlichen Aufzeichnung der relevanten Messgrößen Temperatur und relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlungsparameter. Die Messungen ermöglichten eine Aussage zur hygrothermischen Belastung der Skulpturen mit und ohne Einhausung und lieferten Basiswerte für die Raumklimasimulationen.

#### AP 6 Verwitterungssimulation zur Überprüfung der Wirksamkeit von Einhausungen

Das Arbeitspaket 6 beinhaltet eine Bewertung des Einflusses von Einhausungen auf das Verwitterungsverhalten von Marmor. Dazu wurden Dilatationsmessungen zur Beurteilung des Verwitterungsprozesses und petrophysikalische Analysen zur Überprüfung der Verwitterungsintensitäten durchgeführt.

#### AP 7 Abschluss Dokumentationen

Alle durchgeführten Recherchen, Messungen, Analysen und Simulationen wurden in diesem letzten Arbeitspaket zusammengeführt, ausgewertet und dokumentiert.

Die Ergebnisse sind in den ausführlichen Abschlussberichten der Projektpartner und der UdK-Berlin dokumentiert und befinden sich in der Anlage.

Diese beinhalteten die Berichte der

- BAM vom 24.01.2011  
Autoren: Dipl.-Ing. Stefan Pierskawetz, Dr. Frank Weise
- GZG vom 29.11.2010  
Autoren: Dr. Jörg Rüdric, Prof. Dr. Siegfried Siegesmund
- TU-Dresden vom 31.01.2011  
Autoren: Dr.-Ing. Rudolf Plagge, Dipl.-Ing. Christian Conrad, Dipl.-Ing. Heiko Fechner, Dipl.-Ing. Philipp Heinze, Cand.-Ing. Sören Klose, Dipl.-Ing. Uwe Meinold, Dipl.-Ing.(FH) Frank Meissner, Dipl.-Ing. Ulrich Ruisinger, MSc. Jianghua Zhao
- Universität der Künste vom 23.12.2009  
Autoren: Prof. Dr.-Ing. Christoph Gengnagel, Dipl.-Ing. Holger Alpermann
- Landesdenkmalamt Berlin vom 28.01.2011  
Autoren: York Rieffel et al.

Weiterhin konnten 2010 erste Ergebnisse in einer internationalen Publikation einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden:

Joerg Ruedrich, York Rieffel, Stephan Pirskawetz, Holger Alpermann, Ute Joksch, Christoph Gengnagel, Frank Weise, Rudolph Plagge, Jianhua Zhao & Siegfried Siegesmund (2010) Development and assessment of protective winter covers for marble statuary of the Schlossbruecke, Berlin (Germany)

## **ABSCHLUSSBERICHT LANDESDENKMALAMT BERLIN**

### **1. KUNSTGESCHICHTE UND DENKMALBEDEUTUNG**

Die Schlossbrücke Unter den Linden wurde nach einem Entwurf von Karl Friedrich Schinkel 1822-24 im Stil des Klassizismus errichtet. Die Brücke überspannt den Spreekanal mit drei gewölbten Öffnungen. Bis 1821 befand sich an dieser Stelle die "Hundebrücke", eine einfache Holzbrücke. Erst durch Schinkels Plan von 1819 wurde eine repräsentative Verbindung von Schlossplatz und Lustgarten mit der Straße Unter den Linden ermöglicht und im Sinne einer „via triumphalis“, die am Brandenburger Tor beginnende Straße zum Schloss axial verlängert. Damit erhielt die Magistrale ihre bis heute gültige Prägung: als Pendant zum Brandenburger Tor im Westen entstanden das Friedrichsdenkmal mit dem Forum um die Neue Wache und die Schlossbrücke im Osten als krönender Abschluss der Linden und als Entree zum Schlossareal. (Abb.1)

Die beiden seitlichen Öffnungen der dreibogigen Gewölbebrücke haben eine Lichtweite von je 11,2 Metern. Die 7,64 Meter weite Mittelöffnung bestand ursprünglich aus einer Klappbrücke für die Schiffspassage und wurde 1912 umgebaut. Der Mauerwerksbau ist mit Werkstein, Gusseisen, Granit und Marmor verkleidet. Die gusseiserne Brüstung wird auf jeder Seite von vier Steinpostamenten untergliedert und zeigt Darstellungen von Seepferdchen, Delphinen und Tritonen.

Auf hohen Postamenten befinden sich insgesamt acht Figurengruppen aus Carrara-Marmor (Handelsbezeichnung: Bianco Carrara C), die in Anlehnung an die Entwürfe Schinkels 1842-57 von Bildhauern der Schadow- und Rauch-Schule ausgeführt und aufgestellt wurden und damit die Konzeption Schinkels vollendeten (Abb.5-12). Die überlebensgroßen Figurengruppen - antike Göttinnen mit jungen Kriegern - und

Medaillon-Reliefs mit preußischem Adler an den Sockeln erinnern an den Kampf und Tod junger Helden in den Befreiungskriegen.

Aufstellung der Figurengruppen auf der Südseite (W>O, Abb.5-8)

Fig.1: Emil Wolff (1847): Nike lehrt den Knaben Heldensagen

Fig.2: Hermann Schievelbein (1853): Athena unterrichtet den Jüngling im Waffengebrauch

Fig.3: Carl Heinrich Möller (1851): Athena bewaffnet den Krieger

Fig.4: Friedrich Drake (1853): Nike krönt den Sieger



Linden (O)

Linden (W)



Aufstellung der Figurengruppen auf der Nordseite (W>O, Abb.9-12)

Fig.5: Ludwig Wichmann (1853): Nike richtet den Verwundeten auf

Fig.6: Albert Wolff (1853): Der Jüngling wird von Athena in neuen Kampf geführt

Fig.7: Gustav Bläser (1854): Der junge Held wird von Athena beschützt

Fig.8: August Wredow (1857): Der siegreich Gefallene wird von Iris zum Olymp geführt

Das Ensemble der Brückenfiguren aus Carrara-Marmor erinnert an die Engelsbrücke in Rom und gilt als herausragendes Beispiel der Berliner Bildhauerschule des 19. Jahrhunderts, welche europaweites Ansehen erlangte. Die Bildhauerei galt als eine wichtige Kunst bzw. Denkmalkunst, welche auch Aufgaben von höchstem Staatsinteresse ausführte. Die Figuren der Schlossbrücke gehören - auch im internationalen Vergleich - zu den aufwändigsten Skulpturen-Ensembles des mittleren 19. Jahrhunderts. Schinkel schrieb über sein Konzept: "Der Gegenstand erfordert [...] viel Zeit zur Bearbeitung und viel Nachdenken, da hier besonders das Ästhetische der Hauptzweck wird [...]." (Rave 1948)

Mit ihren monumentalen Figurenensembles bildet die Brücke den Auftakt zu dem auf Schinkel, Schadow und Rauch zurückgehenden Skulpturenprogramm. Zusammen mit den Standbildern der Generäle Scharnhorst und Bülow sowie Blücher, Gneisenau und Yorck vor und gegenüber der Neuen Wache bildete sie einen Teil des als Siegesallee, als "via triumphalis", aufgefassten Hauptstraßenzugs der Stadt, dessen „Konzept eines Jahrzehnts in Europa ihres gleichen sucht“ (Denkmaltopographie Bundesrepublik Deutschland 2003). Die Schlossbrücke flankiert heute eine pulsierende Großstadtstraße in der Pufferzone der zum Weltkulturerbe gehörenden Museumsinsel mit hohem Touristen- und Verkehrsaufkommen. Sie trug zu Zeiten der ehemaligen DDR den Namen Marx-Engels-Brücke. Als herausragendes Berliner Geschichts- und Kunstdenkmal und als monumentales Entree zur Schlossinsel mit Lustgaren und Welterbestätte Museumsinsel repräsentieren die Schlossbrücke und ihr Skulpturenschmuck ein Bau- und Bildwerk von singulärem Rang.

## **2. RESTAURIERUNGSGESCHICHTE**

Die Lage der Brücke im Zentrum der Stadt führte dazu, dass sie seit ihrer Erbauung besonders im Fokus der Öffentlichkeit steht und die Figuren eine viel beachtete Rezeptions- und Restaurierungsgeschichte aufweisen.

Bereits unmittelbar nach der Aufstellung der Figuren, in den Jahren zwischen 1855 und 1860, erfolgte als vorbeugender Schutz eine Wasserglastränkung.<sup>1</sup> Diese Maßnahme sollte die Figuren „den Einwirkungen der Luft entziehen, sie vor dem Verwittern schützen [...]“<sup>2</sup> und die Marmoroberfläche erhärten und glätten, um die Verschmutzungsgefahr zu reduzieren. Schon 1868 wurde zur Wasserglasfestigung in einem Schriftwechsel kritisch

---

<sup>1</sup> GStA HA Rep. 93 B 1396

<sup>2</sup> Zeitschrift für Bauwesen 1857

angemerkt, dass „bei den dichteren Marmorstatuen wie bei den Statuen auf der Schlossbrücke [...] kein Wasserglas eindringen also auch nicht wirken“<sup>3</sup> kann. Um die selbe Zeit gab es im Handel zwei Sorten von Wasserglas, das Kali-Wasserglas und das Natron-Wasserglas. Welches für die Tränkung der Figurengruppen verwendet wurde, bleibt ungeklärt, doch es gibt Indizien, die für die Verwendung von Natron-Wasserglas sprechen. Aus einem Artikel der „Deutschen Bauzeitung“<sup>4</sup> geht hervor, dass Natron-Wasserglas eine dünnere Flüssigkeit ergibt und besser und tiefer in feine Poren des Gesteins eindringen kann. Da man Natron-Wasserglas als besser geeignet für dichteres Gestein ansah, wurde es vermutlich für die Festigung an den Schlossbrückenfiguren verwendet. Die Wasserglastränkung als Schutzmittel wurde sehr unterschiedlich bewertet, und gegen Ende des 19. Jahrhunderts häuften sich die Kritiken an der Methode. Friedrich Wilhelm Rathgen suchte nach Möglichkeiten, die Wirkung der Luft, und damit den Angriff von Kohlensäure auf das Gestein, zu unterbinden. An getränkten Probekörpern durchgeführte Bewitterungsversuche mit verschiedenen Wassergläsern an Gesteinsproben von Carrara-Marmor zweiter Güte ergaben, dass die schützende Wirkung von Wasserglas nur von kurzer Dauer (wenige Monaten) ist und die Tränkung dem weißen Marmor einen Stich ins Gelbliche verleiht.<sup>5</sup>

Ebenfalls als vorbeugende Schutzmaßnahme behandelte man die Figuren bis 1916 in Zeitabschnitten von etwa drei Jahren mit einer Wachsemulsion (Wachs gelöst in einem Gemisch von Alkanen, der so genannten „Weberschen Wachsemulsion“). Eine Lösung aus reinem gebleichtem Bienenwachs in einem Kilo Xylol könnte ebenfalls angewendet worden sein (Rathgen 1926). In den Jahren von 1881 bis 1891 wurden regelmäßig eine Reinigung mit venezianischer Seife (verseiftes Olivenöl) und die Behandlung von Rissen durchgeführt. Die in „bestem carrarischem Marmor zweiter Qualität (ravacione)“ (Goralczyk et al. 1988) ausgeführten Skulpturen zeigten bereits 1877 – wohl in Verbindung mit einer zunehmenden Luftverschmutzung in der Berliner Innenstadt – „die ungünstigsten Einwirkungen des Klimas“ (Berlin und seine Bauten 1884), so dass 1892 empfohlen wurde, die Figuren in Erz zu ersetzen (Springer 1981).

Bis 1943 sind bisher keine weiteren Maßnahmen an den Figuren nachgewiesen, jedoch wird aus der vergleichenden Betrachtung historischer Fotos deutlich, dass regelmäßige Reinigungs- und Pflegemaßnahmen offenbar nach 1918 nicht mehr stattgefunden haben. Die Figuren zeigen einen zunehmend schlechten Zustand mit starken partiellen Verschwärzungen. 1943 wurden die Skulpturen zum Schutz vor

<sup>3</sup> GStA HA Rep. 93 B 1396, Schreiben von Kunheim 1868

<sup>4</sup> Deutsche Bauzeitung 2, 1868, Seite 509

<sup>5</sup> Deutsche Bauzeitung 2, 1868, Seite 510

Kriegsschäden demontiert und in Holzverschalungen an verschiedenen Orten im Westteil der Stadt gelagert (Borsig Gelände und Westhafen).

Die originalen Postamente der acht Figurengruppen aus schlesischem Marmor wurden im Krieg schwer beschädigt und sind in den 1950er Jahren durch Sandstein-Postamente ersetzt worden. Diese als Provisorium gedachten Postamente wurden 1983 mit bulgarischem Marmor als hinterlüftete Verblender vor einem Betonkern erneuert.

Die schlechten Lagerbedingungen führten bis in die 1960er Jahre zu einer erheblichen Schädigung der Skulpturen, wie u. a. zu abgebrochenen Teilen und starken Verschwärzungen. Überlegungen zur Rückgabe der Figurengruppen an die DDR für eine Aufstellung an ihrem ursprünglichen Standort führten zur Planung einer Zusammenführung aller acht Gruppen auf einen extra für sie hergerichteten Platz in der Seydlitzstraße. Die Rückgabe an die DDR sollte im Zuge eines Tausches gegen Kunstgegenstände aus dem Tegeler Schloss vollzogen werden.

*„Nimmt man an, dass der Osten im Austauschwege alle geforderten Kunstgegenstände aus Schloss Tegel oder nur einige zurückgibt, dann dürfte es sich sicher um die ursprünglichen einwandfreien Stücke handeln. Es wäre dann m.E. aus optischen Gründen nicht angängig, dem Osten die Kriegergruppen in Bruchstücken anzuliefern, da man befürchten muss, dass der Westen heftiger Kritik ausgesetzt wird.“<sup>6</sup>*



Abb.13 Schlossbrückenfiguren 1, 5, 6,7 auf dem Borsiggelände um 1957

<sup>6</sup> Vermerk vom 08.03.1965 an SenBauWohn von Konwiarz, in: Landesdenkmalamt Berlin, Archiv: Stadtbildpflege-Ordner, Handapparat; vgl. Friedmann, Katie (2007) Die Restaurierungsgeschichte der Schlossbrückenfiguren – Literatur- und Quellenrecherche mit Schadensfortschrittanalyse. Unveröffentlichte Seminararbeit, FH Potsdam 2008

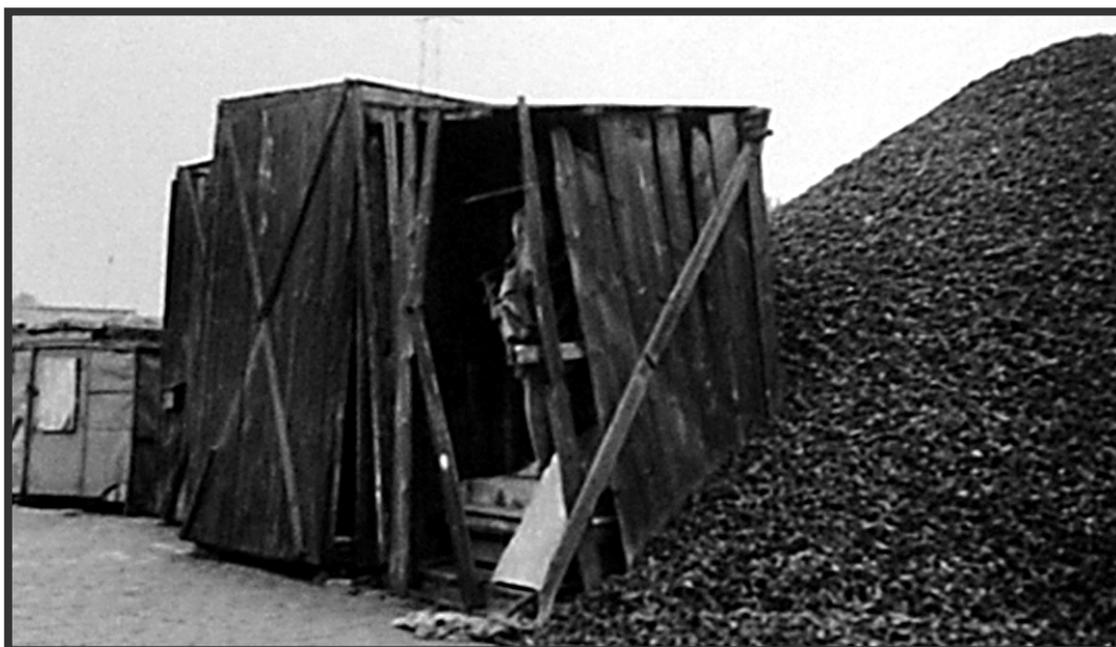


Abb.13, 14 Schlossbrückenfiguren 1, 5, 6,7 auf dem Borsiggelände um 1957 und Figurengruppe 4 im Westhafen um 1960

Die Figurengruppen wurden für die geplante Rückgabe an die DDR durch den Westberliner Bildhauer Harald Haacke zwischen 1966 und 1972 zusammengesetzt und restauriert. In den Unterlagen des Landesdenkmalamtes Berlin (LDA Berlin) finden sich mehrere Angebote und Rechnungen Haackes zur Restaurierung der Schlossbrückenfiguren sowie Fotos und andere Unterlagen, aus denen sich der Zustand der Figuren weitgehend nachvollziehen lässt.<sup>7</sup> Von den erwähnten Restaurierungsmaßnahmen sind keine Dokumentationen im Landesdenkmalamt oder in der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung nachweisbar. Doch anhand von Rechnungen, die Harald Haacke nach der Ausführung gestellt hat, lassen sich Rückschlüsse auf die durchgeführten Maßnahmen und auf den angetroffenen Vorzustand ziehen. Die Restaurierung beinhaltete vorwiegend das Befestigen von abgebrochenen Gliedmaßen und die Nachbildung von verloren gegangenen Partien. Vorhandene Teile waren „mit Dübeln und Kitt zu befestigen“<sup>8</sup>. Verlorene Teile wurden in Marmor ergänzt, indem sie zunächst in Gips modelliert und dann in Carrara-Marmor ausgearbeitet wurden. Untersuchungen, die bei der späteren Restaurierung Anfang der 1980er Jahre durchgeführt wurden, lieferten in zwei Proben an einer Ergänzung der Figurengruppe 7

<sup>7</sup> Kostenangebot vom 1.3.1966 von Bildhauer Harald Haacke, in Landesdenkmalamt Berlin Archiv: Stadtbildpflege-Ordner, Handapparat

<sup>8</sup> Kostenangebot vom 1.3.1966 von Bildhauer Harald Haacke, in Landesdenkmalamt Berlin Archiv: Stadtbildpflege-Ordner, Handapparat

den Nachweis des Pigmentes Kreide mit Schwarzanteilen und von synthetisch-organischen Polymeren (latexartiges Farbmateriale) als Bindemittel.<sup>9</sup> Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die ergänzten Teile möglicherweise farblich dem ungereinigten Marmor angepasst wurden. Der Palmenzweig der Iris der Gruppe 8 wurde in Gips modelliert, in Bronze gegossen und befestigt. Auf Fotografien, die später vor dem zwischenzeitlich als „Lapidarium“ genutzten Abwasserpumpwerk am Landwehrkanal in Kreuzberg aufgenommen wurden, fehlt dieser Palmenzweig allerdings. Konservierungsmaßnahmen erfolgten nur vereinzelt. Die Reinigung der Gruppen ist als Position in einer Kostenaufstellung von März 1966 aufgeführt, es gibt jedoch keinen Hinweis auf eine Durchführung. Zudem zeigen Fotografien die Gruppen vor der Überführung nach Berlin (Ost) in stark verschmutzten Zustand (Abb.17). Der Bildhauer Harald Haacke und seine Gehilfen verwendeten für die Rekonstruktionen an vier der acht Marmorgruppen den Marmor eines anderen Denkmals.<sup>10</sup>

Ab 1978 erfolgte die Lagerung der der Skulpturen im „Lapidarium“ als Schutzmaßnahme gegen Bewitterung, ehe die Figurengruppen aus Westberlin in die DDR bzw. auf die Schlossbrücke im ehemaligen Ostteil der Stadt zurückgeführt wurden (Abb.15).

Anlässlich der Rückführung veranlasste Prof. Dr. Helmut Engel, zu dem Zeitpunkt Landeskonservator in Berlin (West), die Anfertigung von vier Gipsabgüssen zur Präsentation im Westteil der Stadt. Da sie den Zustand vor der geplanten Restaurierung, die Anfang der 1980er Jahre durchgeführt wurde, zeigen, sind diese Abgüsse für die Restaurierung und deren Dokumentation von großem Wert.<sup>11</sup>

Im Jahr der Rückgabe der Figurengruppen gab es im Martin-Gropius-Bau Berlin zwei Ausstellungen: März bis Mai 1981: Karl Friedrich Schinkel – Werke und Wirkungen; August bis November 1981: Preußen – Versuch einer Bilanz.<sup>12</sup> Dort wurden jeweils zwei Abgüsse der Schinkelschen Schlossbrückenfigurengruppen präsentiert und anschließend (1982 bis 1997) im Nordtreppenhaus des Martin-Gropius-Baus aufgestellt.<sup>13</sup> Später gelangten sie in das Depot des Deutschen Historischen Museums (DHM) in Spandau, wo sie sich bis zum heutigen Tage befinden (Abb.16, Abgüsse der Figuren Nr. 2, 3, 6 und 8).

<sup>9</sup> Goralczyk, Peter u.a. (1988, Seite 53).

<sup>10</sup> Nach Springer (1981) handelte es sich um das Marmorstandbild Friedrich Schillers von Reinhold Begas, das (1871 bis 1936 und wieder seit 1988) vor Schinkels Schauspielhaus auf dem Gendarmenmarkt steht und dessen heute als verschollen geltender Sockel als Material in Frage gekommen sein könnte.

<sup>11</sup> Brief: 17.3.97 an Frau Olthoff/ Büro Steiner, gez. in Landesdenkmalamt Berlin Archiv: Stadtbildpflege-Ordner, Handapparat

<sup>12</sup> [http://www.berlinerfestspiele.de/de/aktuell/festivals/11\\_gropiusbau/mgb\\_04\\_rueckblick/mgb\\_rueckblick\\_ausstellungen/mgb\\_rueckblick.php#mgb\\_1999](http://www.berlinerfestspiele.de/de/aktuell/festivals/11_gropiusbau/mgb_04_rueckblick/mgb_rueckblick_ausstellungen/mgb_rueckblick.php#mgb_1999) (2. Januar 2008, 17 Uhr).

<sup>13</sup> Brief: 17.3.97 an Frau Olthoff/ Büro Steiner, gez. Hesse in Landesdenkmalamt Berlin Archiv: Stadtbildpflege-Ordner, Handapparat

1984 sollten zur Bestandssicherung Gipskopien mit Hilfe von Silikonkautschukformen von den noch nicht abgeformten vier Figurengruppen hergestellt werden. Die Herstellung der Abgüsse und deren Verbleib sind nicht geklärt.

1981 wurden die acht Schlossbrückenfiguren nach Berlin (Ost) zurückgeführt (Abb.17, 18). Auf Veranlassung des damaligen Leiters des Instituts für Denkmalpflege, Herrn Prof. Deiters, wurde vor der eigentlichen Restaurierung erstmals eine naturwissenschaftliche Untersuchung an den Objekten durchgeführt. Im Zuge der darauf folgenden umfangreichen Maßnahmen durch VEB Stuck und Naturstein erfolgte die Reinigung der Skulpturen und es gibt Hinweise darauf, dass dabei hartnäckig anhaftende Verschmutzungen und Krusten auch mechanisch abgeschliffen wurden (Schriftverkehr Handapparat des LDA Berlin). Kleine Fehlstellen wurden mit Polyesterharz ergänzt und die Marmoroberflächen abschließend mit Silikonharz gefestigt und hydrophobiert. Ein Jahr nach der Wiederaufstellung am ursprünglichen Standort 1983/84 erfolgte eine erneute partielle Hydrophobierung. (Goralczyk 1988) Die Restaurierungsmaßnahmen wurden in mehreren Bänden schriftlich und fotografisch dokumentiert (mündl. Mitteilung Herr Klimes 2008). Deren Verbleib ist jedoch ungeklärt. Nur noch anhand einer Auswertung des Schriftverkehrs (Handapparat LDA Berlin) lassen sich die Maßnahmen nachvollziehen und sind in der Objekt- und Restaurierungsgeschichte zur Schlossbrücke (LDA) dokumentiert.

Die in den 1950er Jahren durch Sandstein ersetzten originalen Marmorpostamente (Abb.3), wurden 1983 (bereits deutlich verwittert) abgebaut und zur Wiederverwendung eingelagert. Es erfolgte im selben Jahr eine vollständige Erneuerung der Postamente mit bulgarischem Marmor (Handelsbezeichnung: Sandanski Ermilovez). Für die Vorder- und Rückseiten der Postamente wurden Massivquader verwendet, für die Seitenflächen Plattenbekleidungen. Der „Kern [des Postamentes] besteht aus Betonfertigteilen, dabei entsprechen die Schichthöhen der Betonquader denen des Marmors und enthalten durchgehende Dübel, versetzt angeordnet bis in die unteren Sockel reichend. Die Natursteinelemente sind hinterlüftet versetzt, um eine enge Verbindung und somit Zementausblühungen zu vermeiden. Sie sind mittels Edelstahlhalte- und Trageankern am Betonkern befestigt. (...) Die Fugen wurden mit Weißzement und Quarzsand geschlossen“ (Handapparat Archiv LDA, Leistungsbeschreibung Natursteinarbeiten Marx-Engels-Brücke, ohne Datum). Der Sockelunterbau besteht aus z.T. noch bauzeitlichem schwedischem Granit (Tranas).

1992/93 zeigten sich im Rahmen einer Restaurierung die Versprödung des Polyesterharzes und lokal eine starke netzartige Rissbildung an der Marmoroberfläche. Es folgte der Versuch, die Silikonharzüberzüge mittels Partikelstrahlverfahren zu entfernen. Risse wurden partiell mit einem Epoxidharz geschlossen und verklebt, außerdem die Skulpturen laut Restaurierungsbericht mit einer Lösung aus Paraloid B72 überzogen, an stark porösen Stellen auch mehrfach.<sup>14</sup>

Seit 2006 erfolgten umfangreiche naturwissenschaftliche Untersuchungen zur Ermittlung des Erhaltungszustandes an den Figurengruppen. Ergänzend ermittelten eine Seminar- und eine Diplomarbeit (Friedmann 2008, Nägl 2008) die Restaurierungsgeschichte. Demnach wurden die Marmorskulpturen seit ihrer Aufstellung und bei allen nachweisbaren Interventionen mit den zeitgemäß zur Verfügung stehenden Konservierungsmitteln behandelt. Daher ist es - sowohl für das Forschungsprojekt als auch für die zukünftige denkmalpflegerisch-konservatorische Betreuung - grundsätzlich von Bedeutung, dass es sich bei den Marmorfiguren nicht mehr um ein rein mineralisches Gefüge handelt und dass alle künftigen Erhaltungs- und Restaurierungsmaßnahmen dieser Tatsache im Interesse der Nachhaltigkeit Rechnung tragen müssen.

Die 2007 bis 2010 durchgeführte Restaurierung der acht Figurengruppen basierte auf einer Minimalintervention. Sie berücksichtigte die vorangegangenen Maßnahmen und orientierte sich bei der Wahl der Verfahren und Konservierungsmittel in hohem Maße am Interesse einer beständigen Erhaltungsstrategie.<sup>15</sup> Zunächst wurden die Marmorfiguren mit Heißdampf gereinigt und fest sitzende Verschmutzungen sowie Krusten mechanisch bzw. mit Mikrotrockenstrahlmethode entfernt. Nach der Entfernung von schadhafte Altergänzungen, Kittungen und Antragungen erfolgte deren Ergänzung mit Acrylatmörtel unter Zugabe von Marmormehlen und die punktuelle Klebung von Schalen. Risse wurden mit Paraloid B72 unter Zugabe von Marmormehl verfüllt, fehlende, schadhafte oder defekte Vierungen erneuert und in Farbe sowie Textur dem umgebenden Original angepasst. Bereiche mit oberflächiger Gefügeauflösung bzw. rissnetzartigen Ablösungen erhielten eine Marmormehl-Schlämme, um eine geschlossene Oberfläche herzustellen. Bei der Reinigung des Granitsockels wurde vergleichbar vorgegangen. Die Postamente und Granitsockel sind nach der Reinigung ergänzt und neu verfugt worden. Nach der Restaurierung erfolgte der Auftrag des temporären Graffitischutzes PSS 20 auf den Postamenten. Kleinere bildhauerische Ergänzungen erhielten die Figurengruppen 1, 2, 5

<sup>14</sup> für die detaillierte Beschreibung der Maßnahmen von 1992/94 siehe auch Anlage Restaurierungsgeschichte zur Schlossbrücke – Maßnahmen 1992 und 1994 mit Auszügen aus den Restaurierungsberichten Mühlenbein & Schelkle und Bluhm/Schötschel

<sup>15</sup> für die detaillierte Beschreibung der Maßnahmen von 2007-2010 siehe auch Restaurierungsgeschichte zur Schlossbrücke und die Dokumentation der Restaurierung, Fa, Bauer-Bornemann 2008 und 2010; Standort Archiv LDA

und 7, größere Ergänzungen sind an den Figuren 4 und 8 geplant. Vom LDA Berlin ist eine umfangreiche Quellen- und Fotosammlung zur Objekt- und Restaurierungsgeschichte der Schlossbrücke erstellt worden. Komplettiert wird der Wissensstand durch eine Seminararbeit an der FH-Potsdam (Katie Friedmann 2007).

### 3. ÜBERBLICK ZUR OBJEKTGESCHICHTE

<b>von</b>	<b>bis</b>	<b>Ereignis/Maßnahme</b>
1819		Entwurf der Schlossbrücke von Karl Friedrich Schinkel
1821	1824	Bauausführung (zwei massive Bögen zu beiden Seiten, Klappbrücke in der Mitte), Eröffnung der unvollendeten Brücke 1823
1842	1857	Figurengruppen auf den Postamenten von verschiedenen Künstlern (s.o.) in Anlehnung an Entwürfe Schinkels ausgeführt, unter der Leitung des Generaldirektors der Berliner Museen I. F. Olfers
1892		Umbau der Pfeiler begonnen (Lieferung von Plagwitzer Werkstein zum Ausbessern der Pfeiler)
1912		In der mittleren Durchfahrt werden die Klappen durch massiven Bogen in Stahlbetonbauweise ersetzt
1926	1927	Umbau des östlichen Seitenbogens; Postament mit Wredows Gruppe abgetragen (Friedmann 2008)
1938		Umbau des westlichen Seitenbogens
1943		Figurengruppen in Kisten verpackt und ausgelagert nach Westberlin (eine am Ufer der Havel in Spandau, drei am Westhafen, vier am Eisenhammerweg, Borsig-Gelände)
1944		Sockel der Figur Nr. 3 völlig zerstört (Friedmann 2008)
1945		Brücke kriegsbeschädigt, starke Zerstörungen, stellenweise Gewölbe durchgeschlagen
1950		Wiederherstellung der Brücke (Gewölbe)

1951		Wiederherstellung von Geländer und Sockeln aus Cottaer-Sandstein, Umbenennung der Brücke in Marx-Engels-Brücke am 1. Mai 1951, Abnahme der Adler-Medaillons
1955		Umbau?
1958	1961	Instandsetzung von Geländer u. Sandsteinverkleidung
1965		Überführung von vier Figuren aus dem Tegeler Hafen auf einen Lagerplatz des Senats (Seydlitzstr. Moabit), wo die je 4 Tonnen schweren Figuren ein Schutzdach erhalten haben (Baugeschichte in: Marx-Engels-Brücke 1978-1982). Feststellung, dass an der Figur von Bläser fehlende Teile in Gips modelliert und danach neu in Stein ausgeführt werden müssen
1978		Umlagerung der Figuren ins Depot („Lapidarium“) nach Berlin-Kreuzberg
1981		Rückführung der acht Figuren der Schlossbrücke im Mai nach Ost-Berlin. Für den ersten Transporttermin am 30.4.1981 wurde den vier Nikefiguren die Flügel abgenommen, um sie durch die Türen des Bodemuseums transportieren zu können. Ab dem 20.5.1981 wurden sechs Figuren in der Kuppel des Bodemuseums gelagert, zwei auf der Ostseite der Nationalgalerie.
1983		Abbau der schadhaften Sandstein-Postamente
1983	1984	Wiederaufstellung der Figurengruppen in zwei Etappen (20. September 1983 die Figuren 5-8 und 26. April 1984 die Figuren 1-4)
1983	1984	Aufstellung historisch nachempfundener Lampen. Die Brücke wird mit Geländer, Sockeln mit Figurengruppen und Beleuchtung unter Denkmalschutz gestellt
1985		Pflegemaßnahmen an den Schlossbrückenfiguren
1985		Umbau
1991		Antigrafitti-Schutz der Sockel (Nägl 2008)
1992		Fotogrammetrische Aufnahmen der Figuren 1-8, allseitig

1992		Restaurierung der Schlossbrückenfiguren 5-8
1993		Restaurierung der Schlossbrückenfiguren 1-4
1993		Ultraschallmessungen an den Figuren 5-8
1994		Reinigung der Figuren 5-8
1994		Restaurierung der Brückengeländer
2006		Erstellung von allseitigen Messbildern der Figuren 1-8
<b>2006</b>	<b>2010</b>	<b>DBU – Forschungsprojekt Wintereinhausung</b>
2006	2008	Naturwissenschaftliche Analysen
2007	2008	Ultraschallmessungen
2007	2008	Reinigung und Konservierung der Figuren 1-3
2009	2010	Reinigung und Konservierung der Figuren 4-8
seit 2010		Regelmäßige Inspektion und Wartung

Ein Blick auf die Bestands- und Restaurierungsgeschichte der Schlossbrückenfiguren zeigt, dass es bereits im 19. Jahrhundert üblich war, den Verfall der Skulpturen nicht nur mit chemischen Substanzen, sondern auch mit einer regelmäßigen Reinigung und Pflege aufzuhalten. Diese vorbeugende Substanzerhaltung wurde jedoch im 20. Jahrhundert immer seltener praktiziert. Angesichts der zunehmenden Kenntnisse über Folgeprobleme beim Einsatz chemischer Konservierungsstoffe in der Steinerhaltung gewinnt heute die präventive Konservierung vor allem unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit enorm an Bedeutung. Dazu gibt es in Europa etliche richtungweisende und nachahmenswerte Vorbilder (Monumentenwacht Nederland, PRECOM<sup>3</sup>OS, National Trust, Castelli 1997; Accardo et al. 2003, GCI Newsletter 2007).

#### 4. INSPEKTION UND WARTUNG

Die Bewahrung des Denkmals in seinem materiellen und ideellen Bestand, d.h. im Reichtum seiner kontextuellen Bezüge, ist die wichtigste Aufgabe moderner Denkmalpflege. Das Kulturdenkmal kann aber mit seiner historischen Botschaft nur für die Zukunft erhalten werden, wenn mit der Sicherung der vorhandenen Substanz die erhaltungswürdigen Werte möglichst umfassend und ungekürzt bewahrt und in die Gegenwart eingebunden werden. Eine wesentliche Aufgabe der staatlichen Denkmalpflege, die Pflege und Unterhaltung der öffentlichen Denkmäler, wird heute vernachlässigt und wenn überhaupt nur unzureichend betrieben. Im Gegensatz dazu wurden die Berliner Marmorstandbilder in öffentlicher Hand bis zum Ersten Weltkrieg regelmäßig gepflegt (Rathgen 1926). Die systematische Umsetzung eines wesentlichen Erhaltungsinstrumentes präventiver Denkmalpflege, Inspektion und Wartung, hat der Landeshaushalt nicht vorgesehen und in der Folge werden die Denkmäler erst bei offensichtlicher Gefährdung oder Schädigung in immer kürzeren Intervallen mit hohem restauratorischem Aufwand instand gesetzt, um sie nach den Restaurierungsmaßnahmen sich selbst zu überlassen.

Die Akzeptanz der öffentlichen Denkmäler ist in Deutschland gegenwärtig nur gering ausgeprägt. Eine systematische Erfassung der Objekte, wie in England bereits seit 1991 üblich (Public Monuments and Sculpture Association: National Recording Project), existiert nicht. Jüngere Untersuchungen in den USA zum Erhaltungszustand von öffentlichem Kunst- und Kulturgut (SOS! Save Outdoor Sculptures) ergaben, dass von den über 30.000(!) erfassten Objekten sich bereits 54% aufgrund von Vernachlässigung in einem kritischen Erhaltungszustand befinden und dringender Handlungsbedarf geboten ist. (GCI Newsletter 22.02.2007; Modern and Contemporary Outdoor Sculpture Conservation: Challenges and Advances)

Ausbleibende Pflege erfordert nachweisbar in immer kürzeren Intervallen die Notwendigkeit von z.T. umfangreichen restauratorischen Eingriffen an den Bronze- und Marmorstandbildern in Berlin. Aufgrund dieser Tatsache sieht sich das Landesdenkmalamt Berlin veranlasst, die nachhaltige Pflege der öffentlichen Standbilder im Zentrum der Stadt wegen ihrer herausragenden künstlerischen, geschichtlichen und städtebaulichen Werte zu einem Pilotprojekt zu erklären mit dem Ziel, den national bedeutenden Objektkomplex „Unter den Linden“ mit der Schlossbrücke in der Peripherie des Weltkulturerbes der Museumsinsel langfristig für die Allgemeinheit als authentische Substanz in situ zu erhalten. Das durch die Amtsrestaurierung des Landesdenkmalamtes Berlin entwickelte und bundesweit bisher einmalige Wartungskonzept wurde 2009

eingeführt und umfasst einen mehrstufigen, systematischen Ablaufplan. Langfristig sollen sämtliche Substanzveränderungen im Vergleich zur Ausgangssituation festgestellt und dokumentiert werden, um mit einer zeitnahen Planung geeigneter Maßnahmen die Schadensausbreitung zu unterbinden und auch die Kosten für die Bewirtschaftung der Objekte langfristig herabzusetzen. In das Wartungsprogramm sind gegenwärtig 15 Standbilder aus Carrara-Marmor und 14 Bronzedenkmäler von herausragender geschichtlicher, künstlerischer und städtebaulicher Bedeutung aufgenommen. Seit 2006 wurden alle genannten Bronze- und Marmordenkmäler einer Konservierung und Restaurierung unterzogen und befinden sich damit in einem Zustand, der den nachhaltigen Erfolg von regelmäßigen Pflegemaßnahmen optimal gewährleistet. Die für die einzelnen Objekte vorgeschlagenen Pflegemaßnahmen beinhalten zusammenfassend eine fotografische und kartografische Zustandserfassung zu Beginn der Wartungsperiode, eine jährliche Inspektion, die regelmäßige Reinigung mit Erneuerung der Schutzüberzüge, die Wiedererrichtung von Umzäunungen und bei den Marmorobjekten zusätzlich einen Winterschutz in Form einer Einhausung.

## 5. STATE OF THE ART DER EINHAUSUNG VON DENKMÄLERN

Schutzbauten für öffentlich exponierte Kunstwerke und Denkmäler stehen in einer langen architektonischen Tradition. Bereits seit dem 19. Jahrhundert sind Einhausungen in Deutschland bekannt. Auch in Berlin und vor allem in Potsdam wird diese Tradition gepflegt. Dennoch werden nach eigenen Recherchen gegenwärtig weniger als 5% der frei bewitterten Objekte im Winter geschützt. Ende des 19. Jahrhunderts wurden in der „Deutschen Bauzeitung“ zwei Artikel veröffentlicht, die den Schutz von Marmor-Statuen während des Winters in Deutschland diskutierten.<sup>16</sup>

*„Die inmitten der Stadt Berlin aufgestellten ungeschützten Marmor-  
Standbilder – die Schloßbrücken-Gruppen und die Schiller-Figur – haben  
allerdings ihre Transparenz verloren, sind aber noch unversehrt. Es  
scheint uns sehr glaublich, daß sie lediglich unter der Einwirkung der  
schwefligen Säure gelitten haben, die der Luft des Thiergartens, wo die  
anderen im Winter ummantelten und besser erhaltenen Figuren stehen,  
jedenfalls in geringerem Grade beigemischt ist.“<sup>17</sup>*

<sup>16</sup> Deutsche Bauzeitung 19: Vermischtes – Erfordert das deutsche Klima einen Schutz der Marmor-Statuen während des Winters? (1885, S. 71 ff.).

<sup>17</sup> Deutsche Bauzeitung 19: Vermischtes (1885, S. 128).

Als ein Argument für die Notwendigkeit einer Einhausung wurde auch das höhere Aufnahmevermögen von Schnee an schwefliger Säure und Schwefelsäure im Vergleich zu Regen und Tau genannt.

*„Der Nutzen einer winterlichen Umhüllung für solche Marmor-Bildwerke, die nicht durch einen gegen Säure unempfindlichen Ueberzug geschützt sind, ist hiernach wohl nicht zu bezweifeln. Richtiger dagegen ist es wohl, daß man von der Aufstellung von Marmor-Figuren in einer Umgebung, deren Luft größere Mengen jener Säuren enthält, überhaupt absieht.“<sup>18</sup>*

Die winterliche Einhausung, die den Verfall wirkungsvoll verlangsamt, ist schon im 18. Jahrhundert in Rheinsberg nachweisbar und sicher auch im Park Sanssouci angewandt worden.<sup>19</sup> Für das Jagdschloss Clemenswerth in Niedersachsen lässt sich archivarisch belegen, dass die Steinskulpturen am Zentralbau 1832 mit Schutzbahnen aus Leinwand - vermutlich ölgetränkt - geschützt wurden (Weiß, Kaltofen 1998). Auch für die Skulpturen im Berliner Tiergarten sind im 19. Jahrhundert Einhausungen belegbar (Deutsche Bauzeitung 1885). Beim Standbild Friedrich-Wilhelms III. in Berlin war 1877 bereits bekannt, dass die „Umhüllung desselben während der Wintermonate dem Marmor alle seine Vorzüge gewahrt“<sup>20</sup> hat. Ähnlich äußerte sich auch Anfang des 20. Jahrhunderts Pettenkofer zur Notwendigkeit eines Winterschutzes in der Allgemeinen Augsburger Zeitung.<sup>21</sup>

1967 wurde in Zusammenhang mit den Sitzbildern der Brüder Humboldt auf den „von Jahr zu Jahr schneller voranschreitenden Zersetzungsprozess der Marmorsubstanz hingewiesen.“<sup>22</sup> Daraufhin erfolgte eine Restaurierung und Abformung derselben zur zukünftigen Herstellung von Kopien. Als Konsequenz erwog man außerdem, die Skulpturen Unter den Linden durch „Couvertierungen“ (franz.: couvert = bedeckt, überdacht) in den Wintermonaten zu schützen. Obwohl man sich der Vorzüge durchaus bewusst war, setzte sich diese Maßnahme – mit Ausnahme der beiden Humboldt-Skulpturen – nicht durch, da „die Straße Unter den Linden für diese Monate an Repräsentanz und Attraktivität einbüßen“ würde.<sup>23</sup> In Anbetracht der Schäden wurde in den 1980er Jahren ein Pflegeprogramm entwickelt, das die „jährliche Reinigung,

<sup>18</sup> Deutsche Bauzeitung 21: Vermischtes - Zur Frage der Schutzbedürftigkeit von Marmor-Figuren im Winter (1887, S. 536).

<sup>19</sup> HÜNEKE 2006, S.152

<sup>20</sup> Berlin und seine Bauten 1877, S.108

<sup>21</sup> Augsburg. Allgemeine Zeitung 1908

<sup>22</sup> Schulz 1987, S.101

<sup>23</sup> Schulz 1987, S.103

Durchsicht, Beseitigung von Schäden, Erneuerung der Hydrophobierung<sup>24</sup> beinhaltetete, aber nie realisiert wurde. Bis heute werden traditionelle Holztafeleinhausungen bei der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg (SPSG) nach eigener Aussage mit Erfolg eingesetzt.

Typologisch reichen Schutzbauten vom einfachen Wetterdach bis zu eigenständigen Bauwerken, die das darin aufgehobene Objekt nicht nur physisch schützen, sondern sich mitunter zugleich museal bzw. als Bestandteil des Kunstwerks selbst präsentieren. Die zu entwerfenden Sekundärarchitekturen unterscheiden sich von den meisten anderen Bauaufgaben durch ihren engen und direkten Bezug zu den zu schützenden Objekten und gehen mit diesen eine Symbiose ein. Das heißt, die Hülle schafft hier nicht nur einen schützenden Raum für das Kunstwerk, sondern sie verleiht als zweite Haut dem Gegenstand selbst einen neuen Ausdruck, indem sie in der Lage ist, diesen zu betonen, zu abstrahieren, zu stilisieren, oder sie verfremdet und verbirgt seine Erscheinung (Will 2009).

Ausgangspunkt temporärer Einhausungen ist der Schutz von frei bewittertem Kulturgut. Wesentlich ist die Ausgrenzung von Wasser, da dieses bekanntermaßen an nahezu allen Verwitterungsprozessen beteiligt ist. Berichte sowie empirische Untersuchungen deuten darauf hin, dass die bereits seit dem 19. Jahrhundert verwendeten traditionellen temporären Holzeinhausungen die schädigenden Einwirkungen der Bewitterung auf Natursteinobjekte reduzieren. Frost und Korrosion sowie biogener Bewuchs setzen den Denkmälern aus Stein und auch Metall im Winterhalbjahr besonders zu. Aus zahlreichen Studien und der Literatur ist bekannt, dass eine große Amplitude und eine hohe zeitliche Variation der Zustandsgrößen Feuchte und Temperatur zu einer strukturellen Schädigung von Marmor führten. Daraus ergibt sich die Anforderung, diese Veränderungen möglichst gering zu halten.

Die wenigen bekannten aussagekräftigen Klimamessungen innerhalb von Einhausungen liegen bisher überwiegend von baugebundenen Objekten vor, bestätigen aber, dass der Winterschutz eine Verzögerung des Temperatenausgleichs bewirkt und somit kritische Spitzenwerte in Bezug auf Temperatur und Tauwasserbildung reduziert werden (Berry 2005, Blum 2002, Egloffstein et al. 2005, Lange 2008, Weiß et al. 1998, Wennemer 2009, Wölbert 2005). Fortlaufende Klima- und Oberflächenmessungen werden gegenwärtig an exponierten Skulpturen der SPSG durchgeführt (Lange 2010 mündl.

---

<sup>24</sup> Chefkonservator K. Starck Aktennotiz in Landesdenkmalamt Berlin, Schellhase (Direktor für Produktion), Klimes (Kollektivleiter Bildhauer VEB Stuna): Zur Restaurierung der Denkmäler - Wilhelm und Alexander von Humboldt - in Berlin. 3.10.1985. Schriftverkehr/Kurzdokumentation (4 Seiten).

Mitteilung). Die Auswertung scheint die Notwendigkeit einer Durchlüftung zu bestätigen, um Staufeuchte zu vermeiden. Andererseits ermöglichen hohe Luftwechselraten den konvektiven Transport und verursachen eine Durchfeuchtung des Marmors infolge Kondensation. Daher bergen sowohl die traditionellen als auch die neuen Entwicklungen von Einhausungen bzw. Winterzelten entscheidende Risiken.

Die bekannten Einhausungssysteme lassen sich in folgende Typen differenzieren:

- Holzkonstruktionen
- Tragwerk (Gerüst) mit Membran (Textil-/Kunststoffbahnen)
- Umhüllung ohne Tragwerk, mit und ohne Abstandhalter
- Plexiglas bzw. Polycarbonatglas
- Individuelle Konstruktionen, wie Zelte, Verschalungen etc.

Bei den traditionellen Einhausungen aus Holz handelt es sich bekanntermaßen um eine der ältesten Methoden des Winterschutzes, die seit dem 19. Jahrhundert in Parkanlagen Verwendung finden. Die Spannweite der technisch-konstruktiven Lösungen reicht von primitiven Verschalungen ohne definierte Belüftung und Bodenverankerung bis zu handwerklich durchdachten und bewährten Modellen. Die in der Regel schlichten Holzkonstruktionen ermöglichen geringe Materialkosten, sind wetterfest und dauerhaft, umweltverträglich, atmungsaktiv, zeigen eine geringe Verschmutzungsneigung. Die ästhetische Gestaltung ist aufgrund ihrer strengen, primären Form von eigenständigem Charakter und flexibel an die Umgebung anpassbar. Negative Auswirkungen haben demgegenüber die hohen Lager-, Transport- und Montagekosten und das relativ hohe Gewicht. Ebenso kann die Gefährdung des Objektes bei der Montage und gelegentlich auch durch mangelhafte Sicherung nicht ausgeschlossen werden. Auch besteht die Gefahr der Bildung von Kondensfeuchte bei unzureichender Belüftung. Zudem sind die Objekte vollständig abgedeckt und nicht sichtbar.



*Abb.19 Schloss Rheinsberg, typische Holztafeleinhausung der SPSG, die in dieser Form seit 1930 im Winter eingesetzt werden*

In jüngerer Zeit kommen auch Tragwerke auf Basis von Standardgerüstmodulen mit Membranen aus üblicherweise PVC-beschichtetem Polyestergerüst von eher experimentellem Charakter zum Einsatz (Blum 2003). Vorteilhaft sind neben den wetterfesten Eigenschaften die geringen Material- und Montagekosten und das relativ geringe Gewicht. Von Nachteil ist die in der Regel begrenzte Haltbarkeit der Membran, das Anschmutzverhalten, die ästhetische Erscheinung, die Gefährdung des Objektes bei Montage und die Gefahr der Bildung von Kondensfeuchte bei unzureichender Belüftung. Auch bei diesem System sind die Objekte dauerhaft verdeckt.



Abb. 20 Eremitage Bayreuth

Die unmittelbare Einhüllung der Denkmäler mit (un-)beschichteten Geweben, Folien oder auch Textil ist eine Entwicklung der vergangenen Jahre. Am Institut für Textil- und Bekleidungstechnik der TU-Dresden (Roedel 2005) wurde 1999 eine Membran aus Polyestergerüst mit Teflon entwickelt (Light-TEX Acryl), die über Distanzhalter aus Schaumstoff unmittelbar über die Figur gestülpt und durch Klettbinden am Objekt fixiert wird. Dieses System wird inzwischen in Sachsen und Österreich angewendet (Großer Garten Dresden, Schloss Moritzburg, Schloss Großsedlitz und Schloss Schönbrunn, Wien).



Abb.21, 22 Schloss Moritzburg, Winterschutz mit Textilhülle aus Polyestergerüst und Teflon

Aus den Schlossgärten von Versailles und dem Hampton Court Palace in England ist u.a. die Verwendung von Tyvek® bekannt (Franzen 2008; Berry 2005). Es handelt sich hier um ein papiervliesartiges Faserfunktionstextil aus thermisch verschweißten Fasern aus Polyethylen hoher Dichte (HDPE). Mechanisch hat es eher papierähnliche Eigenschaften und ist als tragende Membran nicht geeignet. Es verfügt aber, nach Angaben des Herstellers (DuPont), über eine gute Wasserdampfdurchlässigkeit. Das Indianapolis Museum of Art (IMA) in den USA verwendet gegenwärtig Tyvek® Membranen zum Schutz seiner exponierten Skulpturen im Freigelände (Oldfields-Lilly House & Gardens). Diesbezüglich hat das „American Institute for the Conservation of Historic and Artistic Works“ ein Netzwerk-Blog in 2008 gegründet (<http://emergingconservator.blogspot.com>).



Abb. 23 USA, Indianapolis Museum of Art (IMA), Oldfields-Lilly House & Gardens, Tyvek® Membran

Ein englisches Forschungsprogramm „Assessing the performance of protective winter covers for outdoor marble statuary – pilot investigation“ testete in 2004 verschiedene Membranen, wie Tyvek®, polyurethanbeschichtetes Nylon- und Polyestergewebe mit und ohne Polyester-Dämmung, sowie eine eigene Entwicklung bestehend aus drei Lagen mit Dämmung (Cliveden Winter Cover) für die Einhausung von frei bewitterten Skulpturen. Die gedämmte Membran zeigte demnach bei Frost und bezüglich der Diffusionseigenschaften die besten Ergebnisse.

([http://www.ucl.ac.uk/sustainableheritage/winter\\_covers.htm](http://www.ucl.ac.uk/sustainableheritage/winter_covers.htm))



Abb.24 a, b Hampton Court Palace, Umhüllung von Marmor Skulpturen mit a) einer wasserdampf-permeablen Membran und b) einer gedämmten Membran

Diese Art einer wetterfesten Umhüllung der Denkmäler bedingt geringe Material-, Lager- und Montagekosten und ist im Falle von Tyvek® auch atmungsaktiv. Nachteilig ist zweifellos die Tatsache, dass die Hülle unmittelbar an der Figur angebracht wird und der dauerhafte Kontakt mit der Oberfläche bereits bei der Montage Materialstress und auch Schäden verursachen kann. Bei bildhauerisch feingliedrig ausgearbeiteten Skulpturen stellt sich grundsätzlich die Frage, ob diese Anwendung überhaupt geeignet ist. Die Hülle verändert zwangsläufig die Objektgeometrie und somit die statischen Eigenschaften, so dass bei Sturm eine Gefahr für das Objekt besteht und es bereits zu Schäden durch Abstürze, wie beispielsweise einer Vase im Großen Garten in Dresden (2005), gekommen ist. Die mikro-klimatischen Bedingungen sind nicht bekannt und es besteht auch hier die Gefahr, trotz Belüftungslöchern, einer Bildung von Kondensfeuchte. Auswertungen zu

Messungen oder Untersuchungen des Materials und des Klimas liegen nicht vor. Es gibt Hinweise auf eine begrenzte Haltbarkeit der Membran und auf eine verstärkte Verschmutzungsneigung. Die ästhetische Präsentation derart verkleideter Objekte wird trotz der Möglichkeit einer großen Farbauswahl bezüglich des Materials dem Charakter und der Ausstrahlung eines Kunstwerkes nicht gerecht und diskreditiert den Gegenstand durch Verfremdung.

In Fortführung der historischen Tradition werden in Clemenswerth die Steinskulpturen seit 1997 im Winter eingehaust (Wennemer 2009). Untersuchungen ergaben, dass die Einhausung den Schadstoffeintrag um etwa die Hälfte reduziert. Gleichzeitig wurden um durchschnittlich 2°C höhere Nachttemperaturen gemessen, im Gegensatz zu ungeschützten Messbereichen. In Folge der Temperaturerhöhung wurden nachweislich weniger Taupunktunterschreitungen nachgewiesen (Weiß, Kaltoven 1998).



Abb.25 Zentralbau von Schloss Clemenswerth, mit Wintereinhausungen der Steinskulpturen

Ein Forschungsprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (AZ12559, Laboratorium für Dynamik und Optik Blum) hat sich zwischen 1997 und 2003 bereits mit der Einhausung von Denkmälern aus Naturstein beschäftigt. Ziel war die Entwicklung einer leichten, montagefreundlichen und optisch ansprechenden Einhausung am Beispiel der Schlösser in Clemenswerth (Niedersachsen) und Weikersheim (Baden-Württemberg).

Nach ausgiebigen Tests der Reflexions- und Transmissionseigenschaften haben sich im Ergebnis Silikon- und THV-beschichtete Glasfasergewebe mit Wärmeschutzlack bewährt. Auch die Verwendbarkeit von transparenten (ETFE-)Folien wurde in diesem Projekt geprüft. Sie verfügen demnach über gute Wärmeschutzeigenschaften und können UV- und witterungsbeständig ausgeführt werden. Allerdings sind sie wegen ihrer mangelnden Knickbeständigkeit und mechanischen Eigenschaften nicht für den temporären Einsatz geeignet.

In Italien gab es Mitte der 1980er Jahre heftige Diskussionen bezüglich eines Vorschlags, die Marcus-Aurelius-Säule in Rom mit einer transparenten Hülle vor der Umweltverschmutzung zu schützen. Die Einhausung sollte einer beschleunigten Verwitterung von Marmoroberflächen aufgrund der erhöhten Emissionen von Schwefeldioxid im Stadtraum entgegenwirken. Trotz der erheblichen Reduzierung von Emissionen in den vergangenen Jahren besteht das Problem weiterhin aufgrund des erheblichen Anstiegs von Stickoxiden und auch Feinstaub (Borelli 2007). Eine Schutzeinhausung wurde jedoch nicht realisiert.

2009 wurde ein patentiertes mehrschaliges Gehäuse in Leichtbauweise entwickelt, deren Wandungen in Sandwich-Technologie ausgeführt sind (Schmidt 2009, 2010). Die innere Schale besteht aus Schaumstoff, die äußere aus gewebeverstärktem Kunststoff mit UV-Schutzbeschichtung. Die Einzelteile werden miteinander mittels Dübel oder Schrauben verbunden. Die Konstruktion ist durchlüftet. Erfahrungen und unabhängige Untersuchungen zur Technik, Montage und Mikroklima liegen noch nicht vor. Das System ist nur bei Figuren mit kompakter Geometrie, ohne filigrane bildhauerische Details, anwendbar. (<http://www.ciccum.de/ciccum1.htm>)

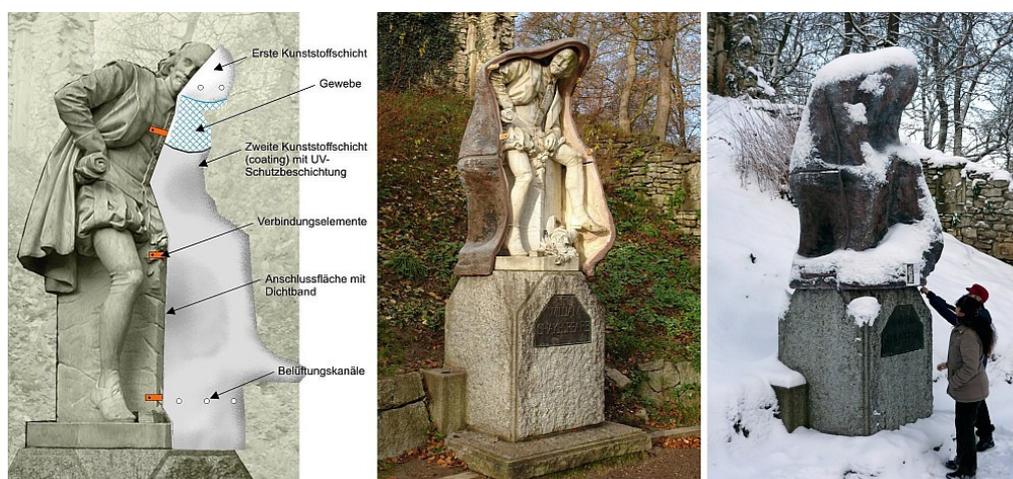


Abb. 26

Weimar Ilmpark, William Shakespeare (Otto Lessing 1904),  
Ciccum-Leichtbau Gehäuse

Konstruktionen aus Plexiglas bzw. Polycarbonatglas werden vorzugsweise bei herausragenden Objekten eingesetzt, um die Sichtbarkeit in den Wintermonaten zu gewährleisten. Das nahezu ungehindert eintretende Sonnenlicht provoziert, neben den Auswirkungen einseitiger Bestrahlung der Objektoberfläche, einen Treibhauseffekt mit erhöhter Kondensatbildung bei mangelnder Durchlüftung und stellt somit eine große Belastung für den Naturstein dar. Außerdem weist das Material eine hohe Verschmutzungsneigung auf. Problematisch gestalten sich auch die hohen Lager-, Transport- und Montagekosten und das hohe Gewicht. Ebenso kann die Gefährdung des Objektes bei der Montage und gelegentlich auch durch mangelhafte Sicherung nicht ausgeschlossen werden.

In Salzburg werden zwölf der 47 Brunnen im Winter zum Schutz vor Frost und Witterungsschäden eingehaust. Einer davon, der Floriani-Brunnen am Alten Markt, erhielt vom städtischen Hochbau-Amt einen besonderen Schutz durch eine transparente Plexiglashülle.



Abb. 27  
Abb. 28

Salzburg, Pferdeschwemme mit Wintereinhausung  
Salzburg, Florianibrunnen mit Wintereinhausung aus Polycarbonat

Bis dato wurden zahlreiche Typen und Konstruktionen zu Einhausungen von Skulpturen ermittelt. Dabei zeigte sich, neben der Erkenntnis, dass der weitaus größte Teil der frei bewitterten Objekte in Nordeuropa im Winter ungeschützt der Witterung ausgesetzt ist, dass an erster Stelle die traditionelle Holzeinhausung zur Anwendung gelangt. Daneben werden noch weitere Materialien und Konstruktionen üblicherweise aus Membranen, Plexiglas und auch Metall eingesetzt. Einhausungen von Brückenskulpturen konnten nicht ermittelt werden und sind uns nicht bekannt.

Im Frühjahr 2007 wurde ein Rundbrief an zahlreiche Institutionen und Denkmalämter der angrenzenden westeuropäischen Länder versandt, um den Erkenntnisstand zu Einhausungskonstruktionen und Angaben zu den verwendeten Materialien und Konstruktionen zu erfragen. Es erreichten uns u.a. Abbildungen von gängigen Einhausungen in Österreich und Frankreich. Auch hat ICCROM in Rom das Vorhaben ausdrücklich begrüßt und in seinem Antwortschreiben (Borelli 2007) interessante Hinweise gegeben.

Die nachfolgend aufgeführten Berichte und Publikationen sind in diesem Zusammenhang von besonderem Interesse:

- Assessing the performance of protective winter covers for outdoor marble statuary – pilot investigation, Janet Berry, Centre for Sustainable Heritage at the University of London
- Modern and Contemporary Outdoor Sculpture Conservation, Derek Pullen + Jackie Heumann, GCI Newsletter 2007
- Wintereinhausungen von Natursteinobjekten, Dr. rer. nat. Christoph Franzen, IdK-Dresden 2008
- Marmor/Umwelt Datenbank, Abschlussbericht Wolfram Köhler, DBU1999

## 6. BESTANDS- UND ZUSTANDSERFASSUNG

Das Arbeitspaket 2 beinhaltete die Bestands- und Zustandserfassung der Figuren 1-3. Auf Veranlassung des LDA erfolgte eine detaillierte Zustands- und Schadenskartierung der Figuren 1-4 auf der Grundlage von Messbildfotos (Abb.5-12). Sowohl der Umfang der Kartierung als auch die Legende wurde dem ausführenden Restaurator vom LDA vorgegeben. Ergänzend wurden die makroskopischen bzw. oberflächigen Schäden erfasst, typisiert und in einem Schadbildkatalog dargestellt (s. Anhang Schadenskartierung und Schadbildkatalog).

Parallel zum Forschungsprojekt wurden von 2007 bis 2008 die Figurengruppen 1 bis 3 und 2009 bis 2010 die Figurengruppen 4 bis 8 im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Abt.X Ingenieurbauwerke, gemäß Restaurierungskonzept unter der Fachaufsicht des LDA restauriert. (siehe auch S.19; Dokumentation der Maßnahmen, in: Bauer-Bornemann 2008).

In Zusammenhang mit der Konservierung und Restaurierung der acht Schlossbrückenfiguren wurde auf Veranlassung des LDA eine umfangreiche naturwissenschaftliche Untersuchung zum Erhaltungszustand und den Schadensphänomenen an den Skulpturen durchgeführt. Ziel dieser Maßnahme war vorrangig die Ermittlung von Konservierungsstoffen, die in der Vergangenheit eingesetzt wurden, sowie die Analysen der Verwitterungsphänomene und der komplexen Schadensbilder. Die Untersuchungen und Messungen beschränken sich daher in erster Linie auf die vergleichsweise stark geschädigte Figur 4, die nicht Bestandteil des laufenden Forschungsprojektes ist. Die Ausführung der Leistung erfolgte u.a. im Zuge einer Diplom-Arbeit an der Fachhochschule in Potsdam (Nägl 2008), in Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialprüfung in Berlin, dem GZG in Göttingen und dem Labor für Baudenkmalpflege in Naumburg. Die Diplom-Arbeit beinhaltet die Untersuchung des Erhaltungszustandes an den Figuren 3 und 4 mit zerstörungsfreien und zerstörungssarmen Methoden. Das Ausmaß der Verwitterung an beiden Figuren konnte anhand der durchgeführten Analysen näher spezifiziert werden. Mithilfe der Ergebnisse aus der IR-Spektroskopie konnten an vier untersuchten Gesteinsproben organische Substanzen in Form von Acrylaten, Silikonölen und Silikonharzen nachgewiesen werden. Damit ist belegt, dass die im Verlaufe von verschiedenen Restaurierungscampagnen nach 1945 zur Festigung und Hydrophobierung eingesetzten Konservierungsmittel bis heute ihre Wirksamkeit beibehalten haben! Hinweise, dass die Figuren im 19. Jahrhundert konservatorisch wiederholt mit Wasserglas behandelt wurden (Zeitschrift für Bauwesen

1857), lassen sich anhand den Ergebnissen der EDX-Analyse zufolge nicht mehr nachweisen (Analysebericht Sobott 2008).

Der Cocktail aus Acrylharzen und Silikonharzen bzw. -ölen im oberflächennahen Bereich kann die petrophysikalischen Eigenschaften des Marmors und damit einhergehend auch die Verwitterungsprozesse beeinflussen. Bis heute lässt sich der Einfluss des Mittels an einigen stark verwitterten Bereichen noch nachweisen, während sie an den meisten anderen Stellen der Figuren nachgelassen hat. Diverse Untersuchungen bzw. Veröffentlichungen belegen ein äußerst schlechtes Eindringvermögen von Acrylharzen und anderen Festigern selbst bei niedrigen Konzentrationen in ein Marmorgefüge. Daraus resultiert nur in Ausnahmefällen eine Überfestigung des oberflächennahen Bereichs, was eine Schalenbildung begünstigen könnte und mit einer Verringerung der Wasserdampfdurchlässigkeit einhergeht. Mit einer Veränderung des thermischen Verhaltens von behandelten Partien ist nur bei sehr hohen Festiggehalten im Porenraum der Marmore zu rechnen. Dies dürfte lediglich in stark entfestigten Bereichen der Oberfläche eine Rolle spielen. Rüdric (2003) stellte fest, dass bei der Überschreitung der jeweiligen Glasübergangstemperaturen von Acrylharzen eine Restdehnung bei thermischer Beanspruchung auftreten kann. Diese Weitung des Gefüges ist dabei auf eine Erweichung des Kunststoffes ab einer bestimmten Temperatur zurückzuführen. Bei Acrylharzen befindet sich die Glasübergangstemperatur jedoch oberhalb von 70 °C welche an hellen Marmoren kaum erreicht werden sollten. Weiterhin zeigen die Untersuchungen von Rüdric (2003), dass lediglich bei sehr hohen Festiggehalten eine Aufweitung des Gefüges auftritt. Zusätzlich kann der Pufferungseffekt der vorhandenen Mikrorisse im Marmorgefüge durch Gesteinsfestiger reduziert werden. Sind derartige Hohlräume, welche die entsprechende Dehnungen auffangen können, mit Kunstharz ausgefüllt, können sich die anisotropen Eigenschaften der Calcitkristalle mit den damit verbundenen Spannungen auf den gefestigten Gesteinsbereich übertragen. Rüdric (2003) fand jedoch hierzu lediglich für die Acrylharz-Volltränkung deutliche Hinweise. Das nachgewiesene Silikonharz bzw. -öl weist hydrophobe Eigenschaften auf. Dies ist in einigen behandelten Marmorbereichen noch nachweisbar, wodurch der Wassereintrag reduziert wird. Findet ein oberflächennaher Wirksamkeitsverlust statt, so hat dies eine Durchfeuchtung des genannten Bereiches zur Folge. Dementsprechend werden Lösungsprozesse vornehmlich die Kristalllagen angreifen, die über der noch aktiven hydrophoben Zone liegen. Das Nachlassen der wasserabweisenden Wirkung führt so zum partiellen Materialverlust der nicht mehr hydrophoben Oberflächenzone und der Zerstörungsmechanismus setzt sich in der

darunter liegenden Schicht weiter fort. Alle hier aufgeführten Möglichkeiten (Überfestigung, Herabsetzung der Wasserdampfdurchlässigkeit, verändertes thermisches Verhalten, Nachlassen der hydrophoben Wirksamkeit) können erheblich zum Verwitterungsprozess eines Objektes beitragen und sind aus den erwähnten Gründen wahrscheinlich auch für die oberflächennahe Gefügeentfestigung verantwortlich (Abb.29).



Abb. 29 Schlossbrücke, Figur 4, krakellierte schichtenparallele Ablösungen der Marmoroberfläche

Zusammenfassend wurden, parallel zum DBU-Forschungsprojekt, die folgenden Untersuchungen und Messungen auf Initiative des LDA durchgeführt:

- vergleichende Ultraschall-Untersuchungen an den Figuren 3 und 4
- Ultraschall-Tomografie Figur 4, Bein des Kriegers
- Analyse der gelblichen Oberflächenverfärbungen durch IR-Spektroskopie am Marmor zum Nachweis der Verwendung organischer Festigungsmittel
- IR- Analyse von Mörtelproben zur Bestimmung der Bindemittel
- Standsicherheitsprüfung / Messung der Materialspannungen Figur 4
- EDX-Röntgenspektroskopie zum (Si-)Nachweis der Verwendung von Wasserglas
- Wasseraufnahmetests (n. Carsten/Tropfentest)
- Farbmessung mittels Chromameter
- Permeabilitätsmessung
- Mikroskopie der Oberflächen
- Messung der thermischen Dehnung

- Quecksilberporosometrie zur Ermittlung der Porenradienverteilung
- Mikrobiologische Untersuchungen
- Anfertigung und Untersuchung von repräsentativen Dünnschliffen
- Tachymetrisches Aufmaß und Vermessung der Brückenfiguren
- Zustandskartierung der Figuren 1-4
- Schadenserfassung / Schadbildkatalog
- Dokumentation der Restaurierungsarbeiten

Aufgrund der negativen Auswirkungen von kunstharzhaltigen Überzügen auf Natursteinoberflächen wurde der Versuch anhand von Musterflächen unternommen, die wiederholt oberflächlich eingebrachten Acrylate und auch Silikone durch ein Niederdruckverfahren zu entfernen (Lehmann 2008). Die Anwendung des Niederdruckverfahrens konnte auf den Gesteinsoberflächen der ausgewählten Marmorskulptur (Figur 4) unproblematisch durchgeführt werden. Die visuellen Veränderungen der Oberfläche nach der Anwendung deuten auf eine Reduzierung des Polymerfilms in den oberflächennahen Bereichen. Diese Annahme ist noch durch eine naturwissenschaftliche Untersuchung mittels FTIR bzw. Anfärbung am Querschliff zu bestätigen. Sollte es sich bei den Objektflächen lediglich um aufliegende Filme handeln, kann eine Reduzierung eventuell auch unter Anwendung anderer Techniken mit weniger Aufwand erreicht werden. In Bereichen, die bereits vor der Acrylharzbehandlung geschädigt waren, ist jedoch mit einer weitaus höheren Penetration des Festigungsmittels zu rechnen. Eine Anwendung des Niederdruckverfahrens wäre hier durchaus sinnvoll und mit der Zielstellung verbunden, eine Reduzierung des Kunststoffes im Porenraum des Gesteinsgefüges zu erreichen.

Auf Veranlassung des LDA wurde aufgrund des nachgewiesenen schlechten Erhaltungszustandes der Figur 4 „Nike krönt den Sieger“ - im Hinblick auf die Gewährleistung der Verkehrssicherheit und der avisierten Einhausung - eine Standsicherheitsprüfung mit einer Messung der Materialspannungen durch die Ingenieur-Gesellschaft Berlin (GSE) in Zusammenarbeit mit AM (Rüdrich 2008) und dem GZG-Göttingen durchgeführt. Die Untersuchung zielte auf die Ermittlung der Materialspannungen an der Figurengruppe und die Beurteilung der Standsicherheit. Die ermittelten Materialspannungen wurden mit aufnehmbaren Biegezug- bzw. -druckfestigkeiten verglichen. Dieser bisher wohl einmalige Vergleich soll es ermöglichen grundsätzliche Entscheidungen über weitere Maßnahmen zur Konservierung/Restaurierung und die Erhaltung der Figurengruppe in situ zu treffen.

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass bei den filigranen bildhauerischen Details, wie die Flügel sowie der Arm mit Kranz, die Zug bzw. Biegezugspannungen nahezu die vorhandenen Materialfestigkeiten erreichen und als groß einzustufen sind. Reserven bzw. Sicherheiten in der Materialauslastung dieser Figurenteile sind praktisch nicht gegeben. Somit geht von diesen Partien eine Verkehrsgefährdung aus und sie sind entsprechend zu sichern oder zu erneuern. Die rechnerische Sicherheit der Figurengruppe auf dem Betonsockel gegen Kippen ist grundsätzlich gegeben. Durch Unterfüttern des Sockels besteht aber die Möglichkeit zur Erhöhung der Kippsicherheit bis zum vorgeschriebenen Wert von 1,5.

Die naturwissenschaftlichen Untersuchungen und Messungen sind für das Projekt kostenneutral, sie wurden nach Absprache mit den Projektpartnern vom LDA veranlasst und über die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung in Berlin finanziert. Sie verstehen sich als wertvolle Ergänzungen zum Projektablauf, da alle gewonnenen Erkenntnisse dem Projekt lückenlos zur Verfügung gestellt werden. Sämtliche Untersuchungsergebnisse konnten mit den Messungen und Untersuchungen innerhalb des DBU-Projektes abschließend abgeglichen und bewertet werden.

Die o.g. Untersuchungen, Messungen und Recherchen beinhalten die folgenden Arbeiten und Berichte:

Bauer-Bornemann: Dokumentation der Restaurierungsarbeiten an den südlichen Figurengruppen der Schlossbrücke in Berlin, Arbeitsbericht 2008

Katie Friedmann: Die Restaurierungsgeschichte der Schlossbrückenfiguren – Literatur- und Quellenrecherche mit Schadensfortschrittanalyse, unveröffentl. Seminararbeit FH-Potsdam 2007

GSE Ingenieur-Gesellschaft mbH Saar, Enseleit und Partner: Bericht über die Untersuchung der Standfestigkeit der Figur 4 "Nike bekränzt den Sieger" auf der Schlossbrücke Berlin vom 06.10.2008

Martin Lehmann: Erprobung des Niederdruckverfahrens zur Reduzierung eingebrachter Acrylharze – Schlossbrücke Berlin Fig. 4, Arbeitsbericht vom 3.6.2008

Sarah Nägl: Zwei Skulpturen aus Carrara-Marmor auf der Schlossbrücke in Berlin, unveröffentl. Dipl.-Arbeit FH-Potsdam 2008

Robert Sobott: Untersuchung des Festigkeitszustandes und früherer Konservierungen, Labor für Baudenkmalpflege Naumburg, Arbeitsbericht Nr.3/08 vom April 2008

## **7. ENTWURF UND ENTWICKLUNG EINER INNOVATIVEN UND DENKMALGERECHTEN EINHAUSUNG**

Das Arbeitspaket 4 beinhaltete die Entwicklung einer innovativen Einhausung unter Berücksichtigung der historischen, städtebaulichen und kunsthistorischen Bedeutung der Schlossbrückenfiguren im Kontext zur Straße Unter den Linden.

In einem ersten Schritt wurde ein Anforderungsprofil mit den nachfolgend genannten Schwerpunkten erstellt:

- **Gestalterische Anforderungen**

- Städtebau und Denkmalpflege

- Einbindung in die räumliche Situation

- Städtischer und stadthistorischer Kontext

- Angemessenheit in Bezug auf das Skulpturenprogramm „Unter den Linden“

- **Idee, Konzept, Form**

- Beziehung von Konstruktion und Form

- Beziehung von Form und Inhalt

- Proportion und Materialität

- Farbigkeit und Oberfläche

- Erlebbarkeit der Skulpturen

- **Technische Anforderungen**

- Konstruktion

- Statik, Festigkeit (z.T. enorme Windlast!), geringes Eigengewicht

- Dauerhaftigkeit (Langzeitstabilität)

- Leichte Montierbarkeit und berührungsarme Montag

- Versuch eines variablen konstruktiven Aufbaus und damit freie Skalierbarkeit für Skulpturen unterschiedlicher Größe und Form

- Eignung für Transport und Einlagerung

- Fügung und Fugenausbildung

- Unproblematische Reinigung und hohe Schmutzunempfindlichkeit

- Gewährleistung der Verkehrssicherheit

- Unempfindlichkeit gegen Vandalismus und Graffiti

- **Material**

Beachtung der Anforderungen an die gewählten Materialien nach DIN

Platten- oder Planenmaterial

Verformbarkeit, Fügbarkeit, Festigkeit

Umweltverträglichkeit der Materialien, Entsorgung, Wiederverwendbarkeit, Dauerhaftigkeit

Unproblematische Reinigung und hohe Schmutzunempfindlichkeit

Transparenz und Lichtdurchlässigkeit (sichtbares Licht, UV-Licht, IV-Strahlung)

Alterung, Patina

Brandschutz: Entflammbarkeit, Brennbarkeit

Reflektion, Blendschutz bei künstlicher Beleuchtung (Autoverkehr!)

- **Bauphysikalische Anforderungen**

Schutz der Skulpturen vor Umwelteinflüssen

Berücksichtigung der Auswirkungen der Umwelteinflüsse auf das Innenklima (Mikroklima / Makroklima) und in Folge auf den Carrara-Marmor

- **Wirtschaftlichkeit**

Herstellungskosten

Betriebskosten

## Entwurfswettbewerb 2006

Nach Bewilligung des vorzeitigen Maßnahmebeginns durch die DBU im Oktober 2006 haben sich die Projektpartner zu einem ersten Entwurfswettbewerb zur Gestaltung der Einhausung entschlossen. Im Wintersemester 2006/07 fand an der Architekturfakultät der TU-Dresden ein Entwurfsseminar verbunden mit einem Ideenwettbewerb statt, das sich mit der Entwicklung eines Einhausungssystems für die Schlossbrückenfiguren in Berlin beschäftigte. Das Entwurfsprojekt wurde in enger Zusammenarbeit der Lehrstühle für Bauklimatik, Denkmalpflege, Architektur- Grundlagen des Entwerfens der TU Dresden und dem Landesdenkmalamt Berlin durchgeführt.

Unter der Berücksichtigung des Anforderungsprofils ging es in der Entwurfsaufgabe darum, Schutzräume für Kunstwerke zu entwerfen, deren Gestaltung von angemessener Eigenständigkeit geprägt sein sollte, so dass sie nicht in Konkurrenz mit den zu schützenden Skulpturen treten. Der Frage, in welchem Verhältnis die

Architektur einer Einhausung zu den Skulpturen steht, ist von den studentischen Wettbewerbsteilnehmern in ihren Entwürfe auf unterschiedliche Weise gewichtet und behandelt worden. So geht bei einigen Entwürfen die Einhausung mit der Skulptur eine enge Symbiose ein, sodass sie fast zu einem - wenn auch temporären - neuen Kunstwerk wird. Andere hingegen betonen die Andersartigkeit der Hülle gegenüber der Skulptur und grenzen sie gestalterisch stark voneinander ab. Im Ergebnis wurden im Dezember 2006 zwölf Entwurfsarbeiten vorgelegt und durch eine (unabhängige) Jury im LDA bewertet. Sämtliche Arbeiten lieferten interessante Lösungsansätze vor allem in gestalterischer aber auch in technischer Hinsicht. Als Ergebnis des Studentenwettbewerbs kristallisierte sich aber deutlich heraus, dass die komplexen Anforderungen für die Entwicklung eines Einhausungsmoduls einer ingenieurstechnischen Entwicklungsarbeit bedürfen.

Die Ergebnisse des Wettbewerbs sind in einer Veröffentlichung der TU-Dresden publiziert: Ein Haus für Göttinnen, Einhausungen für die Skulpturen der Berliner Schlossbrücke, Hrsg.: Thomas Will, TU-Dresden, Dresden 2008.

Für die Umsetzung der anspruchsvollen ingenieurtechnischen und gestalterischen Leistungen in Bezug auf den Entwurf und die Konstruktion einer Einhausung der Schlossbrückenfiguren wurde, nach Zustimmung der Partner, der Lehrstuhl Konstruktives Entwerfen und Tragwerkslehre im Studiengang Architektur an der UdK-Berlin, auf Initiative des LDA, von der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung beauftragt. Der Leiter des Fachbereichs, Herr Prof. Dr.-Ing. Christoph Gengnagel, hatte zuvor sein großes Interesse an der Mitwirkung am Projekt bekundet und sich nicht zuletzt auch aufgrund seines Dissertationsthemas (Mobile Membrankonstruktionen, TU-München 2005) überzeugend als qualifizierter Partner dargestellt. Neben den interdisziplinären Möglichkeiten der Universität ist die von Herrn Prof. Gengnagel aufgezeigte Beteiligung an einem Netzwerk von Ingenieuren und Architekten, die sich schwerpunktmäßig mit dem Leichtbau beschäftigen und somit über große Erfahrung verfügen, für das Projekt von besonderer Bedeutung. Der Aufgabenbereich der UdK Berlin innerhalb des Forschungsprojekts bezieht sich auf die folgenden Leistungsphasen:

- Grundlagenermittlung
- Vorplanung, Vorentwurf verschiedener Konstruktionsalternativen
- Entwurfsplanung (Konstruktionentwicklung und Tragwerksplanung)
- Ausführungsplanung eines Prototyps (Statische Berechnungen zum Standsicherheitsnachweis, Konstruktionszeichnungen)

## Vorentwurf Prototyp

Im Juli 2008 präsentierte Prof. Gengnagel den Projektpartnern eine Vorstudie zu temporären Einhausungssystemen mit einer Vorstellung erster Ideen und Ansätze zur Entwicklung und Realisierung eines Prototyps. Die Präsentation berücksichtigt im Wesentlichen das durch die Partner erarbeitete Anforderungsprofil und beinhaltet die bautechnischen Anforderungen, die Angaben zur Konstruktion sowie eine Vorstatik zu drei grundsätzlichen Entwurfsalternativen:

- A. biegesteifes Skelett mit weicher Hülle
- B. Modularer Körper aus biegesteifen Segmenten
- C. weiche Hülle durch Unterdruck stabilisiert



*Variante A Juli 2008*



*Variante B Juli 2008*



*Variante C Juli 2008*

*Abb. 30 UdK Varianten Studie*

Aus der Diskussion ergab sich, dass die Variante A für die konkrete Situation die höchsten Entwicklungspotenziale besaß und die Grundlage für die weitere Entwicklung eines Prototyps bildete.

Ein zweiter wichtiger Punkt im Rahmen der Realisierung der Einhausung stellte das Konzept für die Verankerung der Einhausung am Postament und Brückenkörper dar. Die erste Idee des Einsatzes einer vollständig zerstörungsfreien Klemmung der Einhausung an den Postamenten musste nach eingehender baukonstruktiver

Untersuchung der nicht massiv errichteten Postamente aufgegeben werden. Als Alternative wurden verschiedene Möglichkeiten einer Verankerung der Einhausung am Brückenkörper untersucht.

Als weiterer wichtiger Schritt zur Entwicklung eines Prototyps wurde die Entwicklung, Konstruktion und Realisierung einer ersten Testeinhausung auf den vorhandenen Gerüsttürmen beschlossen. Ziel dieses Versuchsaufbaus war die Gewinnung weiterer Messdaten im Winterhalbjahr 2008/2009 und erster Erfahrungen für den Montage- und Demontageprozess einer neuartigen Einhausung in der äußerst exponierten örtlichen Situation. Im Rahmen des Versuchsaufbaus übernahm die UdK Berlin folgende Aufgaben:

- a. Entwurf eines Versuchsaufbaus als Aufsatz für die bestehenden Gerüsttürme
- b. Erstellung des prüffähigen Standsicherheitsnachweises
- c. Erstellung eines Konstruktionsplans für den Stahlbau und Mitwirkung bei der Vergabe
- d. Mitwirkung bei der Montage

### Die Testeinhausung

Nach Auswertung von Archivunterlagen des LDA und einer zusätzlichen instrumentellen Untersuchung (Geo-Radar) der Postamente durch Dr. Weise stellte sich leider heraus, dass die Postamente nicht wie zunächst angenommen in massiver Bauweise errichtet wurden. Die Natursteinelemente wurden hinterlüftet versetzt und sind mit nur wenigen Dübeln und Trageankern am innen liegenden Betonkern befestigt. Aufgrund dieser Erkenntnisse ist eine Montage der Einhausung an den Postamenten und ein entsprechender Lastabtrag über die Postamente nicht möglich. Die durch die UdK entwickelte konstruktive Verankerung der Einhausung über „Klemmbacken“ an den Postamenten war unter diesen Umständen nicht realisierbar. Erschwerend kommt hinzu, dass unter dem Gehweg der Brücke Gas-, Wasser- und Stromleitungen verlaufen, die die Möglichkeiten einer Verankerung in der Brücke stark einschränken. Unter diesen veränderten Voraussetzungen haben sich die Projektpartner auf den Bau und die Montage einer Testeinhausung mit einer Membranhülle aus einem transluzenten PVC-Polyestergewebe auf der vorhandenen Gerüstplattform der Figurengruppe 1 für den Winter 2008/09 entschieden. Die Montage und der Aufbau der ersten Testeinhausung auf Basis eines stählernen Tragwerks erfolgte auf Grundlage der Planung der UdK und a.k.a Ingenieure in Eigenleistung durch die BAM.



*Stahlskelett Versuchsaufbau Montage*

*Nach einem Jahr Bewitterung*

*Abb. 31 Schlossbrücke Figur 1, Montage Testeinhausung 2009*

Ein wesentliches Ziel für den Bau der ersten Testeinhausung bestand in der Erprobung und Evaluierung der Konstruktion, der Herstellung und der Montage im Hinblick auf Entwicklungsmöglichkeiten bzw. Optimierungspotentiale für den Bau des Prototyps insbesondere in der Erprobung und Evaluierung der Konstruktion in Hinblick auf einen mehrfachen Auf- und Abbauprozess und auf ihr Langzeitverhalten über mindestens eine Winterperiode. Beim Aufbau und der Montage der Konstruktionselemente der Testeinhausung zeigte sich, dass das Handling aufgrund der Dimensionierung und Gewichte der Stahlelemente, der Membranbefestigung, aber auch im Hinblick auf die zu erwartenden Betriebskosten (Transport, Einlagerung) weiter verbessert werden musste. Die Evaluierung der Testeinhausung erforderte daher eine Optimierung der Konstruktion bezüglich der einzusetzenden Materialkombinationen, des Montageprozesses und der Verankerung auf der Brücke.

Die Ergebnisse aus dem Bau und der Erprobung der Testeinhausung wurden 2009 in die weitere Entwicklung des eigentlichen Prototyps systematisch eingearbeitet. Neben den Erkenntnissen zu Verankerungsmöglichkeiten am Brückenkörper, der Optimierung des Auf- und Abbauprozesses und der erheblichen Minimierung von Bauvolumen und Gewicht der Konstruktion wurden auch wesentliche Erkenntnisse aus den Materialuntersuchungen an den Skulpturen und den daraus resultierenden bauphysikalischen Anforderungen an das Einhausungssystem berücksichtigt.

Die Marmorskulpturen unterscheiden sich in Ihrer Geometrie und verlangen somit idealerweise eine individuelle Reaktion auf die vorhandene Figur. Eine konsequente Umsetzung wäre eine sehr weiche elastische Hülle, die, grob zugeschnitten, sich durch eine pneumatische Stabilisierung an den starren Körper der Skulptur anpasst. Eine technische Realisierungsmöglichkeit für dieses Konzept bieten Unterdrucksysteme, die in Phase 1 des Projekts auf Ihre Umsetzbarkeit untersucht wurden. Neben den grundsätzlichen konstruktiven Fragen von durch Unterdruck stabilisierten weichen Hüllen, wie Luftdichtigkeit, permanente Luftzufuhr und Steuerung, führten vor allem die für die vorliegende Anwendung als negativ eingeschätzten bauphysikalischen Eigenschaften solcher Systeme zum Ausschluss dieser Variante.

Grundsätzlich ist die Geometrie aller acht Figuren durch eine ganze Reihe geometrischer Extrempunkte gekennzeichnet (Speerschaft, Flügelspitzen etc.) Trotzdem ist es möglich, eine geometrisch regelmäßige Hülle mit einer einfachen Grundrissgeometrie, wie z.B. ein Kreis, Ellipse, Rechteck oder Polygon, zu erzeugen. Als Grundlage für die spezifische Geometrie der Figuren wurden alle Konturen übereinander gelegt. Die entstehende Superposition der einzelnen Hüllgeometrien zeigt keine eindeutige Kontur. Grundsätzlich wird deutlich, dass die Grundrissfläche der Figuren größer ist als die Grundrissfläche des Sockels.

Auf der Grundlage der Superposition der Hüllgeometrien wurden 16 verschiedene Regelgeometrien für die Einhausung untersucht. Im Rahmen der Grundlagenermittlung wurde der Einfluss der Grundrissgeometrie auf den Windwiderstand analysiert. Die Kreisgeometrie zeigt hierbei den geringsten Beanspruchungsgrad. Aufgrund des großen Einflusses der Windlasten auf die Ausbildung der Struktur und insbesondere der Verankerungspunkte ergab sich eine hohe Präferenz dieser Geometrie für die weitere Entwicklung des Projekts. Ein weiterer Vorteil des Kreisquerschnitts besteht in der Vorgabe einer kontinuierlichen Krümmung für eine doppelt gekrümmte Membran als Hülle. Nach Beurteilung der Kriterien wurde die Geometrie 7 (Abb.30) für die weitere Bearbeitung ausgewählt. Die runde Grundform ergibt eine minimale Außenfläche und ein geringes Gewicht der Struktur. Die lange und konische Form korrespondiert mit der Schlankheit der Kubatur aus Sockel und Figur.

Das effizienteste Tragwerk für eine zylindrische Kubatur ist eine Schale. Die Tragwirkung der Schale lässt sich entweder durch ein flächiges, druck- und biegesteifes Material (z.B. PMMA, PC, GFK, PETA, PET-G, PVC) oder durch einzelne, lineare Tragglieder erreichen. Bei der Verwendung einzelner Tragglieder ist das Gesamtgewicht geringer. Aus gestalterischer Sicht soll die Einhausung nur im Bereich der Figur und in

ihrem Übergang in den Sockel geschlossen sein. Der untere Sockelbereich soll aus Gründen der Materialeinsparung und der Reduktion der Windlasten offen bleiben. Somit ist für den Entwurf im unteren Bereich die Ausbildung eines Stabwerks notwendig. Die Fortführung dieses Stabwerks im Bereich der Schale ist strukturell als auch gestalterisch sinnvoll.

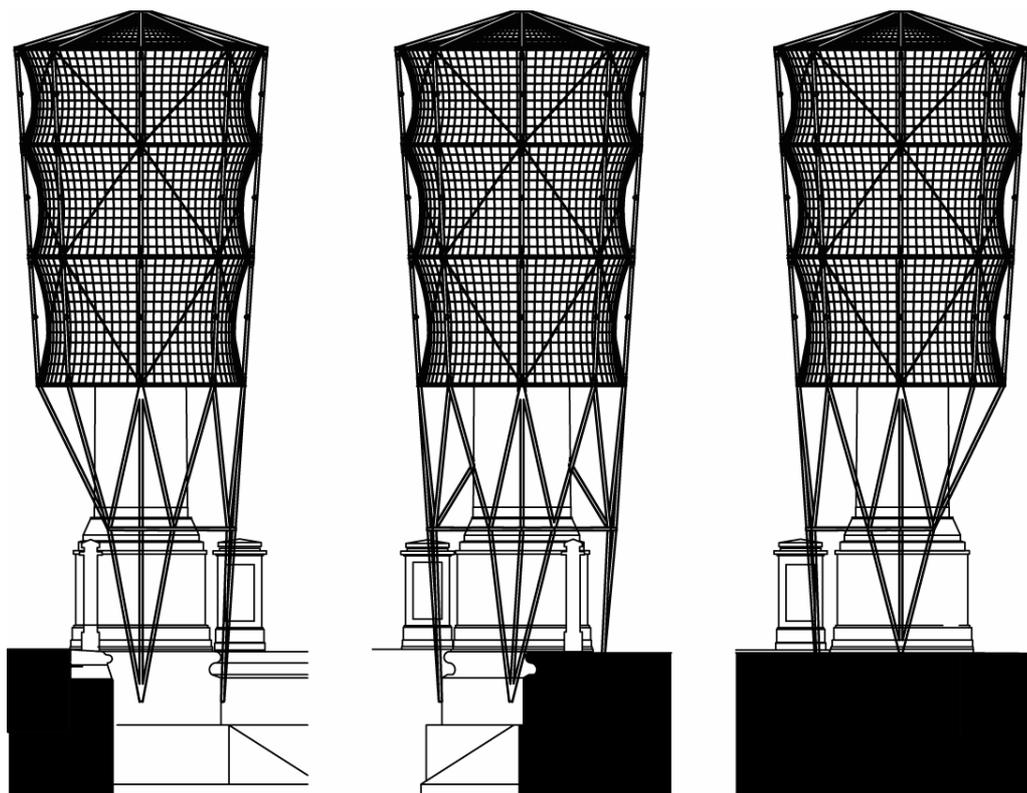


Abb. 32 *Abgestimmter Entwurf der UdK,  
Prototyp der Einhausung für die Schlossbrückenfiguren*

Die Entwicklungsarbeit, die Genehmigungs- und Ausführungsplanung sowie die Prüfstatik für den Bau des Prototyps durch die UdK und a.k.a. Ingenieure sind abgeschlossen. Für die Ausschreibung, Herstellung und Montage des Prototyps sind ca. 20 Wochen zu veranschlagen, dies konnte im Rahmen des Projektes nicht realisiert werden. („Temporäre Einhausungssysteme“ 3. Teilbericht – Projektphase 2 Entwicklung und Realisierung eines Prototyps, UdK Berlin 2009)

## 8. FAZIT

Grundsätzlich wurde durch das Projekt aktuell der Beweis geführt, dass eine Einhausung die Objekte aus Carrara-Marmor schützt. Die Verwitterungsprozesse können durch die Einhausung aber nicht signifikant verzögert werden.

Eine wesentliche Erkenntnis der Analytik und der numerischen Simulation ist, dass neben den winterlichen Frost-/Tauwechseln auch die Auswirkungen der thermischen und hier vor allem der thermohygrischen Dilatation, und zwar im Winter und im Sommer, ausschlaggebend für den Prozess der Schädigung von Carrara-Marmor sind. Diese Tatsache gab zum Projektende auch Anlass zu einer vergleichenden qualitativen und quantitativen Bewertung des Sommer- und des Winterlastfalls. Ein eigens am Institut für Bauklimatik der TU-Dresden entwickeltes Auswertungsverfahren ermöglicht über so genannte Belastungskennzahlen die Eignung von Einhausungssystemen miteinander zu vergleichen. Ein weiteres beispielhaftes Ergebnis der numerischen Simulation belegt in diesem in diesem Zusammenhang eindeutig Unterschiede im Verwitterungsprofil an den Figuren, wo feingliedrige, also gering dimensionierte Partien der Skulpturen (z.B. Flügel, Gewandfalten, Arme) einen deutlich schlechteren Erhaltungszustand aufweisen.

Auch der Vergleich der unterschiedlichen Einhausungssysteme ergibt kein eindeutiges Bild. Das Ziel, die Belastungen der Marmorskulpturen durch ein geeignetes System zu minimieren, fordert eine komplexe Beurteilungsweise. Einhausungskonditionen, die positive Effekte bei den filigranen Marmorbereichen auslösen, können sich bei den massiven Marmorskulpturelementen negativ auswirken und umgekehrt. Zudem bestehen Wechselwirkungen zwischen den Klimaeinflüssen, den Einhausungssystemen und der Marmorskulptur, die sich nicht auf ein einfaches Ursache-Wirkungs-Prinzip reduzieren lassen.

Abschließend stellt sich die Frage nach der Wirksamkeit einer ausschließlichen Winter-Einhausung angesichts der vor allem bei Temperaturwechseln unter Feuchteeinwirkung festgestellten ganzjährigen Schädigung von Marmorfiguren. Vor diesem Hintergrund gilt es, maßgeblich die hygrischen und thermischen Fluktuationen in den Einhausungen zu minimieren.

Aufgrund der durch das Projekt gewonnenen Erkenntnisse ist der Kosten-Nutzen-Aufwand einer Herstellung und periodischen Montage von Einhausungen unter den extremen Bedingungen der Berliner Schlossbrückenfiguren eher kritisch zu bewerten. Im Rahmen des Projektes wurde aufgrund der spezifischen Situation auf der Brückenanlage die Realisierung einer anfänglich beabsichtigten modularen bzw. modellierbaren Konstruktion mit einer transparenten / transluzenten Membran zurückgestellt.

Wichtige wissenschaftlichen Erkenntnisse des Projekts sind aber auf ähnliche freilandexponierte Objekte aus Carrara-Marmor übertragbar und deshalb verallgemeinerbar. Transparente Membranen sollten nach heutigem Kenntnisstand und dem aktuellem Stand der Technik nicht zum Einsatz kommen, da sie nach Einschätzung der TU Dresden die Marmorverwitterung sogar nachweislich beschleunigen können. LowE-Membranen sind aufgrund der mangelhaften Beständigkeit der heutigen Produkte für den Einsatz im Außenbereich ebenfalls nicht geeignet.

Ein sehr wirkungsvoller und nachhaltiger Schutz der Marmor-Skulpturen lässt sich nach derzeitigem Forschungsstand durch eine regelmäßige Inspektion und Wartung in Verbindung mit einer zyklischen Reinigung gewährleisten. Diese Maßnahme ist für den Verbleib der Skulpturen auf der Brücke eine unabdingbare Voraussetzung.

Darüber hinaus gehende Überlegungen einer oberflächigen Konservierung der Objekte - beispielsweise mit Wachs - erwiesen sich hingegen nicht als zielführend, da keine positiven Auswirkungen auf den ermittelten hygrothermischen Verwitterungsprozess nachgewiesen werden konnten und die Oberfläche mit den bereits aufgetragenen Mitteln zusätzlich versiegelt wird.

Die Auswirkungen der in der Vergangenheit aufgetragenen Konservierungsmittel auf die petrophysikalischen Eigenschaften des Marmors werden als gering eingestuft, da Untersuchungen bislang signifikante Veränderungen nur bei extrem hohen Festigkeitsgehalten im Porenraum des Marmors feststellen konnten. Nach derzeitigem Stand der Forschung kann eine hydrophobierende Wirkung des aufgetragenen „Cocktails“ sowohl positive als auch negative Auswirkungen haben. Die Komplexität der Objekte und Wechselwirkungen lässt abschließend keine verallgemeinerbare Aussage zu, sondern erfordert ein kontinuierliches Monitoring und deren Auswertung.

Berlin, den 28. Januar 2011

- York Rieffel -

## 9. LITERATURVERZEICHNIS

Accardo, Giorgio; Altieri, Antonella; Cacace, Carlo; Giani Elisabetta; Giovagnoli, Annamaria (2003) Risk Map: A project to aid decision-making in the protection, preservation and conservation of Italian cultural heritage. In Conservation Science 2002: papers from the conference held in Edinburgh, Scotland 22-24 May 2002.

Berlin und seine Bauten (1984), 2 Theile, Architektenverein zu Berlin (Hg.), Berlin 1877. - Faksimile der Erstausgabe, Verlag Wilhelm Ernst & Korn, Berlin 1984, S.95.

Berry, Janet (2005) Assessing the performance of protective winter covers for outdoor marble statuary – pilot investigation, In: Verger, I. and Coccia Paterakis, A. and Chahine, C. and Kardes, K. and Eshoj, B. and Hackney, S. and de Tagle, A. and Cassar, M. and Thickett, D. and Villiers, C. and Wouters, J., (eds.) 14th Triennial Meeting The Hague: 12-16 September 2005: Preprints. Earthscan/ James & James, London/ UK, pp. 879-887

Bloch P.; Grzimek W. (1978) Das klassische Berlin. Die Berliner Bildhauerschule im 19. Jahrhundert, Propyläen Verlag, Frankfurt a.M./Berlin/Wien 1978, S.13.

Blum, Rainer (2002) Projekt Winterzelt, Bericht über die Denkmaleinhausungen in Clemenswerth und Weikersheim. In: DBU Abschlussbericht (AZ 12559) 26.06.2002

Borelli, Ernesto (2007) in a letter of ICCROM Rome, 23.04.2007

Castelli, Giovanna (1997) The Risk Map of the Cultural Heritage. In: Istituto per il Restauro, 1997.

Denkmaltopographie Bundesrepublik Deutschland (2003). Denkmale in Berlin. Bezirk Mitte. Ortsteil Mitte, Landesdenkmalamt Berlin (Hg.), Imhof Verlag, Petersberg 2003, S.245f..

Deutsche Bauzeitung (1885), Heft 19, S.128.

Egloffstein, Petra; Franz, Dieter (2005) Wintereinhausung von Grabsteinen am Beispiel des Friedhofs der evangelischen Kirche in Ingelheim, Rheinland-Pfalz. Institut für Steinkonservierung e.V. (Hg.), Bericht Nr.20/2005, S.73-75.

Franzen, Christoph (2008) Wintereinhausungen von Natursteinobjekten, Bericht DD 01 / 2008, Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. Schlossplatz 1, 01067 Dresden

Frick, J.; Grassegger, G.; Reinhardt, H.-W. (1994) Entwicklung und Erprobung eines Qualitätssicherungs- und Überwachungskonzeptes mit zerstörungsfreien Methoden für die konservierten Portale des Heilig-Kreuz-Münsters in Schwäbisch-Gmünd. In: 4th International Conference on Non-Destructive Testing of Works of Art, Berlin 1994

Friedmann, Katie (2008) Die Restaurierungsgeschichte der Schlossbrückenfiguren – Literatur- und Quellenrecherche mit Schadensfortschrittanalyse. Unveröffentlichte Seminararbeit, FH-Potsdam 2008.

Goralczyk, Peter (1984) Restaurierte Skulpturen der ehemaligen Schlossbrücke in Berlin. In: Bildende Kunst, Heft 1, Berlin 1984, S. 11-13.

Goralczyk, Peter; Beeger, Dieter; Materna, Helmut (1988) Zur Verwitterung und Konservierung von Skulpturen aus Carrara-Marmor (Schloßbrückenskulpturen und Humboldt-Denkmale in Berlin). In: Geologie und Denkmalpflege Bd. 35, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1988, S.47-59.

Hüneke, Saskia (2006) Skulpturen, in: Generaldirektion der Stift. Preuß. Schlösser u. Gärten Berlin-Brandenburg (Hrsg.): Marmor, Stein und Eisen bricht – Die Kunst zu bewahren, Potsdam 2006, S.150-152.

Köhler, Wolfram (1999) Marmor und Umwelt Datenbank, DBU-Abschlussbericht1999.

Königfeld, Peter (1998) Die äußere Erscheinung des Zentralbaus zur Zeit von Clemens August sowie Wartung und Pflege in der Folgezeit. In: Die Steinskulpturen am Zentralbau des Jagdschlusses Clemenswerth/ Emsland, München 1998.

Lange, Kathrin persönlich.

Mielke, Anja (2005) Sanssoucis Winterkleider. Studienarbeit (unveröffentl.) FH-Potsdam 2005.

Modern and Contemporary Outdoor Sculpture Conservation: Challenges and Advances, GCI Newsletter 22.2, 2007.

National Trust, [www.nationaltrust.org.uk](http://www.nationaltrust.org.uk)

Precomos, <http://precomos.org/index.php/about/>

Public Monuments and Sculpture Association (PMSA 2009); [www.pmsa.org.uk/aboutus/cf.htm](http://www.pmsa.org.uk/aboutus/cf.htm)

Pullen, Derek; Heumann, Jackie (2007) Modern and Contemporary Outdoor Sculpture Conservation, GCI Newsletter 22.2.2007

Rathgen F (1926) Die Pflege öffentlicher Standbilder, Verlag Walter de Gruyter, Berlin/Leipzig S.47.

Rave, P.-O. (1948) Karl Friedrich Schinkel Lebenswerk, Berlin Teil 2: Stadtpläne, Brücken, Straßen, Tore, Plätze, Deutscher Kunstverlag, Berlin 1948 S.63.

Roedel, Hartmut (2005) Der Putten neue Kleider. Schutz architekturintegrierter Steinplastiken. In: Restauro Heft 7/2005, S.470-471.

Rüdrich, Jörg (2003) Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore. Dissertation an der Georg-August-Universität zu Göttingen 2003.

Rüdrich, Jörg; Rieffel, York, Pirskawetz, Stephan; Alpermann, Holger; Joksch, Ute; Gengnagel, Christoph; Weise, Frank; Plagge, Rudolph; Zhao, Jianhua & Siegesmund, Siegfried (2010) Development and assessment of protective winter covers for marble statues of the Schlossbrücke, Berlin (Germany) 2010

Schmidt, Norbert (2009) Alle Jahre wieder...Wintereinhausungen und Schutzhüllen für Denkmale. In: Restauro Heft 1/2009, S.22.

Schmidt, Norbert (2010) Neue Winterschutzeinhausung für Shakespeare. In: Restauro Heft 2/2010, S.86.-87.

Schulz, Sybille (1987) Denkmäler im Stadtbild Berlins In: Institut für Denkmalpflege Berlin (Hrsg.): Denkmale in Berlin und in der Mark Brandenburg, Weimar 1987, S.88-105.

Springer P (1981) Schinkels Schloßbrücke in Berlin, Propyläen Verlag, Frankfurt a.M./Berlin/ Wien 1981, S.291f.

Stadlbauer, Erwin (2004) Qualitätsmanagement in der Bestandspflege In: Nachhaltiger Schutz 8. Verzeichnisse und Nachweise des kulturellen Erbes, Umwelt und Kulturgüter, Berlin 2004.

Stadlbauer, Erwin; Niemeyer, Rolf; Rösch, Heinrich; Stein, Volker (1998) Zur mineralogisch-chemischen Zusammensetzung und zur chemischen Verwitterung des Bamberger Kalksandsteins-Fallbeispiel „Clemenswerth“. In: Die Steinskulpturen am Zentralbau des Jagdschlusses Clemenswerth/Emsland, Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, Heft 15, München 1998

Vorsorge, Pflege, Wartung. Empfehlungen zur Instandhaltung von Baudenkmalern und ihrer Ausstattung. In: Bayerisches Amt für Denkmalpflege, Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland (Hg.). Denkmalpflege Informationen Ausgabe A 88, München 2002, S.11.

Wennemer, Robert (2009) Monitoring von Steinskulpturen am Beispiel des Jagdschlusses Clemenswerth. Masterthesis (unveröffentl.) HAWK Hildesheim 2009.

Weiß, Gerd; Kaltofen, Andrea (1998) Wartung, Pflege und flankierende Schutzmaßnahmen. In: Die Steinskulpturen am Zentralbau des Jagdschlusses Clemenswerth/Emsland, München 1998, S.128-130.

Will, Thomas (Hg.) (2009) Ein Haus für Göttinnen. Einhausungen für die Skulpturen der Berliner Schlossbrücke, TU-Dresden 2009.

Wölbert, Otto (2005) Winterschutzverkleidungen für witterungsgefährdete Objekte In: Exner, Matthias/ Jakobs, Dörthe (Hrsg.): Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte, ICOMOS Hefte des deutschen Nationalkomitees XLII, 2005.

Zeitschrift für Bauwesen 7 (1857), Berlin, S.97.

## 10. ABBILDUNGSNACHWEIS

- Abb.1 Berlinische Galerie (BG\_FS 035-93.16\_1860.jpg)
- Abb.2 Archiv Landesdenkmalamt Berlin (LDA\_BPK\_30017219.j.jpg)
- Abb.3 Archiv Landesdenkmalamt Berlin (Z, Z 21/1 Mi)
- Abb.4 York Rieffel 2006
- Abb.5-12 Jürgen Renisch - Messbildstelle Dresden 2006
- Abb.13, 14 Archiv Landesdenkmalamt Berlin (01/7775-01/7783)
- Abb.15 Landesbildstelle Berlin (LAB\_F Rep.290\_233113.tif)
- Abb.16 York Rieffel 2006
- Abb.17 Wolfgang Schley 1981
- Abb.18 Landesbildstelle Berlin (LAB\_F Rep.290\_233288.tif)
- Abb.19 York Rieffel 2008
- Abb.20 Ute Joksch 2005
- Abb.21,22 Claudia Herzberg (ITM-Institut, TU-Dresden), o.Datum
- Abb.23 Richard Mc Coy, o.Datum
- Abb.24 Janet Berry 2005
- Abb.25 Robert Wennemer 2009
- Abb.26 <http://www.ciccum.de/impressum.html>, o.Datum
- Abb.27, 28 Wanja Wedekind 2005
- Abb.29 Martin Lehmann 2008
- Abb.30 Christoph Gengnagel
- Abb.31 Stephan Pierskawetz 2008, York Rieffel 2009
- Abb.32 Holger Alpermann, Christoph Gengnagel 2009

---

ENTWICKLUNG UND ÜBERPRÜFUNG VON EINHAUSUNGSSYSTEMEN

DBU PROJEKT NR.: 24000-45

2006 – 2010

**ANHANG**

ABBILDUNGEN

SCHADENSKARTIERUNG

+

SCHADBILDKATALOG



*Abb.1 Schlossbrücke Berlin, Zustand vor 1857 (älteste fotogr. Ansicht der Brücke)*



*Abb.2 Schlossbrücke Berlin, Zustand 1945*



Abb.3 Schlossbrücke Berlin, Zustand 1970



Abb.4 Schlossbrücke Berlin, Figuren 1-4 Südseite, Zustand 2006



Abb.5-8 Schlossbrücke Berlin, Figuren 1-4 Südseite, Zustand 2006



Abb.8-12 Schlossbrücke Berlin, Figuren 5-8 Nordseite, Zustand 2006



Abb. 15 Berlin Kreuzberg, Depot im sog. „Lapidarium“ am Schöneberger Ufer, Schlossbrückenfiguren im April 1980

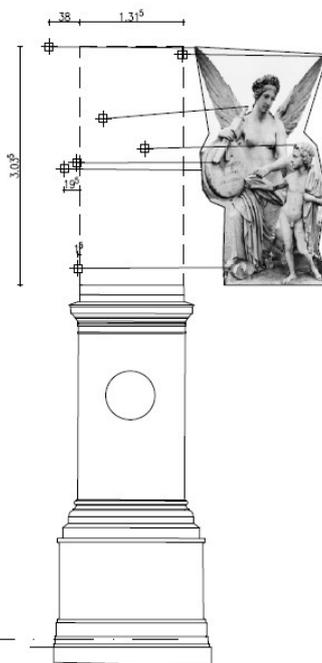
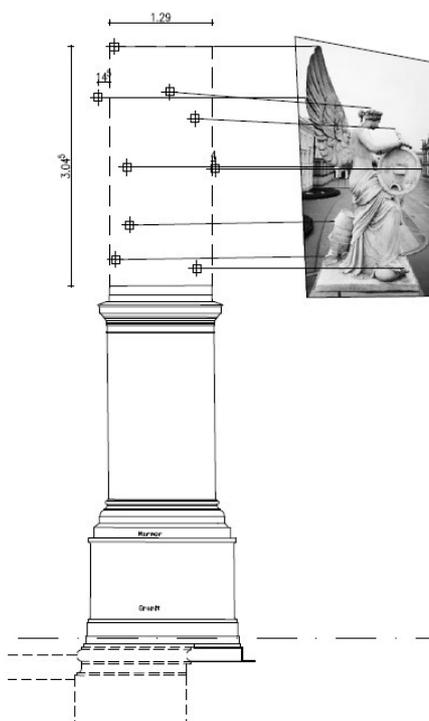


Abb. 16 Gipsabgüsse der Schlossbrückenfiguren 2, 3, 6, 8 im Depot des Deutschen Historischen Museums in Spandau, 2006

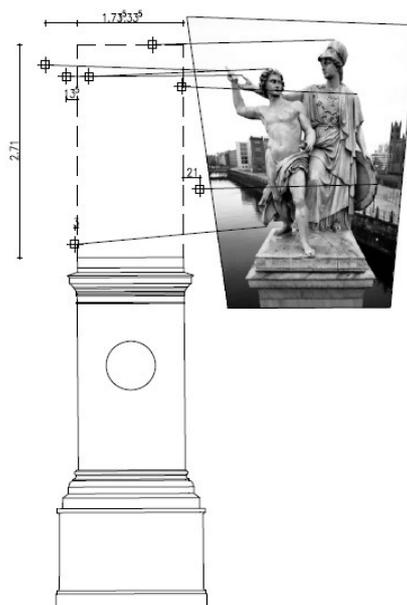
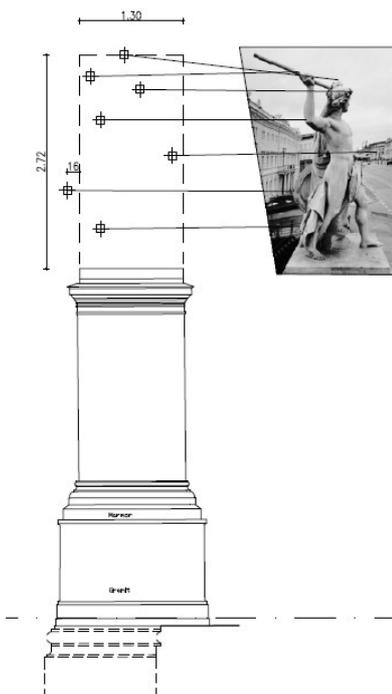


Abb.17, 18 Abtransport der Schlossbrückenfiguren vom „Lapidarium“ in Kreuzberg nach Berlin (Ost) 1981

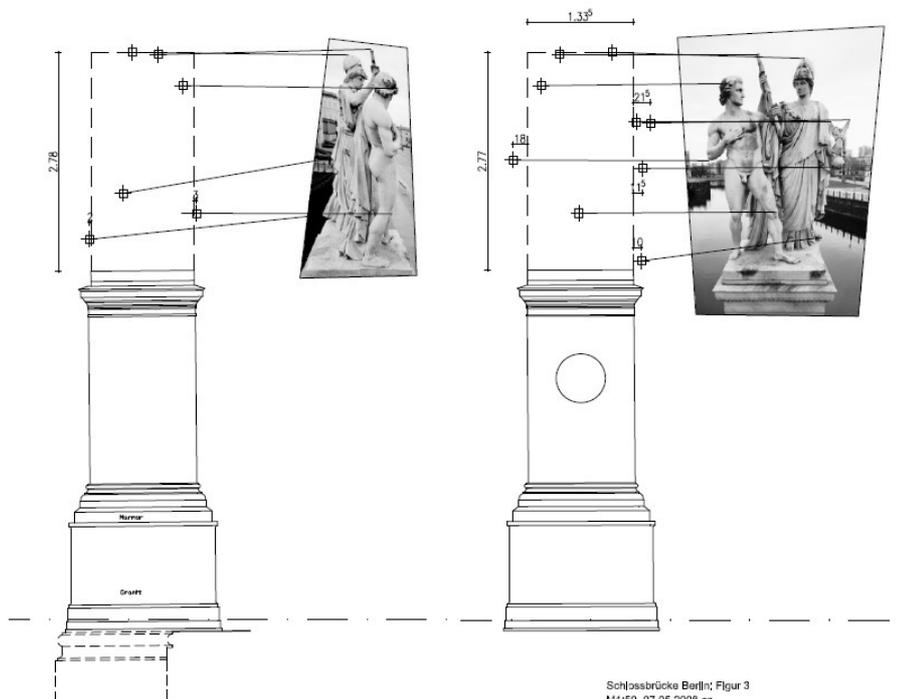
### Schlossbrücke Berlin, Fig. 1-3, Tachymetrisches Aufmaß 2007 (Büro a's'd Berlin)



Schlossbrücke Berlin; Figur 1  
M1:50, 07.05.2008 ap  
a's'd Lehrter Str.57 10557 Berlin T +49-30-23 36 96 72 /73 1 F-74 1 mail@buero-ssd.de

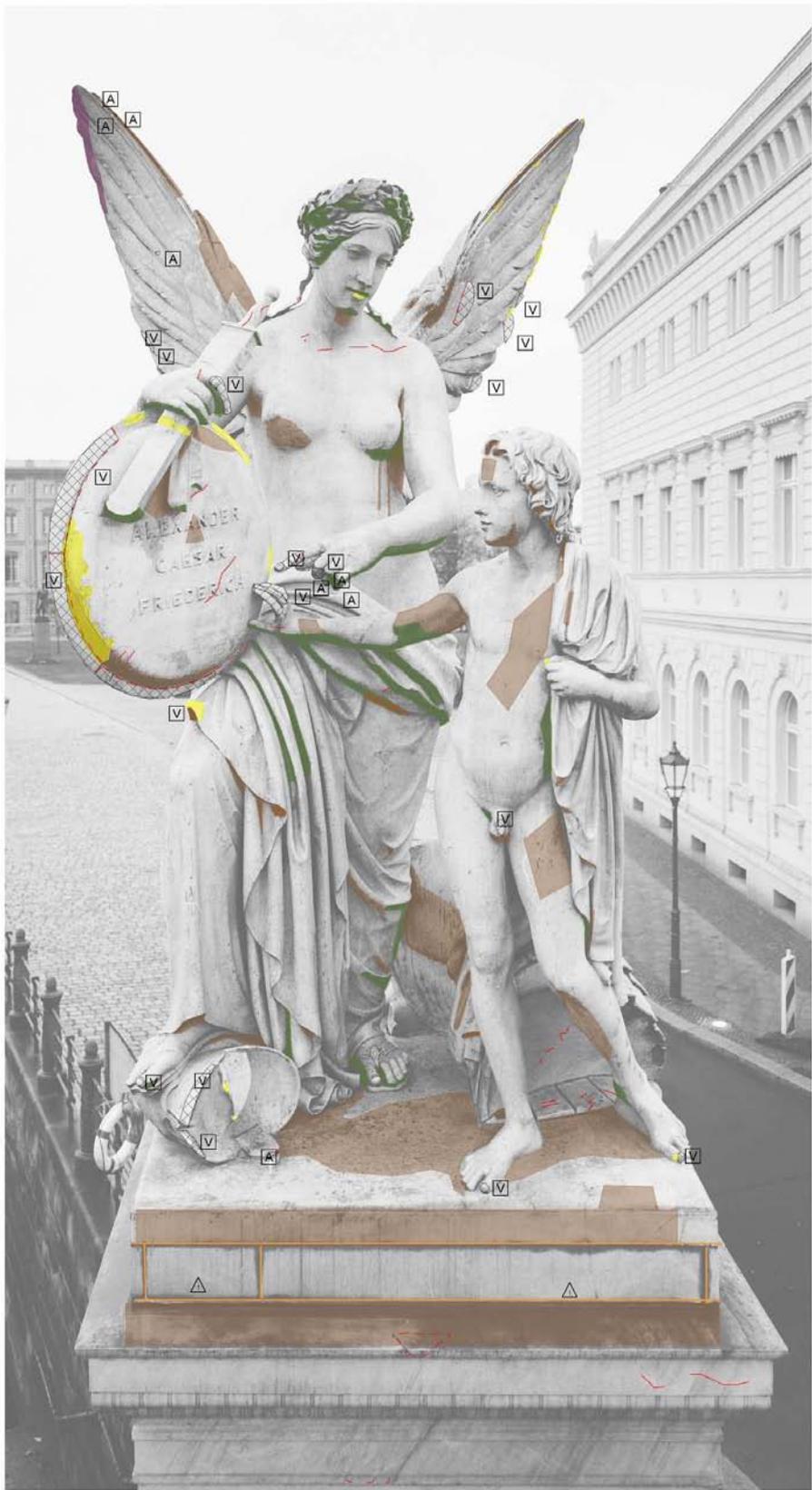


Schlossbrücke Berlin; Figur 2  
M1:50, 07.05.2008 ap  
a's'd Lehrter Str.57 10557 Berlin T +49-30-23 36 96 72 /73 1 F-74 1 mail@buero-ssd.de



Schlossbrücke Berlin; Figur 3  
M1:50, 07.05.2008 ap  
a's'd Lehnstr.57 10557 Berlin T +49-30-23 36 96 72 /-73 1 F-74 1 mail@suero-ss.de

Schlossbrücke Berlin, Schadenskartierung Fig. 1- 3, (Bauer-Bornemann 2007)



LEGENDE

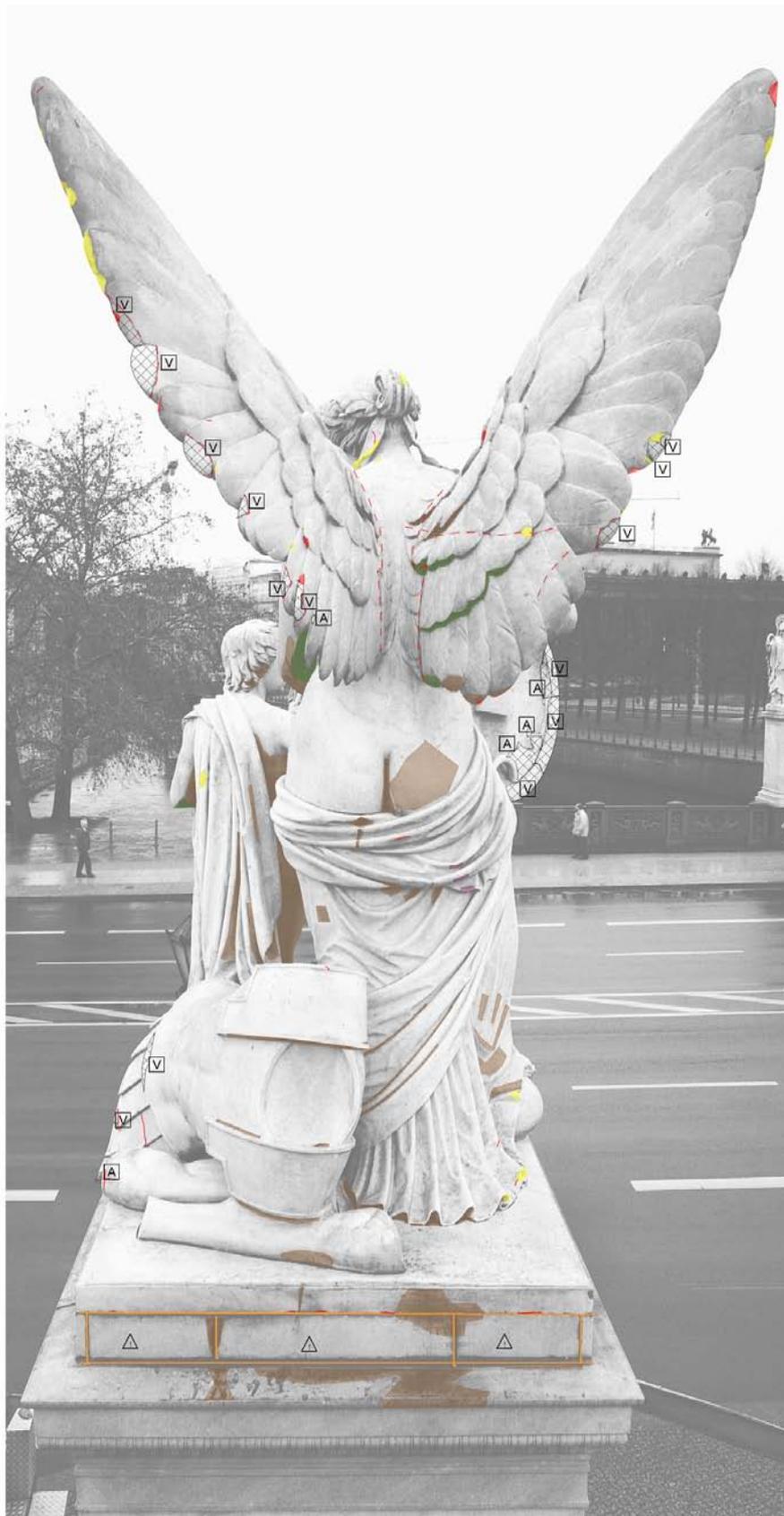
I. BESTAND

-  Steingrünung / Vierung
-  Vierung
-  Alte Antragung
-  Armierung / Nadel

II. SCHÄDEN

-  Verschmutzung
-  Krusten
-  Biogener Bewuchs
-  Rückritterung
-  Gefügezerfall
-  schadhafte alte Klebung/  
schadhafte alter Rissverschluss
-  Riss
-  Fehlstelle / Ausbruch
-  Lose Werkstücke
-  Marode Fugen
-  schadhafte/  
unsachgemäße Antragung

<b>SCHLOSSBRÜCKE, UNTER DEN LINDEN</b> Berlin, Mitte		
Figurguppe 1 - 4 Südseite Restaurierung 2007/2008		
<b>ZUSTANDS- UND SCHADENSKARTIERUNG</b> Figur 1	Blatt Nr. 1	
Bauer-Bornemann, Bielefeld	ohne Maßstab	Geografischer S. Behan
Datum: Oktober 2007		



LEGENDE

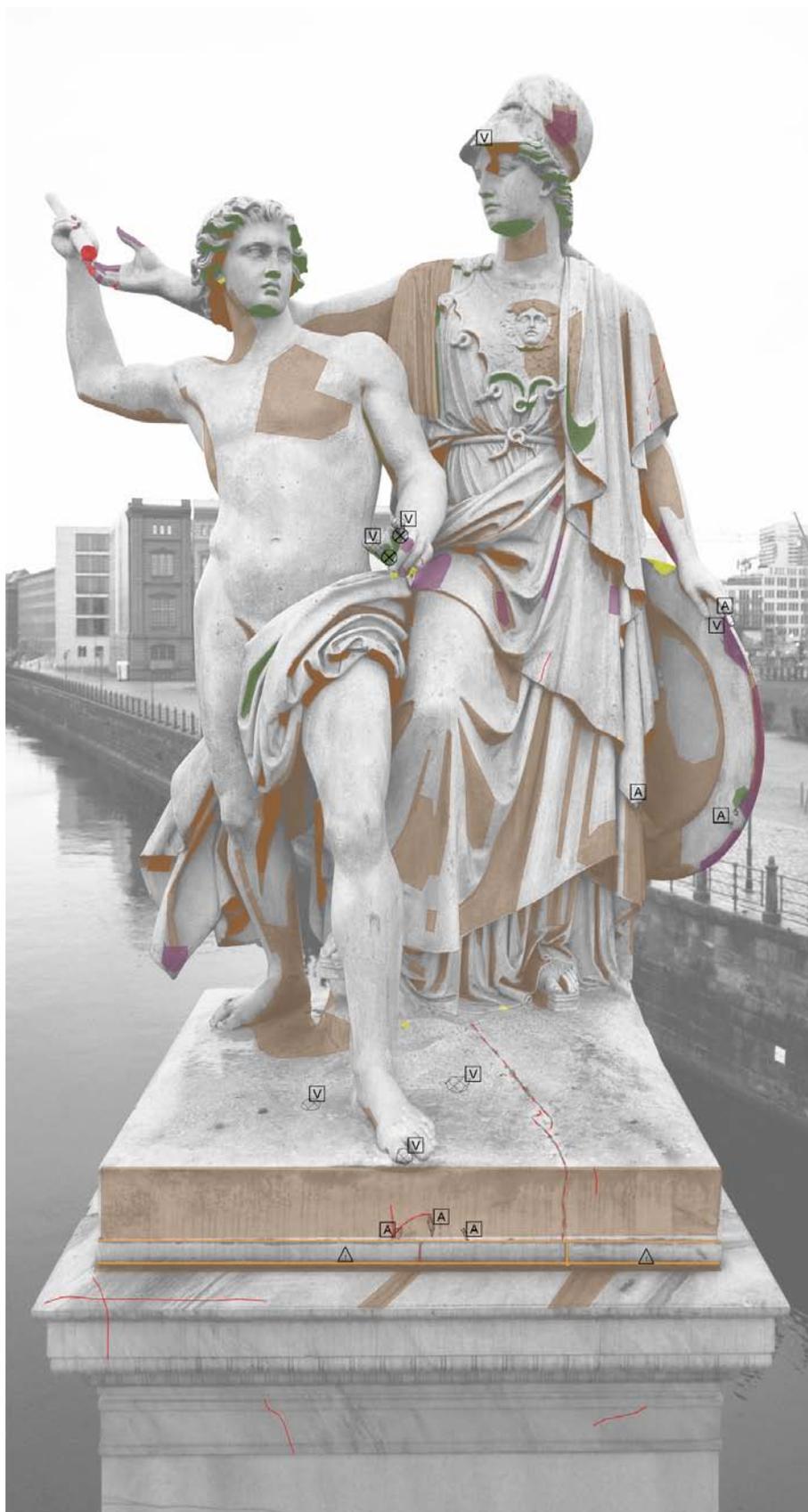
I. BESTAND

-  Steinerklärung / Vierung
-  Vierung
-  Alte Antragung
-  Armierung / Nadel

II. SCHÄDEN

-  Verschmutzung
-  Krusten
-  Biogener Bewuchs
-  Rückwitterung
-  Gefügezerfall
-  schadhafte alte Klebung/  
schadhafte alter Rissverschluss
-  Riss
-  Fehlstelle / Ausbruch
-  Lose Werkstücke
-  Marode Fugen
-  schadhafte/  
unsachgemäße Antragung

<b>SCHLOSSBRÜCKE, UNTER DEN LINDEN</b>		
Berlin, Mitte		
Figurengruppe 1 - 4, Südseite Restauration 2007/2008		
<b>ZUSTANDS- UND SCHADENSKARTIERUNG</b>	Blatt Nr. 3	
Eauer-Bonemann, Bamberg		
Datum Oktober 2007	ohne Maßstab	Bearbeiter S Behan



LEGENDE

I. BESTAND

-  Steingängung / Vierung
-  Vierung
-  Alte Antragung
-  Armierung / Nadel

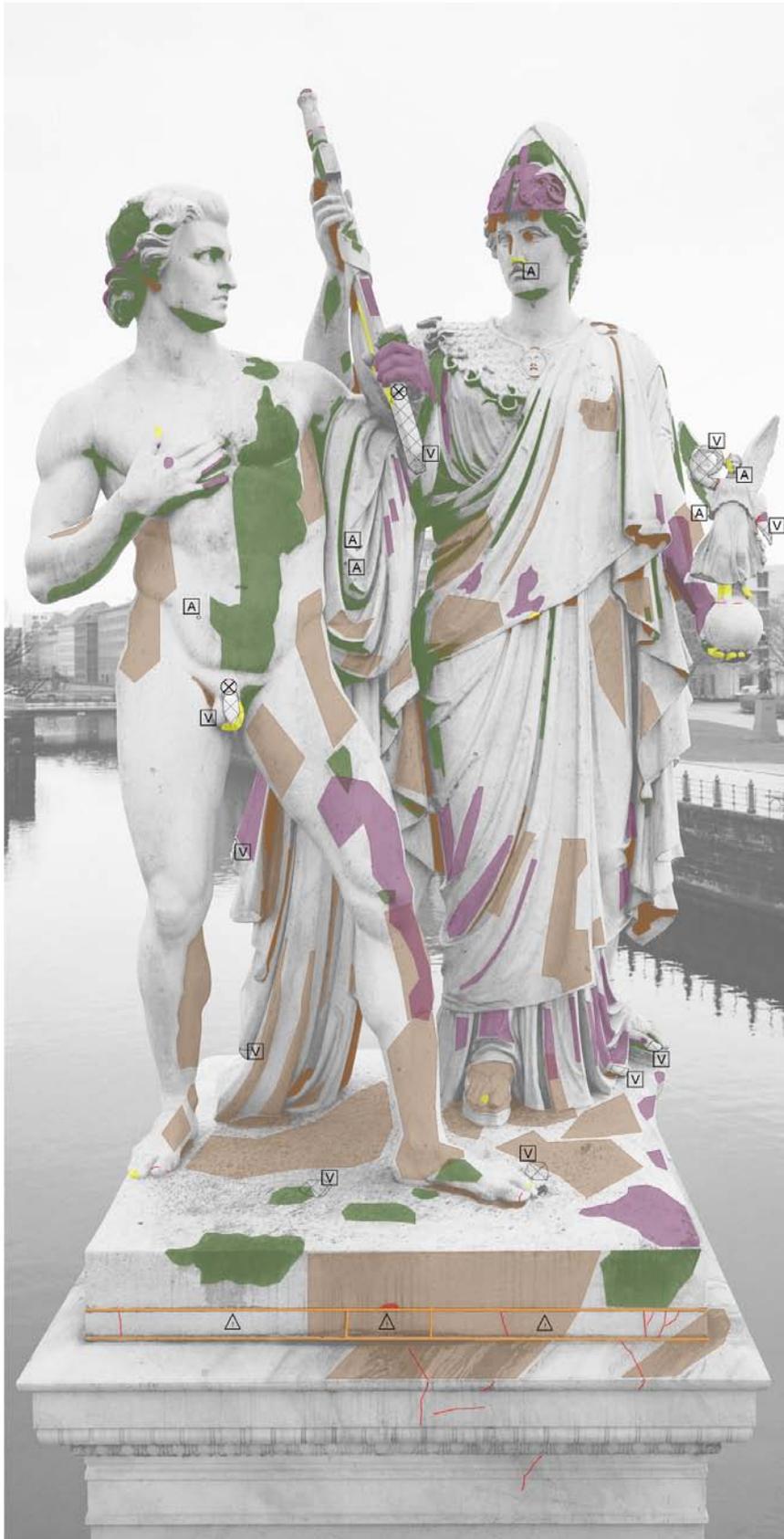
II. SCHÄDEN

-  Verschmutzung
-  Krusten
-  Biogener Bewuchs
-  Rückwitterung
-  Gefügezerfall
-  schadhafte alte Klebung / schadhafter alter Rissverschluss
-  Riss
-  Fehlstelle / Ausbruch
-  Lose Werkstücke
-  Marode Fugen
-  schadhafte / unsachgemäße Antragung

<b>SCHLOSSBRÜCKE, UNTER DEN LINDEN Berlin, Mitte</b>		
Figurengruppe 1 - 4, Südseite Restaurierung 2007/2008		
<b>ZUSTANDS- UND SCHADENSKARTIERUNG Figur 2</b>	Blatt Nr.	1
Rauer-Bornemann, Bamberg		
Datum: Oktober 2007	ohne Maßstab	Bearbeiter: S. Behren



<b>SCHLOSSBRÜCKE, UNTER DEN LINDEN Berlin, Mitte</b>		
Figurengruppe 1 - 4, Südseite Restauration 2007/2008		
<b>ZUSTANDS- UND SCHADENSKARTIERUNG Figur 2</b>	Blatt Nr.	3
Bauer-Bonemann, Bamberg		
Datum: Oktober 2007	ohne Maßstab	Bearbeiter: S. Behn



LEGENDE

I. BESTAND

-  SteingläNZung / Vierung
-  Vierung
-  Alte Antrngung
-  Armierung / Nadel

II. SCHÄDEN

-  Verschmutzung
-  Krusten
-  Biogener Bewuchs
-  Rückwitterung
-  Gefügezerfall
-  schadhafte alte Klebung/  
schadhafte alter Rissverschluss
-  Riss
-  Fehlstelle / Ausbruch
-  Lose Werkstücke
-  Marode Fugen
-  schadhafte/  
unsachgemäÙe Antrngung

<b>SCHLOSSBRÜCKE, UNTER DEN LINDEN</b> Berlin, Mitte	
Figurguppe 1 - 4 Südseite Restaurierung 2007/2008	
<b>ZUSTANDS- UND SCHADENSKARTIERUNG</b> Figur 3	Blatt Nr. 1
Bauer Bornemann, Bamberg	
Datum: Oktober 2007	Bearbeiter: S. Behm

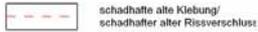
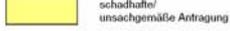


LEGENDE

I. BESTAND

-  Steingänzung / Vierung
-  Vierung
-  Alte Antragung
-  Armierung / Nadel

II. SCHÄDEN

-  Verschmutzung
-  Krusten
-  Biogener Bewuchs
-  Rückwitterung
-  Gefügezerfall
-  schadhafte alte Klebung/  
schadhafte alter Rissverschluss
-  Riss
-  Fehlstelle / Ausbruch
-  Lose Werkstücke
-  Marode Fugen
-  schadhafte/  
unsachgemäße Antragung

<b>SCHLOSSBRÜCKE, UNTER DEN LINDEN</b> Berlin, Mitte		
Figurengruppe 1 - 4, Südseite Restaurierung 2007/2008		
<b>ZUSTANDS- UND SCHADENSKARTIERUNG</b> Figur 3	Blatt Nr. 3	
Bauer-Bornemann, Eberberg		
Datum: Oktober 2007	ohne Maßstab	Bearbeiter: S. Behn

**Schlossbrücke Berlin, Schadbildkatalog Fig. 1- 3, 2007**

<b>Auftraggeber:</b> Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Württembergische Str. 6 10707 Berlin	<b>Objekt:</b> Figurengruppe I - IV Schlossbrücke, Berlin-Mitte (Südseite)	<b>Verfasser:</b> Steinrestaurierung Bauer-Bornemann GmbH Oberer Stephansberg 37 96049 Bamberg  Bearbeiter: J. Schmitt		<b>Blatt Nr.:</b> 5
				<b>Datum:</b> 10/2007
<b>Schadbildkatalog</b>		Typ I    Verschmutzung	Figur 4 - Ostansicht	
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-start;">  <div data-bbox="1075 954 1257 1025" style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                 Typ: I                  Legende: <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #8B4513; border: 1px solid black;"></span> </div> </div> <p data-bbox="368 987 512 1010">Verschmutzung</p> <p data-bbox="360 1055 504 1077"><b>Beschreibung:</b></p> <p data-bbox="360 1104 1174 1126">Auf dem Marmor ist eine Verschmutzung in Form von Flecken, bzw. Spritzern, anhaftend.</p>				

<b>Auftraggeber:</b> Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Württembergische Str. 6 10707 Berlin	<b>Objekt:</b> Figurengruppe I - IV Schlossbrücke, Berlin-Mitte (Südseite)	<b>Verfasser:</b> Steinrestaurierung Bauer-Bornemann GmbH Oberer Stephansberg 37 96049 Bamberg  Bearbeiter: J. Schmitt		<b>Blatt Nr.:</b> 6
				<b>Datum:</b> 10/2007
<b>Schadbildkatalog</b>		Typ II    Kruste	Figur 3 - Ostansicht	
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-start;">  <div data-bbox="1075 1861 1257 1933" style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                 Typ: II                  Legende: <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #8B4513; border: 1px solid black;"></span> </div> </div> <p data-bbox="368 1872 440 1895">Kruste</p> <p data-bbox="360 1951 504 1973"><b>Beschreibung:</b></p> <p data-bbox="360 1995 1174 2040">In geschützten Bereichen, insbesondere in den Falten, sind festanhaftende Krusten zu finden.</p>				

<b>Auftraggeber:</b> Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Württembergische Str. 6 10707 Berlin	<b>Objekt:</b> Figurengruppe I - IV Schlossbrücke, Berlin-Mitte (Südseite)	<b>Verfasser:</b> Steinrestaurierung Bauer-Bornemann GmbH Oberer Stephansberg 37 96049 Bamberg Bearbeiter: J. Schmitt		<b>Blatt Nr.:</b> 7	
				<b>Datum:</b> 10/2007	
<b>Schadbildkatalog</b>		Typ III	biogener Bewuchs	Figur 4 - Nordansicht	
<div style="display: flex; justify-content: space-between;">  <div data-bbox="1075 880 1254 949" style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     Typ: III                      Legende: <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #6aa84f; border: 1px solid black;"></span> </div> </div> <p data-bbox="389 898 560 925">biogener Bewuchs</p>					
<p><b>Beschreibung:</b>                  Der Bereich hat Ergänzungen, die sowohl als Vierung als auch als Antragung ausgeführt worden sind. Die originale Marmoroberfläche ist verwittert und weist ein Rissnetz auf. Die Ergänzungen sind schadhaft und die Klebefugen haben defekte Flanken. Überwiegend an Unterschnidungen befindet sich biogener Bewuchs.</p>					

<b>Auftraggeber:</b> Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Württembergische Str. 6 10707 Berlin	<b>Objekt:</b> Figurengruppe I - IV Schlossbrücke, Berlin-Mitte (Südseite)	<b>Verfasser:</b> Steinrestaurierung Bauer-Bornemann GmbH Oberer Stephansberg 37 96049 Bamberg Bearbeiter: J. Schmitt		<b>Blatt Nr.:</b> 9	
				<b>Datum:</b> 10/2007	
<b>Schadbildkatalog</b>		Typ IVa	Gefügezerfall	Figur 4 - Südansicht	
<div style="display: flex; justify-content: space-between;">  <div data-bbox="1070 1821 1249 1890" style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     Typ: IVa                      Legende: <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #8e44ad; border: 1px solid black;"></span> </div> </div> <p data-bbox="355 1839 616 1865">Auflösen der Gefügestruktur</p>					
<p><b>Beschreibung:</b>                  Das Phänomen des Gefügezerfalls lässt sich an besonders exponierten Bereichen des Marmors finden. Hier treten netzartige Rissysteme an der Oberfläche und mürbe Zonen mit absandenen Partien auf.</p>					

<b>Auftraggeber:</b> Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Württembergische Str. 6 10707 Berlin	<b>Objekt:</b> Figurengruppe I - IV Schlossbrücke, Berlin-Mitte (Südseite)	<b>Verfasser:</b> Steinrestaurierung Bauer-Bornemann GmbH Oberer Stephansberg 37 96049 Bamberg  Bearbeiter: J. Schmitt		<b>Blatt Nr.:</b> 11	
				<b>Datum:</b> 10/2007	
Schadbildkatalog		Typ V	Riss	Figur 1 - Westansicht	
 <p data-bbox="368 909 411 931">Riss</p> <div data-bbox="1075 882 1257 954" style="border: 1px solid black; padding: 2px;">                 Typ: V                  Legende: <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid red; vertical-align: middle;"></span> </div>					
<b>Beschreibung:</b> An einigen Stellen im Marmor treten Risse auf. Die meisten Risse im Material Marmor sind Haarrisse.					

<b>Auftraggeber:</b> Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Württembergische Str. 6 10707 Berlin	<b>Objekt:</b> Figurengruppe I - IV Schlossbrücke, Berlin-Mitte (Südseite)	<b>Verfasser:</b> Steinrestaurierung Bauer-Bornemann GmbH Oberer Stephansberg 37 96049 Bamberg  Bearbeiter: J. Schmitt		<b>Blatt Nr.:</b> 13	
				<b>Datum:</b> 10/2007	
Schadbildkatalog		Typ VI	Fehlstelle/Abplatzung	Figur 4 - Südansicht	
 <p data-bbox="368 1825 459 1848">Fehlstelle</p> <div data-bbox="1075 1809 1257 1881" style="border: 1px solid black; padding: 2px;">                 Typ: VI                  Legende: <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: red; vertical-align: middle;"></span> </div>					
<b>Beschreibung:</b> In einigen Bereichen befinden sich Aufwölbungen, mit teilweiser bereits abgeplatzter Oberfläche. Die sich daraus ergebenden Fehlstellen sanden ab. An den Rändern sind unter den Aufwölbungen Lockerzonen.					

<b>Auftraggeber:</b> Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Württembergische Str.6 10707 Berlin	<b>Objekt:</b> Figurengruppe I - IV Schlossbrücke, Berlin-Mitte (Südseite)	<b>Verfasser:</b> Steinrestauration Bauer-Bornemann GmbH Oberer Stephansberg 37 96049 Bamberg  <b>Bearbeiter:</b> J. Schmitt		<b>Blatt Nr.:</b> 14	
				<b>Datum:</b> 10/2007	
<b>Schadbildkatalog</b>		Typ VI	Fehlstelle/Abplatzung	Figur 2 - Nordansicht	
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div data-bbox="363 465 1018 891">  </div> <div data-bbox="1074 891 1257 958">                 Typ: VI                  Legende: <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #e67e22; border: 1px solid black;"></span> </div> </div> <p data-bbox="363 902 467 925">Fehlstellen</p> <p data-bbox="352 981 1177 1093"><b>Beschreibung:</b>                  Der Stab hat Ergänzungen, alte Rissverschlüsse und Klebungen. Die Marmoroberfläche ist verwittert und weist viele Fehlstellen auf. Alte Dübel schauen heraus. Hier befinden sich Fehlstellen durch Abbruch.</p>					

<b>Auftraggeber:</b> Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Württembergische Str. 6 10707 Berlin	<b>Objekt:</b> Figurengruppe I - IV Schlossbrücke, Berlin-Mitte (Südseite)	<b>Verfasser:</b> Steinrestauration Bauer-Bornemann GmbH Oberer Stephansberg 37 96049 Bamberg  <b>Bearbeiter:</b> J. Schmitt		<b>Blatt Nr.:</b> 16	
				<b>Datum:</b> 10/2007	
<b>Schadbildkatalog</b>		Typ VIIa	schadhafte Antragung	Figur 4 - Südansicht	
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div data-bbox="363 1397 651 1823">  </div> <div data-bbox="1074 1823 1257 1890">                 Typ: VIIa                  Legende: <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #f1c40f; border: 1px solid black;"></span> </div> </div> <p data-bbox="363 1868 579 1890">defekte Altergänzungen</p> <p data-bbox="352 1912 1177 2002"><b>Beschreibung:</b>                  Die Steinersatzmasse ist gerissen und lose. Die ergänzte originale Marmoroberfläche ist verwittert und weist ein Rissnetz auf.</p>					

<b>Auftraggeber:</b> Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Württembergische Str. 6 10707 Berlin	<b>Objekt:</b> Figurengruppe I - IV Schlossbrücke, Berlin-Mitte (Südseite)	<b>Verfasser:</b> Steinrestaurierung Bauer-Bornemann GmbH Oberer Stephansberg 37 96049 Bamberg  <b>Bearbeiter:</b> J. Schmitt		<b>Blatt Nr.:</b> 17  <b>Datum:</b> 10/2007
<b>Schadbildkatalog</b>		Typ VIIb schadhafte Rissanierung	Figur 1 - Westansicht	
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-left: auto;">                 Typ: VIIb                  Legende:  </div> </div> <p style="margin-top: 10px;">schadhafte Rissanierung</p>				
<p><b>Beschreibung:</b></p> <p>Alte Risse sind bei früheren Maßnahmen geschlossen worden. Die meisten dieser Rissverschlüsse weisen defekte Flanken auf oder sind gänzlich offen. An den Figuren treten diverse alte Rissverkitungen auf, die überwiegend defekt sind. Die Flanken sind gerissen oder die Rissfuge gänzlich offen.</p>				

<b>Auftraggeber:</b> Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Württembergische Str. 6 10707 Berlin	<b>Objekt:</b> Figurengruppe I - IV Schlossbrücke, Berlin-Mitte (Südseite)	<b>Verfasser:</b> Steinrestaurierung Bauer-Bornemann GmbH Oberer Stephansberg 37 96049 Bamberg  <b>Bearbeiter:</b> J. Schmitt		<b>Blatt Nr.:</b> 18  <b>Datum:</b> 10/2007
<b>Schadbildkatalog</b>		Typ VIIb defekte Klebung	Figur 1 - Westansicht	
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-left: auto;">                 Typ: VIIb                  Legende:  </div> </div> <p style="margin-top: 10px;">Schale, defekte alte Klebung</p>				
<p><b>Beschreibung:</b></p> <p>In einigen Bereichen befinden sich alte Klebungen. Hier wurde eine Schale sowohl in sich als auch an die Figur geklebt. Die Klebung ist abgerissen, so dass sich hier eine breite Fuge gebildet hat.</p>				

<b>Auftraggeber:</b> Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Württembergische Str. 6 10707 Berlin	<b>Objekt:</b> Figurengruppe I - IV Schlossbrücke, Berlin-Mitte (Südseite)	<b>Verfasser:</b> Steinrestaurierung Bauer-Bornemann GmbH Oberer Stephansberg 37 96049 Bamberg <hr/> Bearbeiter: J. Schmitt		<b>Blatt Nr.:</b> 19 <hr/> <b>Datum:</b> 10/2007				
<b>Schadbildkatalog</b>		Typ VIII marode Fuge	Figur 1 - Westansicht					
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 40%;">  </div> <div style="width: 55%; text-align: right;"> <table border="1" data-bbox="1082 902 1262 976"> <tr> <td>Typ: VIII</td> <td style="width: 20px; height: 10px; border: 1px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>Legende:</td> <td style="width: 20px; height: 10px; border: 1px solid black;"></td> </tr> </table> </div> </div> <p data-bbox="379 925 496 954">marode Fuge</p>					Typ: VIII		Legende:	
Typ: VIII								
Legende:								
<p><b>Beschreibung:</b>                  Der Sockelbereich weist an den Fugenflanken Abplatzungen auf. Die Fugen sind überwiegend defekt. Teilweise fehlt das Fugenmaterial ganz. Die Spannungen zwischen den Fugen und den Platten haben hier zu den Abplatzungen und defekten, bzw. offenen Fugen geführt.</p>								

<b>Auftraggeber:</b> Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Württembergische Str. 6 10707 Berlin	<b>Objekt:</b> Figurengruppe I - IV Schlossbrücke, Berlin-Mitte (Südseite)	<b>Verfasser:</b> Steinrestaurierung Bauer-Bornemann GmbH Oberer Stephansberg 37 96049 Bamberg <hr/> Bearbeiter: J. Schmitt		<b>Blatt Nr.:</b> 20 <hr/> <b>Datum:</b> 10/2007				
<b>Schadbildkatalog</b>		Typ VIII marode Fuge	Figur 4 - Südansicht					
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="width: 45%;">  </div> <div style="width: 45%;">  </div> </div> <p data-bbox="379 1697 692 1727">lose Riemchen, defekte Silikonfuge</p> <div style="text-align: right; margin-top: 20px;"> <table border="1" data-bbox="1082 1839 1262 1912"> <tr> <td>Typ: VIII</td> <td style="width: 20px; height: 10px; border: 1px solid black;"></td> </tr> <tr> <td>Legende:</td> <td style="width: 20px; height: 10px; border: 1px solid black;"></td> </tr> </table> </div>					Typ: VIII		Legende:	
Typ: VIII								
Legende:								
<p><b>Beschreibung:</b>                  Die Silikonverfugung ist nicht mehr intakt, die Fugenflanken sind offen und die Riemchen sind alle locker.</p>								

<b>Auftraggeber:</b> Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Württembergische Str. 6 10707 Berlin	<b>Objekt:</b> Figurengruppe I - IV Schlossbrücke, Berlin-Mitte (Südseite)	<b>Verfasser:</b> Steinrestaurierung Bauer-Bornemann GmbH Oberer Stephansberg 37 96049 Bamberg		<b>Blatt Nr.:</b> 16
		<b>Bearbeiter:</b> J. Schmitt		<b>Datum:</b> 10/2007

<b>Schadbildkatalog</b>	Typ VIIa schadhafte Antragung	Figur 4 - Südansicht
-------------------------	-------------------------------	----------------------



defekte Altergänzungen

Typ: VIIa  
 Legende: 

**Beschreibung:**

Die Steinersatzmasse ist gerissen und lose. Die ergänzte originale Marmoroberfläche ist verwittert und weist ein Rissnetz auf.

<b>Auftraggeber:</b> Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Württembergische Str.6 10707 Berlin	<b>Objekt:</b> Figurengruppe I - IV Schlossbrücke, Berlin-Mitte (Südseite)	<b>Verfasser:</b> Steinrestaurierung Bauer-Bornemann GmbH Oberer Stephansberg 37 96049 Bamberg		<b>Blatt Nr.:</b> [Redacted]
		<b>Bearbeiter:</b> J. Schmitt		<b>Datum:</b> 10/2007

<b>Schadbildkatalog</b>	Typ IX Vierung/bildhauerische Ergänzung	Figur 2 - Nordansicht
-------------------------	---	-----------------------



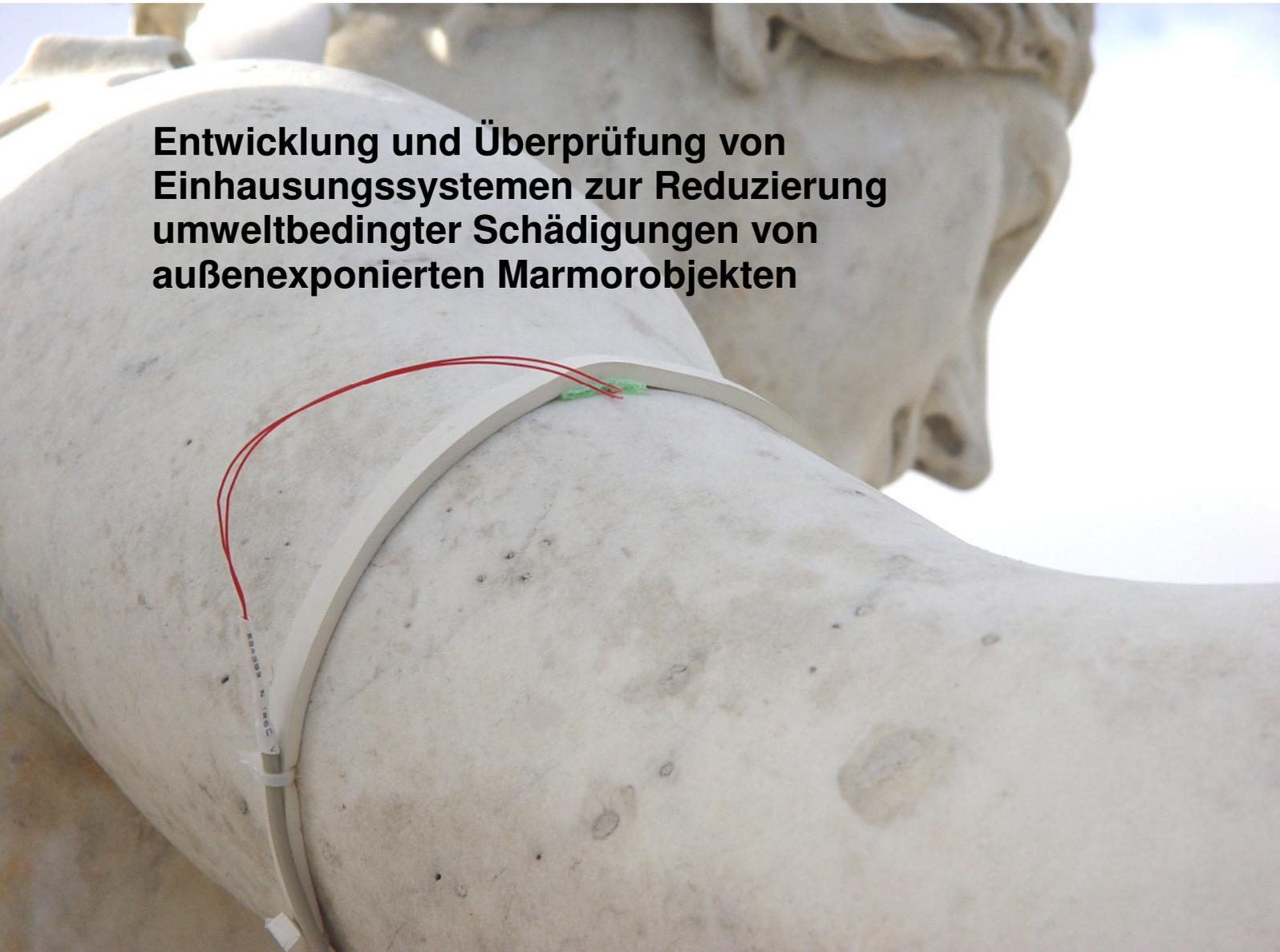
Vierung/bildhauerische Ergänzung

Typ: IX  
 Legende: 

**Beschreibung:**

In vorausgehenden Restaurierungen wurden Bereiche mittels Vierungen ergänzt. Diese Vierungen sind teilweise locker und teilweise defekt.

Abschlussbericht 2011



Entwicklung und Überprüfung von  
Einhausungssystemen zur Reduzierung  
umweltbedingter Schädigungen von  
außenexponierten Marmorobjekten

**Fachgruppe 7.1 „Baustoffe“**  
**Arbeitsgruppe „Bauwerksdiagnose, Transport- und Schädigungsprozesse“**  
Leiter der Arbeitsgruppe: Dr.-Ing. Frank Weise  
Bearbeiter: Dipl.-Ing. Stephan Pirskawetz

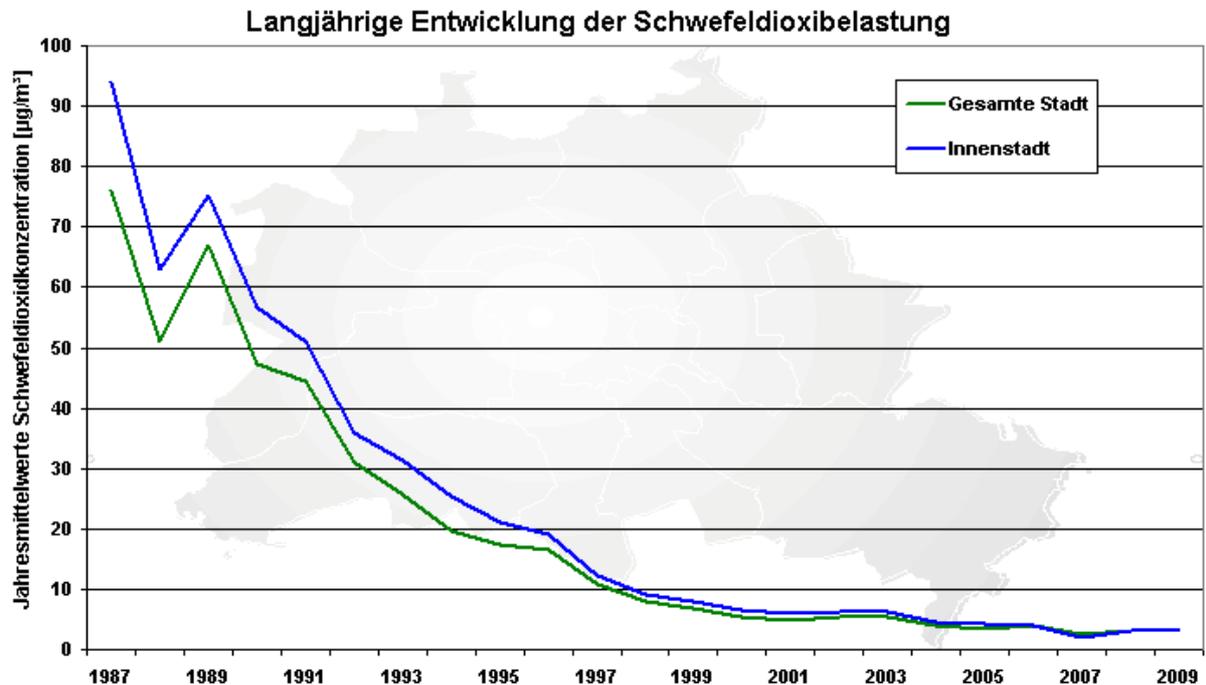
## **Einleitung**

Die Entwicklung eines effektiven Schutzsystems für die Schlossbrückenskulpturen setzt detaillierte Kenntnisse über den aktuellen Zustand der Skulpturen, die Verwitterungsmechanismen des Marmors und die auf die Skulpturen einwirkenden klimatischen Belastungen voraus.

Innerhalb dieses interdisziplinären Forschungsprojektes war es die Aufgabe der BAM, die auf die Skulpturen einwirkenden Schadstoffbelastungen sowie Klimafaktoren und die hygrometrische Reaktion der Skulpturen auf diese Belastungen zu untersuchen und zu dokumentieren. Des Weiteren wurde untersucht, welchen Einfluss verschiedene Schutzsysteme auf die klimatischen Belastungen der Skulpturen haben. Hierfür wurde ein umfangreiches Klimamonitoringsystem an den Skulpturen installiert. Auch der Bau der gemeinsam mit den Projektpartnern konzipierten innovativen Testeinhausung fiel in den Aufgabenbereich der BAM. Die Auswirkungen der klimatischen Einflüsse auf das Gefüge des Marmors wurden anhand von an den Skulpturen ausgelagerten Referenzproben untersucht. Die Analyse der mikrobiologischen Belastung erfolgte an Proben von Staubablagerungen auf den Skulpturen. Die gewonnenen Daten bilden die Grundlage zur Bewertung der getesteten Schutzsysteme und zur numerischen Simulation des thermodynamischen Systems Außenklima – Schutzsystem – Skulptur und somit zur Optimierung des Schutzsystems.

## Schadstoffbelastung der Skulpturen

Die Luftschadstoffbelastung in Berlin ist in den letzten Jahren deutlich zurückgegangen. Besonders deutlich wird dies am Beispiel der Schwefeldioxidimmissionen (Abbildung 1). Zurückzuführen ist dies unter anderem auf die Installation von Rauchgasentschwefelungsanlagen in Kraftwerken, der Sanierung und Stilllegung von Industrieanlagen und der Einführung von schwefelarmen Kraftstoffen [1].



**Abbildung 1:** Langjährige Entwicklung der Schwefeldioxidbelastung in Berlin [1]

Auch die Belastung der Luft mit Kohlenmonoxid ist, vor allem an Hauptverkehrsstraßen, aufgrund der Einführung von geregelten Katalysatoren in Kraftfahrzeugen, stark zurückgegangen (Abbildung 2). Weniger deutlich ist der Rückgang der Stickstoffdioxidbelastung (Abbildung 3). Dies betrifft insbesondere die Hauptverkehrsstraßen und somit auch den Standort Schlossbrücke [1].

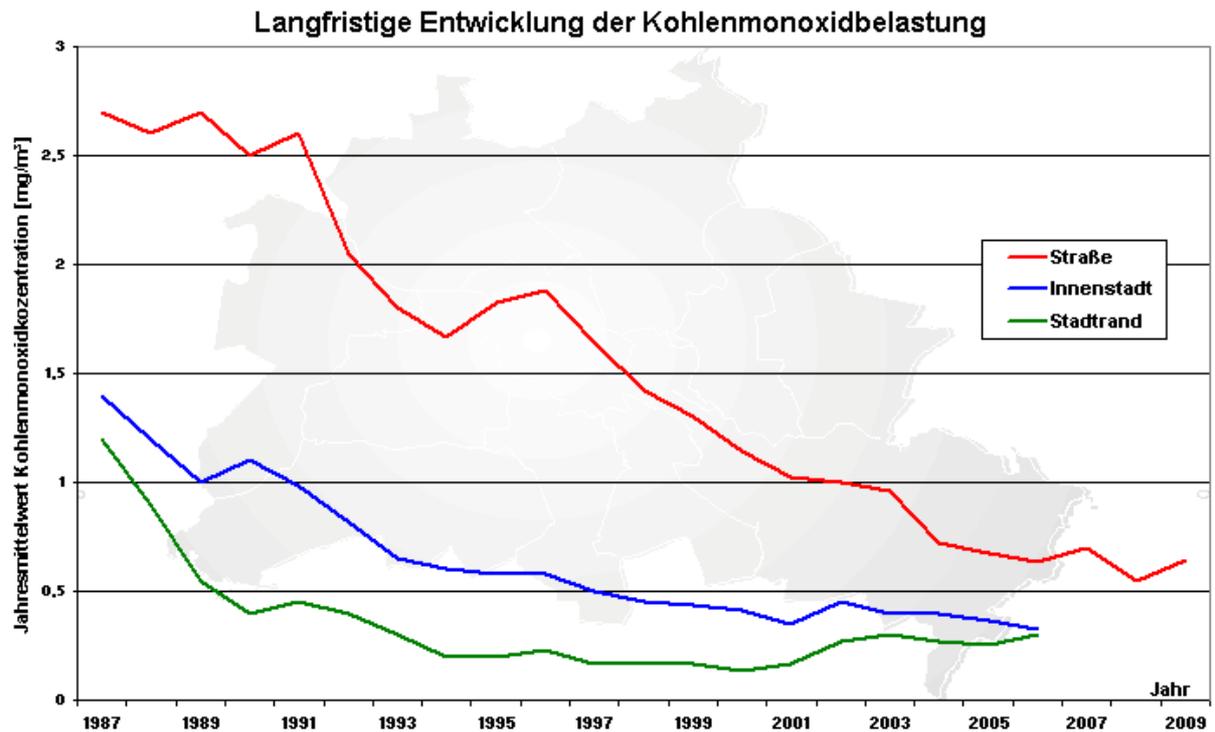


Abbildung 2: Langjährige Entwicklung der Kohlenmonoxidbelastung in Berlin [1]

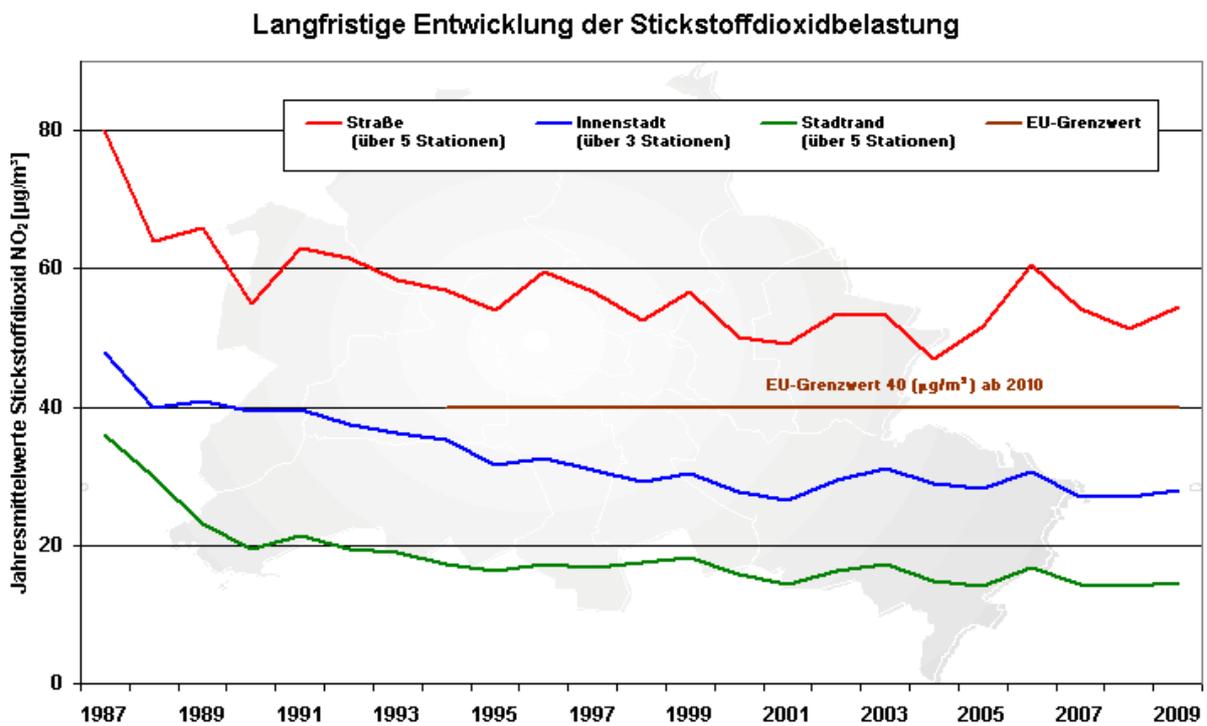
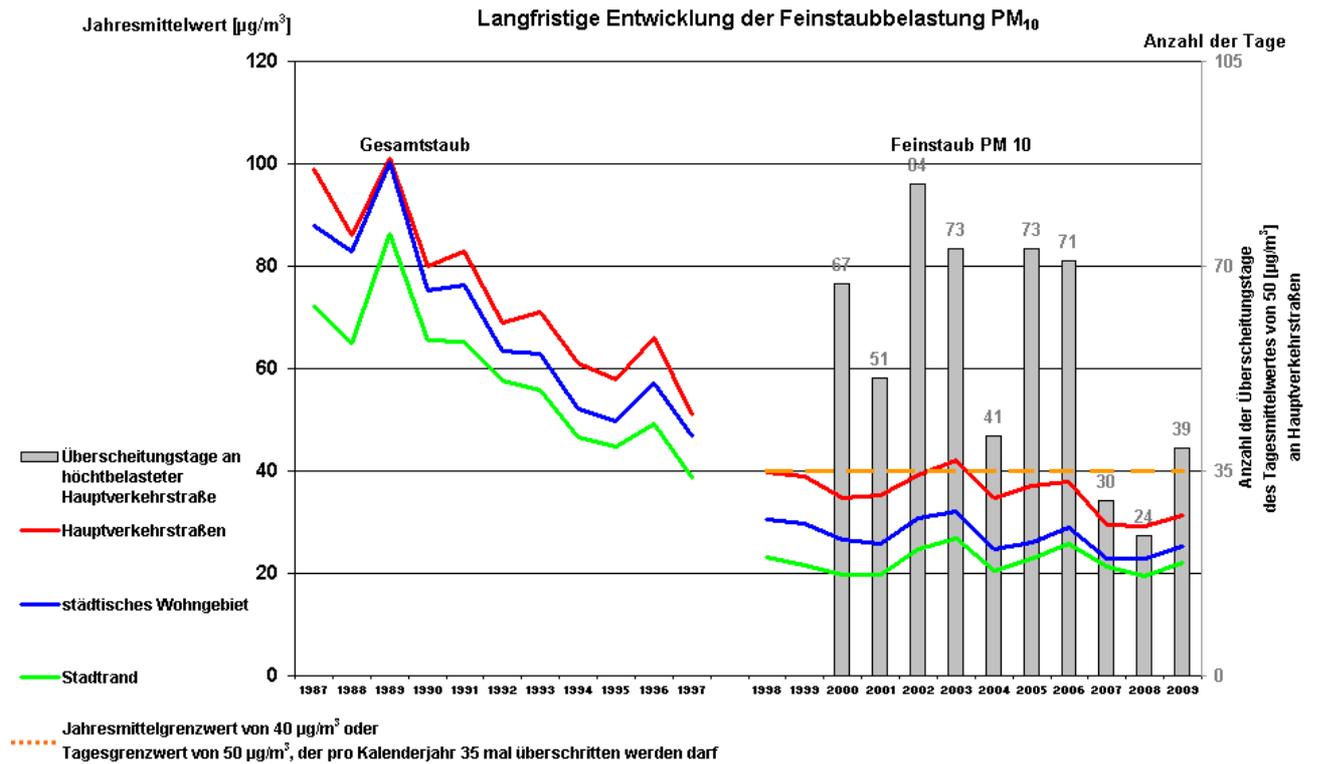
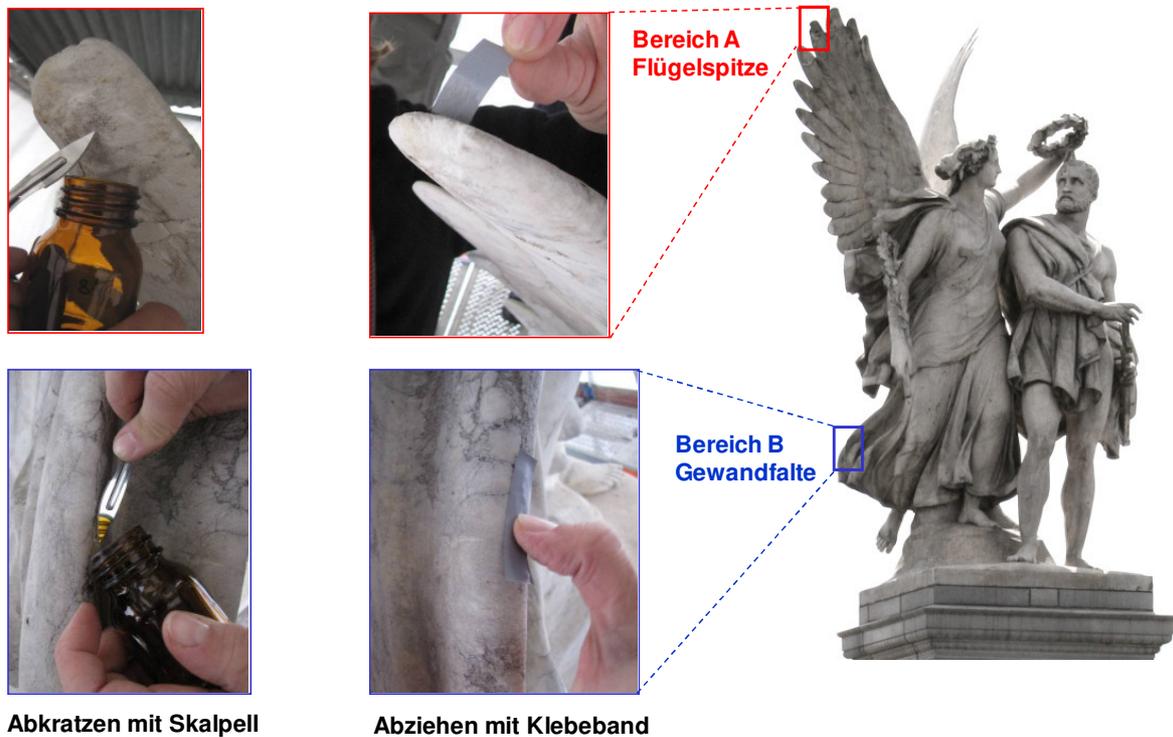


Abbildung 3: Langjährige Entwicklung der Stickstoffdioxidbelastung in Berlin [1]



**Abbildung 4:** Langjährige Entwicklung der Feinstaubbelastung in Berlin [1]

Die Belastung der Luft mit Staub ist, wie am Beispiel der Feinstaubkonzentration aus Abbildung 4 ersichtlich, in den letzten Jahren erkennbar gesunken. Allerdings ist die Staubbelastung noch so hoch, dass sich nach einer Reinigung schnell wieder ein Schmutzfilm auf den Skulpturen ablagert. Da der Staub viele organische Partikel enthält, wird die Besiedlung der Skulpturen mit Mikroorganismen gefördert.



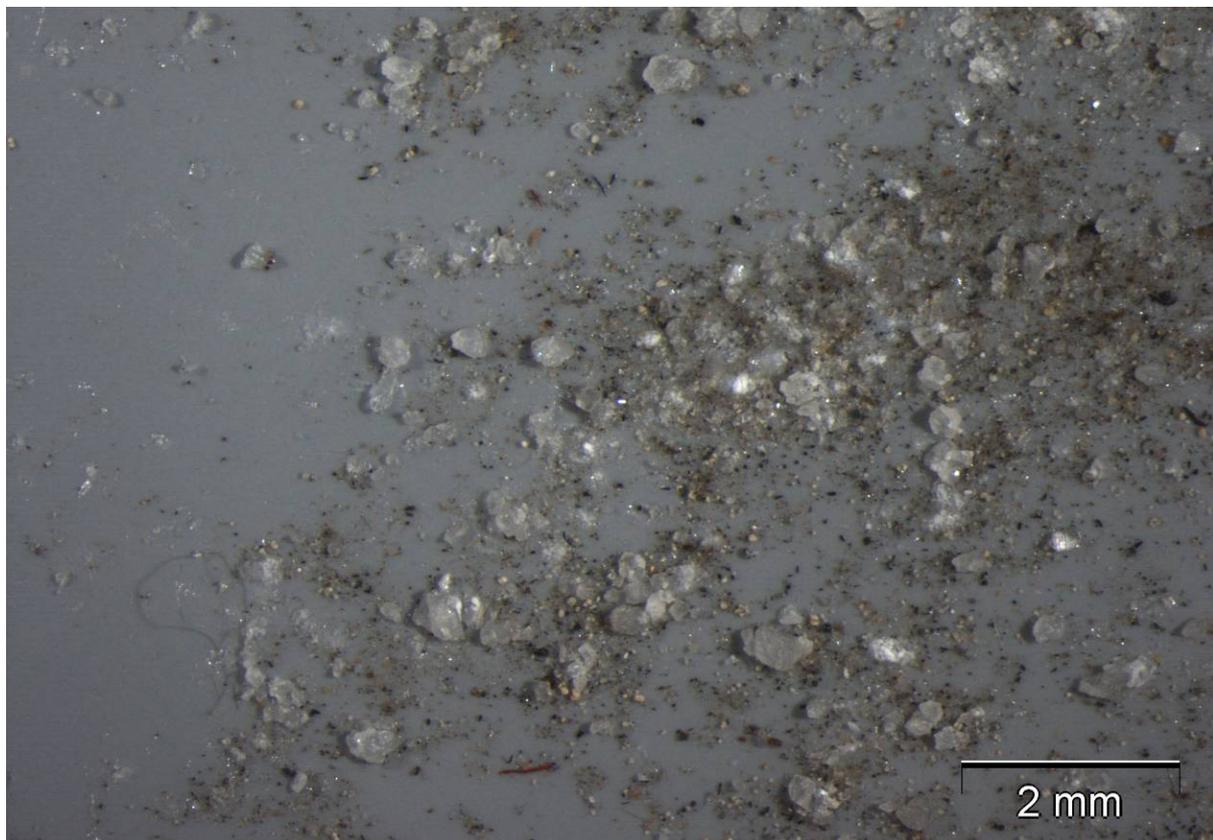
**Abbildung 5:** Entnahme von Proben zur Analyse des biologischen Bewuchses an der Skulptur 4

Zur Untersuchung dieser Ablagerungen wurden am 16. Oktober 2009 Proben an der Skulptur 4 genommen. Die Probennahme erfolgte, wie aus Abbildung 5 ersichtlich, einerseits durch ein vorsichtiges Abkratzen der Oberfläche mit einem Skalpell und andererseits durch ein Abziehen des Schmutzfilmes mit Klebeband. Die Untersuchung der Proben erfolgte in der Abteilung 4 „Material und Umwelt“ der BAM unter Leitung von Frau Prof. Dr. Gorbushina [2].

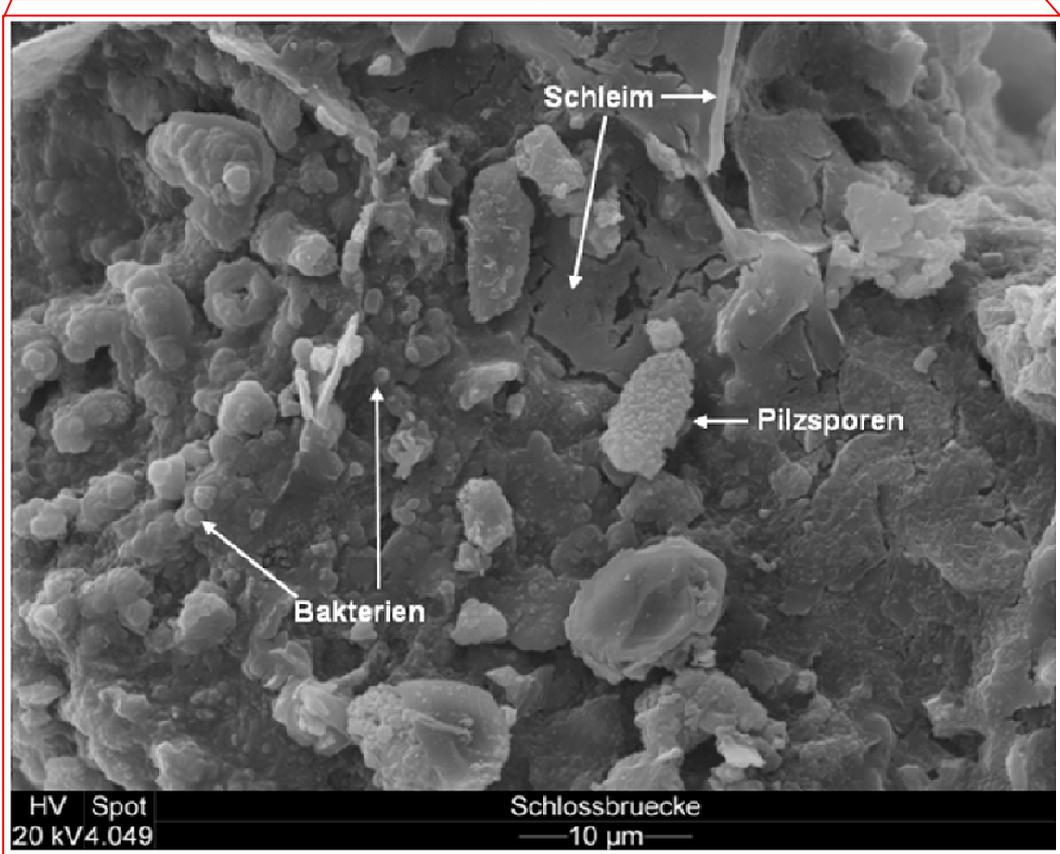
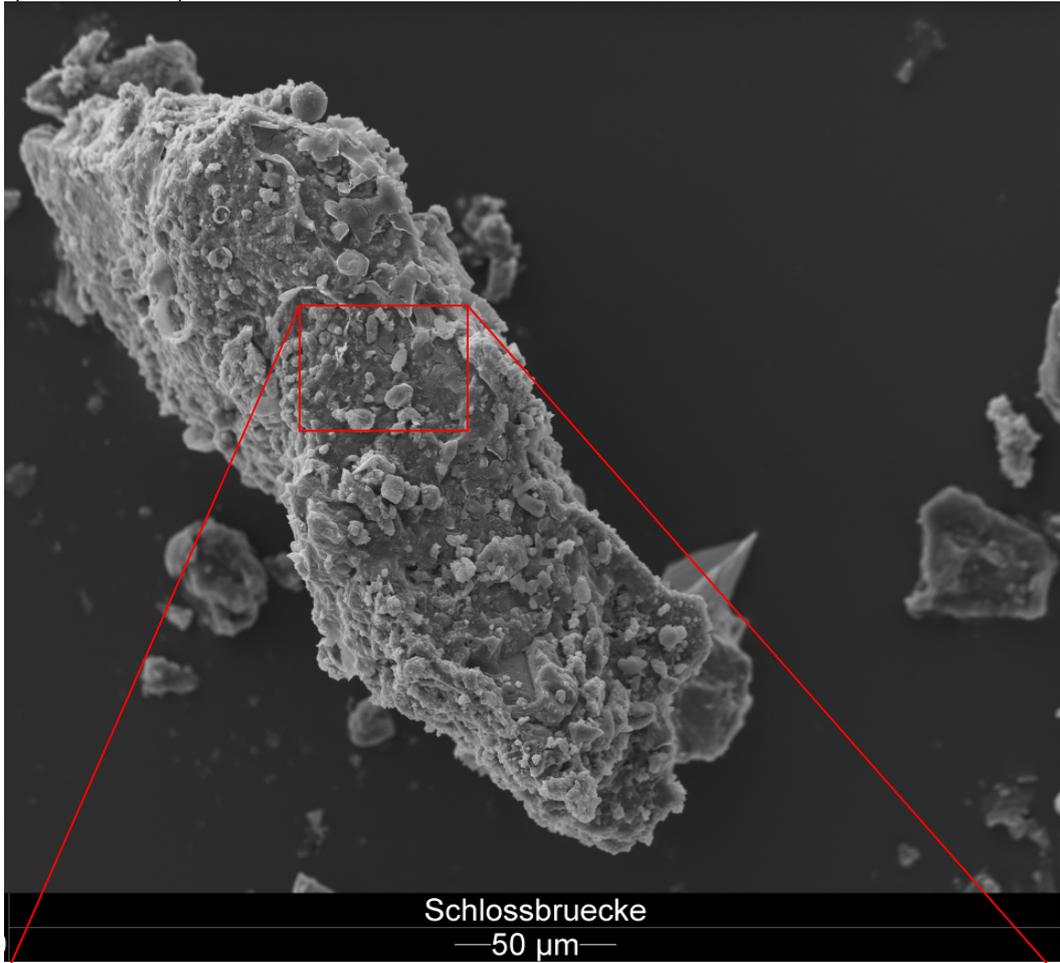
Der Mineralbestand in den Schichten unmittelbar unter der gereinigten Oberfläche lässt mehrere Interpretationen zu. Erkennbar ist die Neubildung von Gips durch Luftschwefel und mikrobielle Umwandlungen sowie die Neubildung von Oxalaten, welche oft durch Eisenspuren und pilzliches Melanin gelb bis braun verfärbt sind. Zudem sind Pyrit und Tonminerale als Beimengungen aus der Mergelkomponente von schlechteren Marmorvarietäten enthalten.

Die Rasterelektronenmikroskopischen (ESEM-) Aufnahmen zeigen, dass trotz der vorherigen Oberflächenreinigung zwischen den Korngrenzen ein reicher und teilweise biokorrosiver Bewuchs erkennbar ist. Dieser besteht überwiegend aus so genannten schwarzen Hefen, Cyanobakterien, kleinen kokkoiden Bakterien und Hefen, sowie Ansätzen zur Flechtenbildung. Beigemengt sind Insektenreste, Kotbällchen von Steinläusen und anderen Arthropoden, Schmetterlingsschuppen und Spinnenreste. Der Bewuchs zeigt nicht die im Mittelmeergebiet oft charakteristischen Ätzstrukturen durch Pilze und Cyanobakterien. Der Biofilm ist eher schleimig und weniger unmittelbar korrosiv. Dennoch ist der Bewuchs massiv genug, um Verfärbungen und weitere Zerstörungen vermuten zu lassen. Die Abbildungen 6 bis 10 zeigen lichtmikroskopische und ESEM-Aufnahmen der an der Skulptur 4 entnommenen Proben.

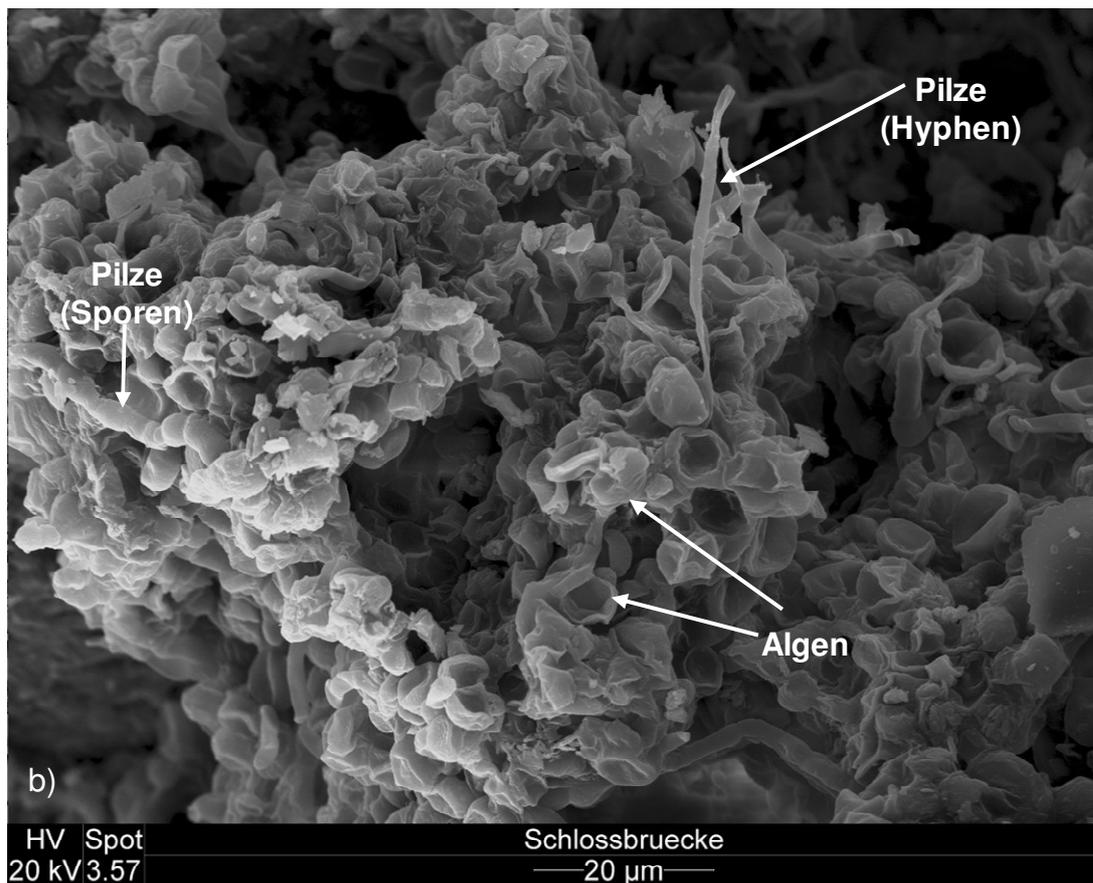
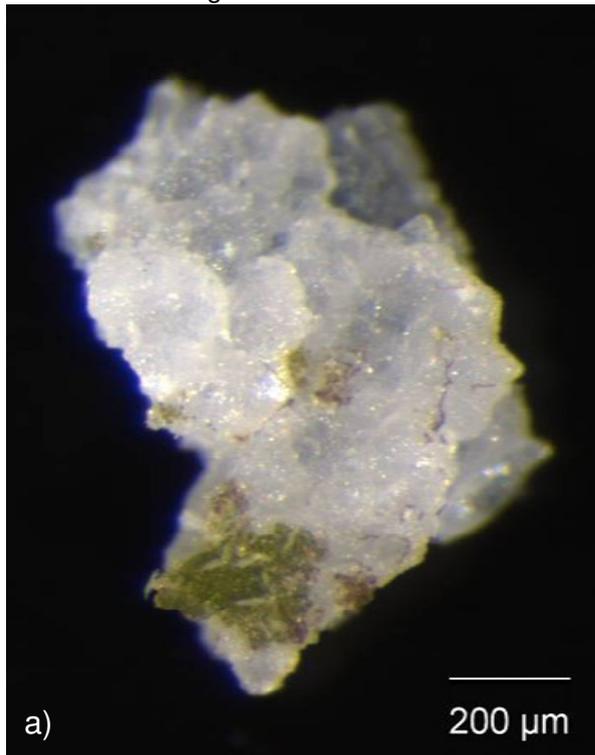
Eine erneute Reinigung dürfte hinsichtlich des Biofilms wenig bewirken. Wie schon während der Begehung und Probennahme vorgeschlagen, kann man eine Peroxidbehandlung zum Bleichen und Abtöten des Biofilms einsetzen. Möglicherweise hilft eine sehr aufwendige Biozidbehandlung, die jedoch mitunter mittels Injektionsspritzen durchgeführt werden müsste. Dieses Verfahren wurde an der Akropolis Athen auf Anraten von Prof. Dr. W. E. Krumbein eingesetzt, erfordert aber viele Stunden Arbeit von geübten Restauratoren.



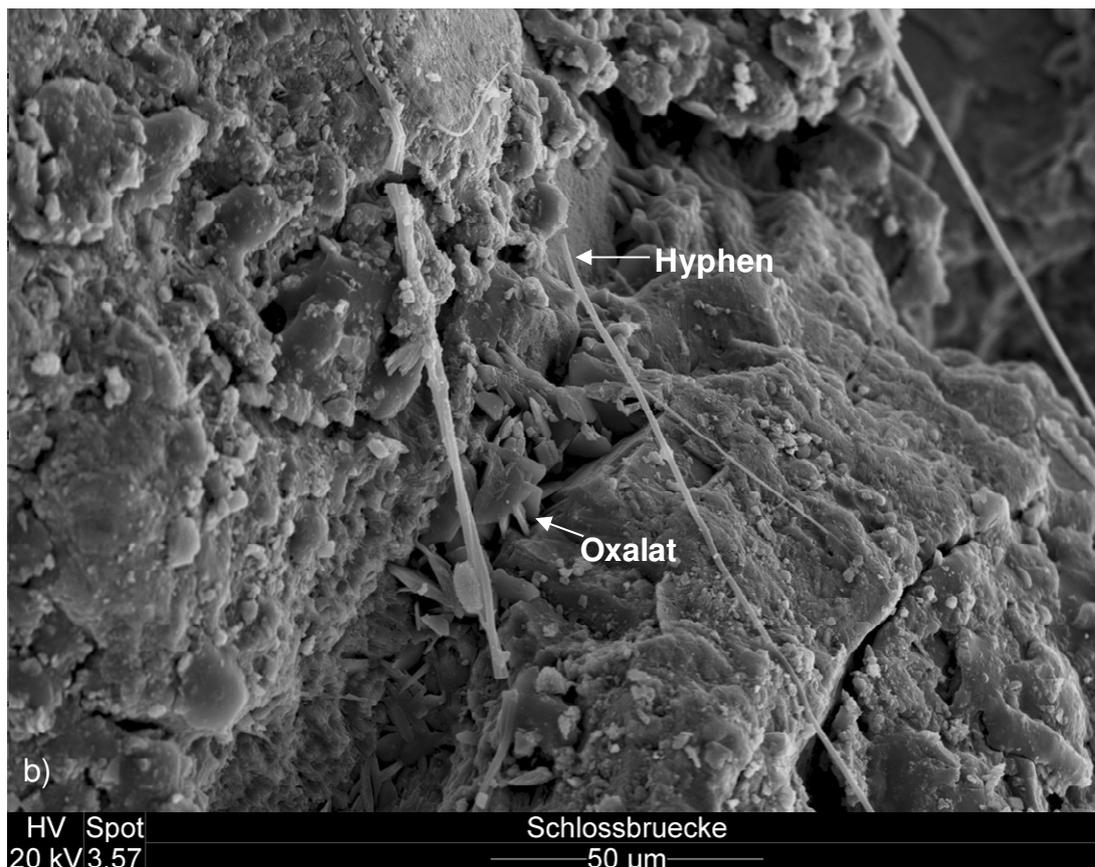
**Abbildung 6:** Lichtmikroskopische Aufnahme der mit Klebeband abgezogenen Probe von der Flügel-  
spitze der Skulptur 4



**Abbildung 7:** ESEM-Aufnahme eines Marmorpartikels von der Flügelspitze der Skulptur 4 mit starkem biologischen Bewuchs



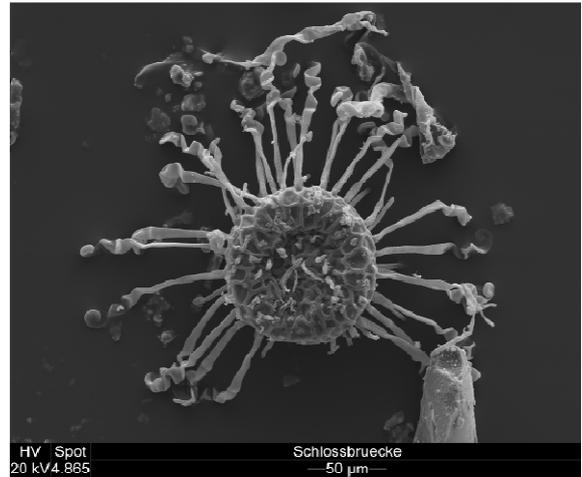
**Abbildung 8:** a) Lichtmikroskopische Aufnahme und  
b) ESEM-Aufnahme eines Marmorpartikels der Kratzprobe von der Flügelspitze der Skulptur 4



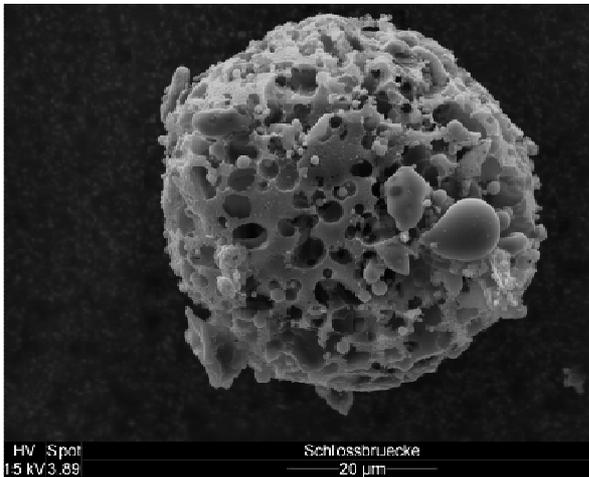
**Abbildung 9:** a) Lichtmikroskopische Aufnahme und  
b) ESEM-Aufnahme eines Marmorpartikels der Kratzprobe von der  
Flügelspitze der Skulptur 4



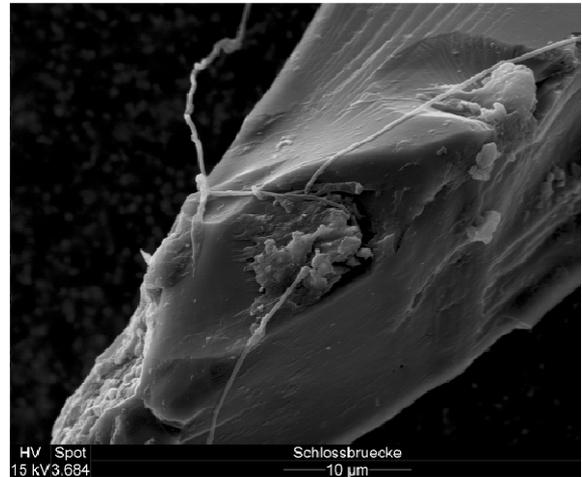
Moos



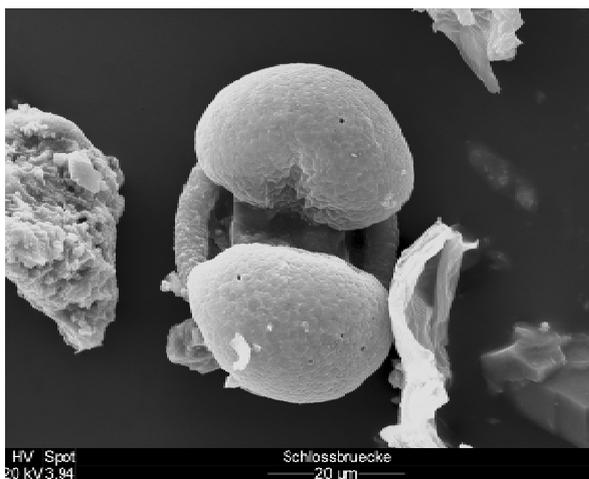
Mehltau



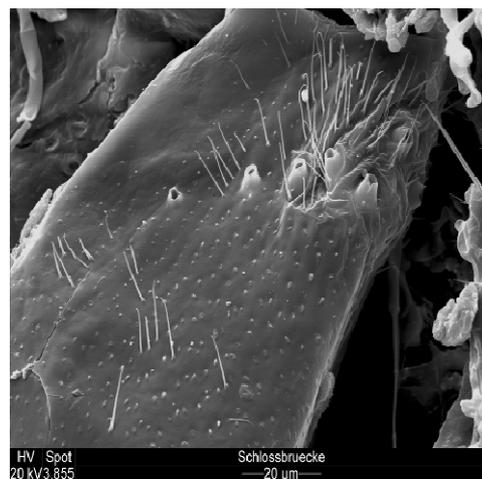
Flugasche



Glaspartikel



Kiefernpollen



Insektenreste

**Abbildung 10:** ESEM-Aufnahmen einzelner Staubbestandteile der Proben von der Skulptur 4

## Zustandserfassung und Materialcharakterisierung an den Referenzproben

Für die Bewertung der schützenden Wirkung der verschiedenen Einhausungskonstruktionen ist es notwendig, die sich in Abhängigkeit von den äußeren Klimabedingungen in den Skulpturen einstellenden Temperatur- und Feuchteprofile zu messen. Insbesondere die Erfassung der Temperaturprofile ist aber nicht ohne zerstörenden Eingriff in die Skulpturen möglich. Deshalb wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Referenzproben konzipiert und hergestellt, mit denen der eindimensionale Wärme- und Feuchtetransport, wie er in massiven Skulpturenteilen zu erwarten ist, nachgestellt wird. Erreicht wird dies durch eine Wärmedämmung und Feuchtesperrung. In diese Proben wurden die erforderlichen Temperatursensoren eingesetzt.

Neben der Möglichkeit, Temperaturprofile ohne einen schädigenden Eingriff an den Skulpturen aufzeichnen zu können, bieten die Referenzproben weitere Vorteile. So sind zum Beispiel die Materialeigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Permeabilität durch Untersuchungen des Projektpartners TU Dresden an diesem Probenmaterial bekannt. Des Weiteren sind die Randbedingungen, wie die Exposition und Ausrichtung der Bewitterungsflächen, genau definiert. Außerdem kann die Gesamtwasseraufnahme der Auslagerungsproben gravimetrisch bestimmt werden.

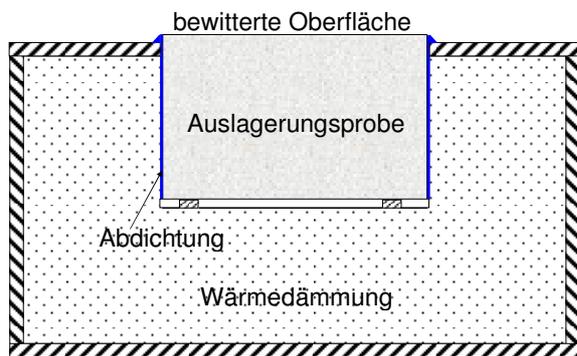
Die Proben wurden vom Projektpartner GZG auf die Maße 20 x 20 x 12 cm<sup>3</sup> zugeschnitten. Um den Materialzustand der Skulpturen nachzubilden, wurden 3 Referenzproben hygrometrisch auf eine Schallgeschwindigkeit von 4700 m/s und drei weitere auf eine Schallgeschwindigkeit von 3200 m/s alteriert.

**Tabelle 1:** Zusammenstellung der Referenzproben

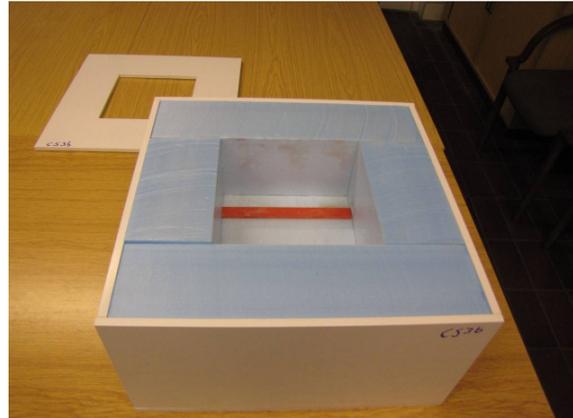
Probe	Materialzustand	Ausrichtung der Bewitterungsfläche	Anzahl der Temperatursensoren	Umgebungsbedingungen
CS 5b	stark alteriert	senkrecht / Südwest	0	durch Einhausung geschützt
CS 8b	schwach alteriert	senkrecht / Südwest	4	durch Einhausung geschützt
CS 2a	stark alteriert	senkrecht / Südwest	0	frei bewittert
CS 3b	schwach alteriert	senkrecht / Südwest	4	frei bewittert
CS 2b	stark alteriert	waagrecht	0	frei bewittert
CS 7a	schwach alteriert	waagrecht	4	frei bewittert

Das Einsetzen der Temperatursensoren, die Feuchteisolierung sowie der Bau der Gehäuse zur Wärmedämmung der Proben erfolgten in der BAM. Die Seitenflächen der Proben wurden mit einem Epoxydharz isoliert um einen Feuchtetransport durch diese Flächen zu verhindern. Dagegen blieben die Bewitterungsflächen und die Rückseiten unbehandelt. Die Abbildungen 11 a) bis c) zeigen einen Querschnitt durch eine Probe im Gehäuse, ein Foto eines Gehäuses mit Wärmedämmung sowie die Auslagerung der Proben an der Skulptur 1. Aus Abbildung 12 ist die Anordnung der Temperatursensoren ersichtlich. Die Auslagerung der Proben erfolgte am 17. Dezember 2008 auf dem Gerüst an der Skulptur 1 (Abbildung 11 c)). Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die ausgelagerten Proben.

Im Februar 2009 wurde eine Testeinhausung mit einer PVC-Membran zum Schutz der Skulptur 1 aufgebaut. Die Referenzproben CS 5b und CS 8b befanden sich ab diesem Zeitpunkt bis zum Projektende unter dem Schutz dieser Einhausung (Abbildung 11 d)). Alle anderen Proben wurden weiterhin frei bewittert. Am 19. Oktober 2010 wurde die Auslagerung der Proben nach insgesamt 22 Monaten beendet.



a) mastabliche Skizze der Probe mit Gehäuse



b) Gehäuse mit Wärmedämmung

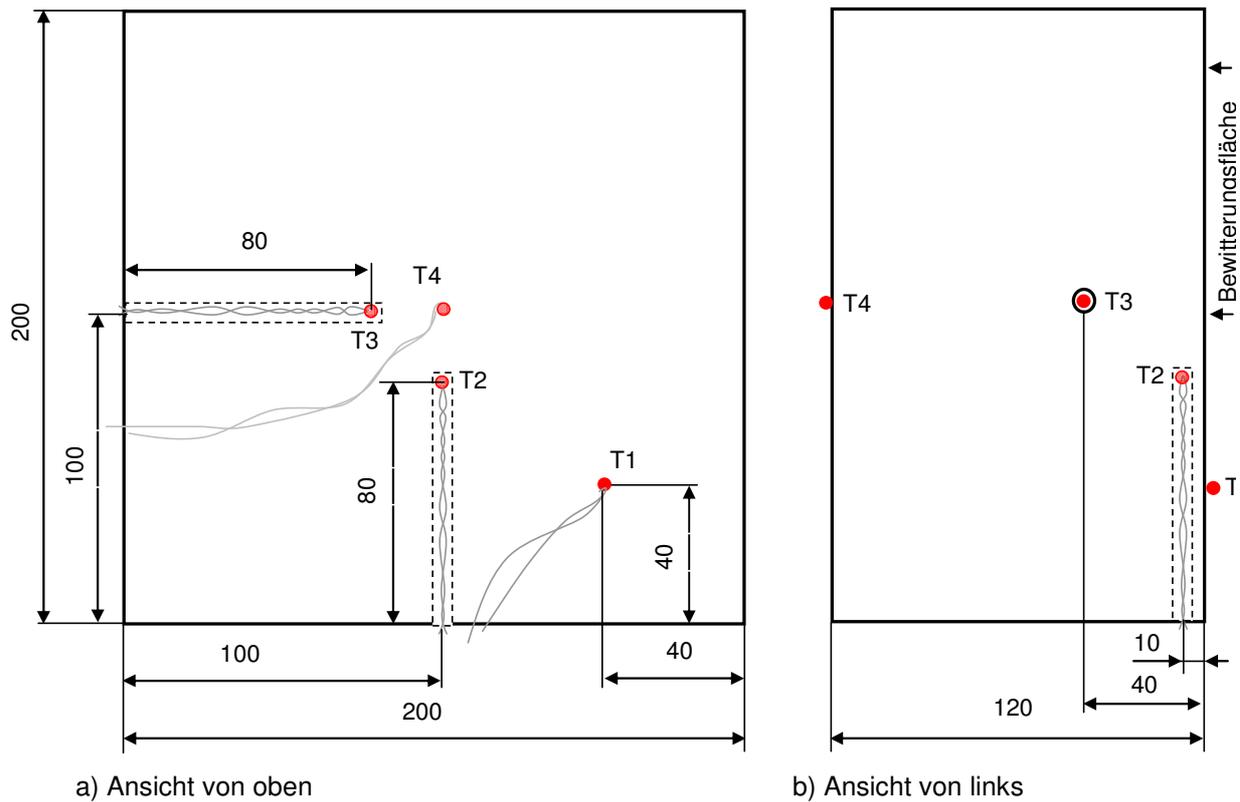


c) Referenzproben an Skulptur 1



d) Referenzproben an Skulptur 1 innerhalb der Membraneinhausung

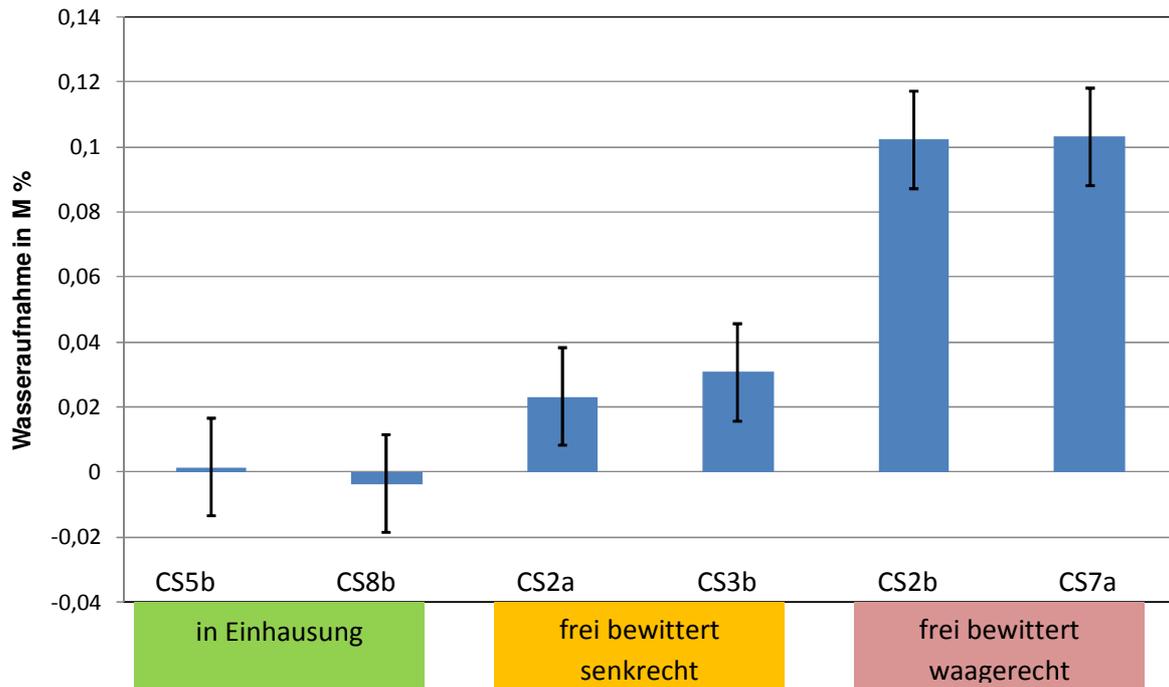
**Abbildung 11:** Vorbereitung und Auslagerung der Referenzproben



**Abbildung 12:** Anordnung der Temperatursensoren an bzw. in den Referenzproben

Nach der Auslagerung wurden die Referenzproben zunächst aus den Gehäusen entfernt und gewogen. Die so gravimetrisch bestimmte Gesamtwasseraufnahme der Proben spiegelt nur den Feuchtegehalt in den letzten Tagen der Auslagerung wieder. Am Tag der Beendigung der Auslagerung gab es leichten Niederschlag, so dass die Oberflächen der nicht durch die Einhausung geschützten Proben feucht waren. Der Fehler der Massenbestimmung der Proben wird auf  $\pm 2$  g geschätzt, da durch das Herausnehmen der Proben aus den Gehäusen leichte Beschädigungen an der Beschichtung und an den Proben installierten Temperatursensoren nicht auszuschließen waren. Für die Berechnung der Wasseraufnahme ergibt sich damit ein absoluter Fehler von  $\pm 0,015$  M%.

Anschließend wurden die Proben zur Vorbereitung der Ultraschallmessungen bei einer Temperatur von  $20^\circ\text{C}$  und 50% Luftfeuchte gelagert, bis keine Masseänderung mehr feststellbar war.



**Abbildung 13:** Massenänderung der Proben nach der Auslagerung

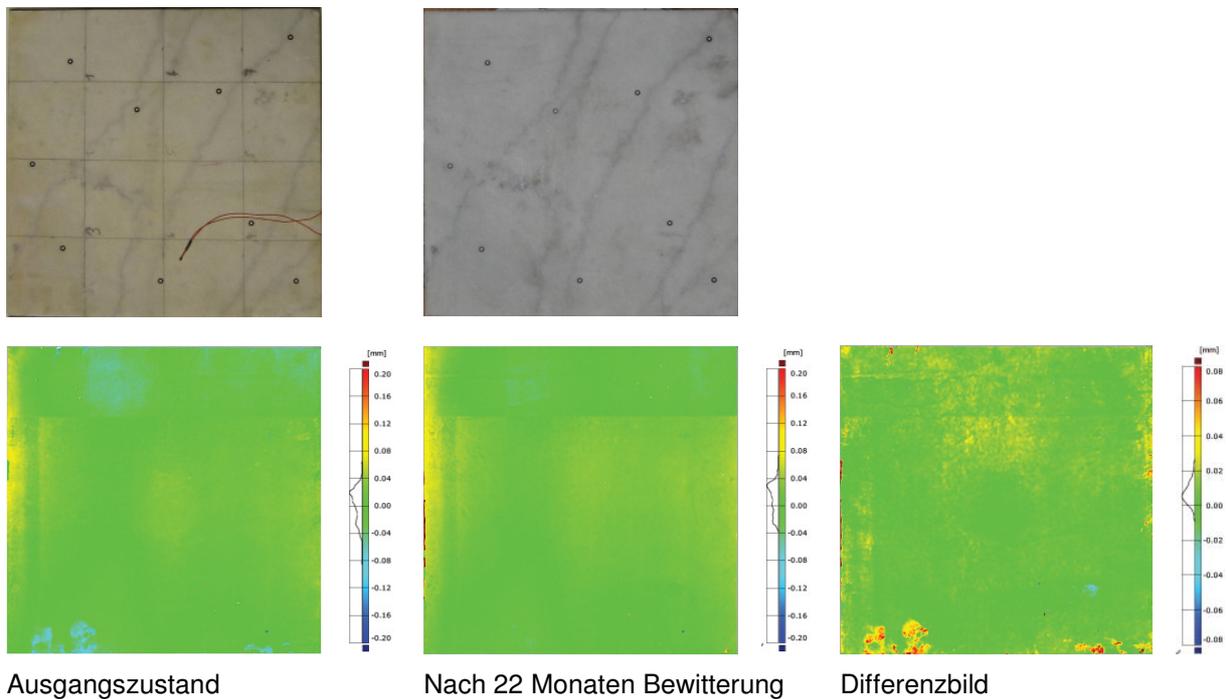
Wie im Diagramm in Abbildung 13 erkennbar, gibt es einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Exposition der Proben und der damit verbundenen Wasseraufnahme. Während die durch die Testeinhausung geschützten Proben kein Wasser aufgenommen haben, ist die Wasseraufnahme der frei bewitterten und waagrecht gelagerten Proben am höchsten. Von den frei bewitterten und senkrecht nach Südwesten ausgerichteten Probenoberflächen kann das Wasser schnell abfließen. Sie nehmen offensichtlich weniger Wasser auf als die waagrecht liegenden Probenflächen, auf denen das Wasser längere Zeit stehen bleibt. Übertragen auf die Skulpturen bedeutet dies, dass die Feuchtebelastung durch Niederschläge und Taubildung bei waagrecht orientierte Flächen besonders hoch ist.

#### Erfassung der äußeren Gefügeveränderungen

Die äußeren Gefügeveränderungen der Referenzproben infolge der Bewitterung wurden mit Hilfe der Fotogrammetrie dokumentiert. Mit der Fotogrammetrie ist es möglich, Oberflächen dreidimensional zu vermessen und den die Topographie beschreibenden Datensatz digital zu speichern und weiter zu verarbeiten. Zur Vermessung der Referenzproben kam das System ATOS III - 400 mit einem Messfeld von 15 cm x 15 cm der Firma GOM zum Einsatz. Der Abstand der Messpunkte in der Ebene beträgt damit 0,07 mm. Senkrecht zur Messebene wird eine Auflösung von 0,01 mm erreicht.

Zur Ermittlung von Materialverlusten an der Oberfläche der Proben durch die Bewitterung wurden die Proben zunächst vor der Auslagerung vermessen. Zu den vermessenen Oberflächen wurden dann jeweils Referenzebenen definiert. Der Abstand aller Oberflächenpunkte zu diesen Referenzebenen kann farbcodiert dargestellt werden. So wird das für jede Probe typische Oberflächenprofil, wie in Abbildung 14 dargestellt, erkennbar. Nach der Auslagerung wurden die Proben vorsichtig gereinigt und erneut vermessen. Die vor der Auslagerung definierten Referenzebenen bilden auch die Referenz für die nach der Auslagerung vermessenen Oberflächen. Somit ist ein direkter Vergleich dieser Flächen möglich. Zur Bewertung der Veränderung der Oberflächen im Verlaufe der Auslagerung wurden die Differenzen der vor und nach der Auslagerung gemessenen Oberflächenprofile berechnet. Da die maximalen und minimalen Flächenabweichungen im Differenzbild wesentlich kleiner sind, kann die Skalierung der Flächenabweichung hier deutlich feiner gewählt werden. Negative Abweichungen von der Nullebene stehen hier für einen Materialverlust, während positive Abweichungen eine Erhöhung der ursprünglichen Oberfläche zeigen. Die Diagramme direkt an den

Farbskalen geben die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Flächenabweichungen wieder. Ein Beispiel für eine solche Messung, vergleichend mit Fotos der Oberfläche, zeigt die Abbildung 14 anhand der Referenzprobe CS3b.



**Abbildung 14:** Fotografische Dokumentation der Oberfläche der Probe CS3b und Darstellung der Höhenprofile vor und nach der Auslagerung

Die Ergebnisse der Messungen zeigen keine signifikanten Materialverluste an den Probenoberflächen. Somit sind auch keine Einflüsse des Erhaltungszustandes oder der Exposition der Referenzproben während der vergleichsweise kurzen Auslagerungszeit erkennbar. Auffallend ist allerdings, dass kleine Vertiefungen, wie sie vor allem in den Randbereichen der Proben auftreten, nach der Auslagerung flacher erscheinen. Ursache hierfür sind möglicherweise Schmutzablagerungen, die durch die vorsichtige Reinigung der Proben nicht entfernt wurden.

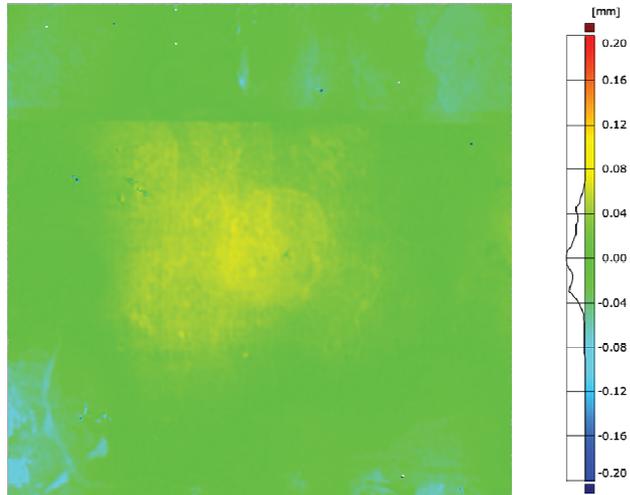
Die Ergebnisse der fotogrammetrischen Messungen sind in den Tabellen 2 bis 7 zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle 2:** Ergebnis der Fotogrammetrie der Referenzprobe CS5b

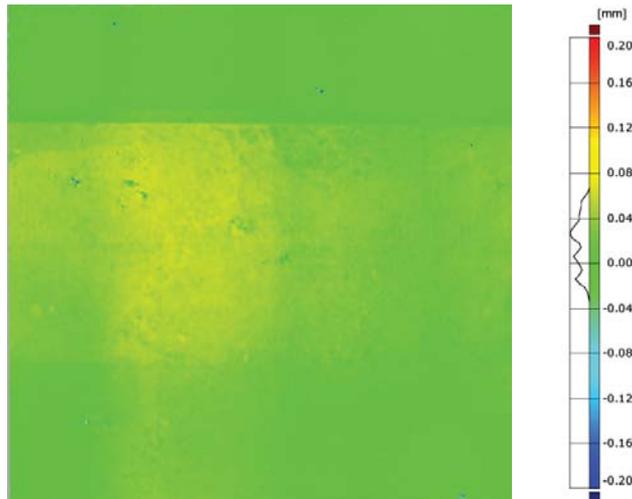
Probe: CS5b – stark alteriert  
Exposition der Bewitterungsfläche: Senkrecht – südwest  
durch Einhausung geschützt

---

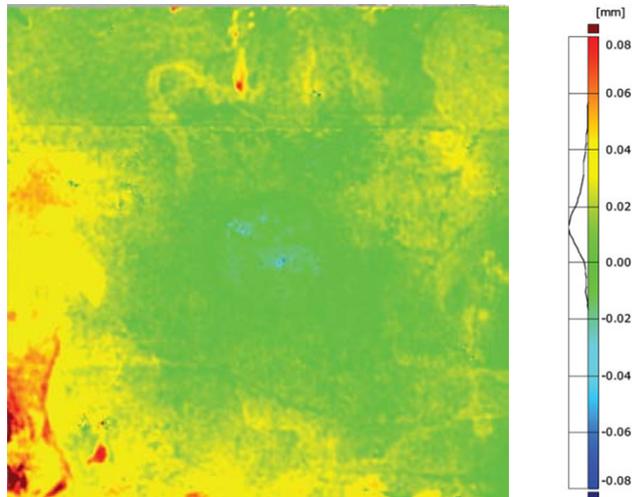
Ausgangszustand



Nach Auslagerung



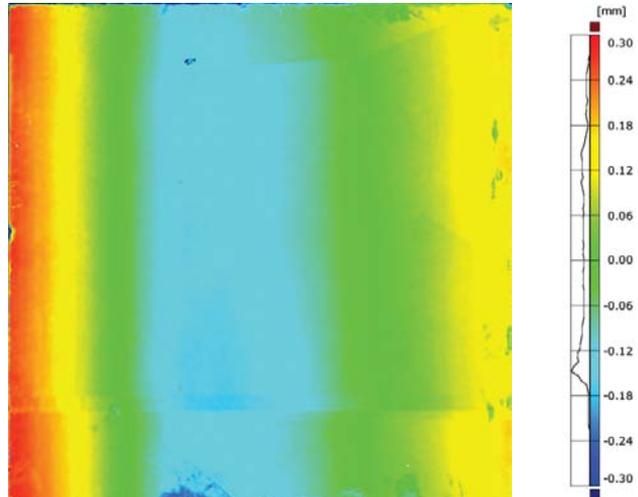
Differenzbild



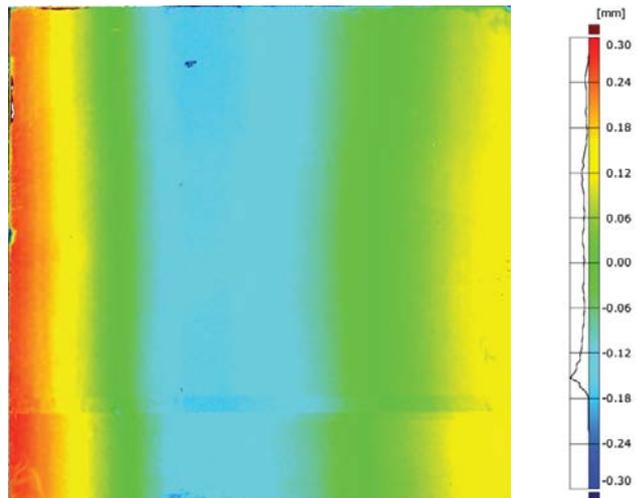
**Tabelle 3:** Ergebnis der Fotogrammetrie der Referenzprobe CS8b

Probe: CS8b – schwach alteriert  
Exposition der Bewitterungsfläche: senkrecht – südwest  
durch Einhausung geschützt

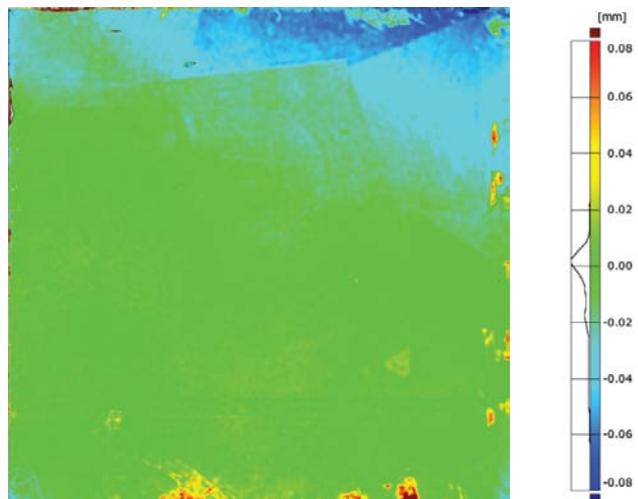
Ausgangszustand



Nach Auslagerung



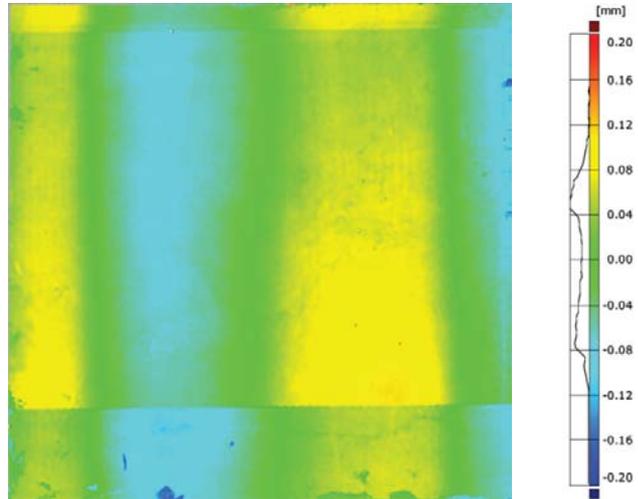
Differenzbild



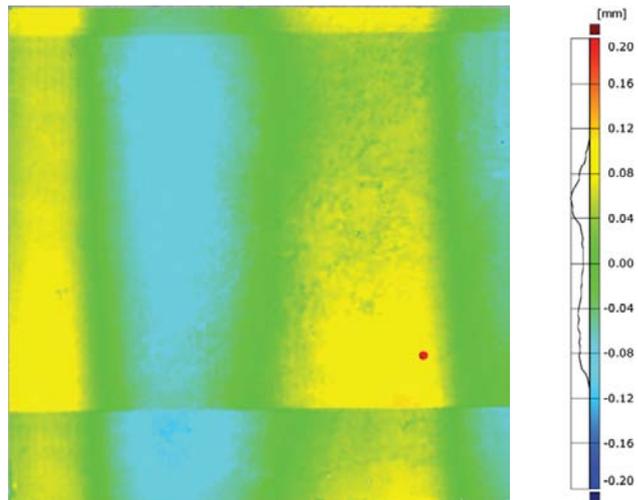
**Tabelle 4:** Ergebnis der Fotogrammetrie der Referenzprobe CS2a

Probe: CS2a – stark alteriert  
Exposition der Bewitterungsfläche: senkrecht – südwest  
frei bewittert

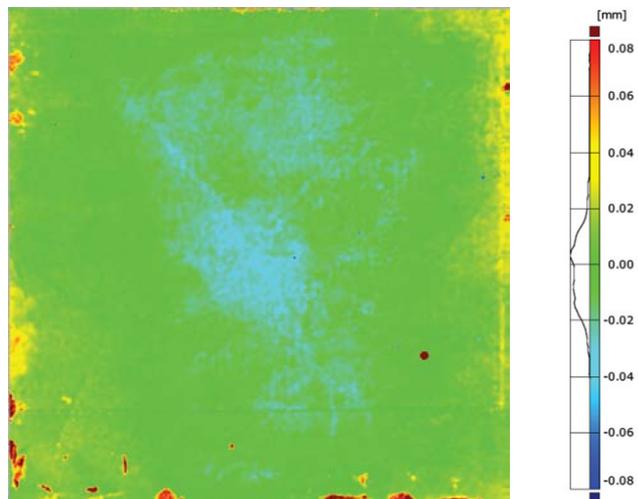
Ausgangszustand



Nach Auslagerung



Differenzbild



**Tabelle 5:** Ergebnis der Fotogrammetrie der Referenzprobe CS3b

Probe: CS3b – schwach alteriert  
Exposition der Bewitterungsfläche: senkrecht – südwest  
frei bewittert

---

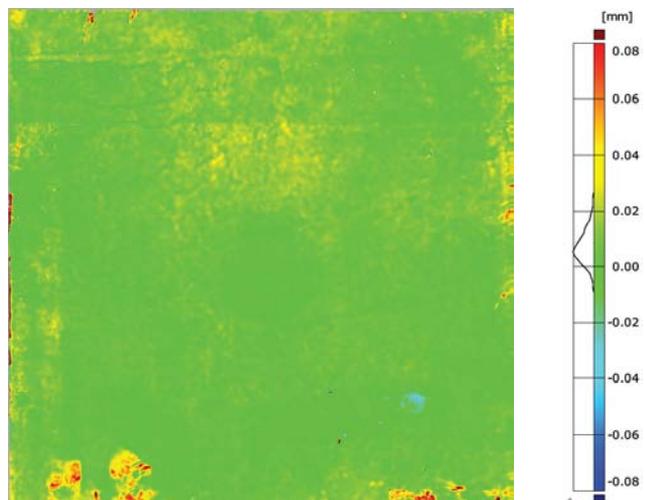
Ausgangszustand



Nach Auslagerung



Differenzbild

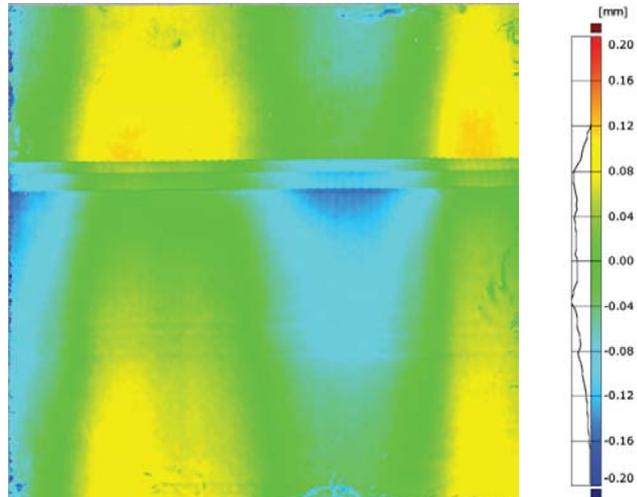


**Tabelle 6:** Ergebnis der Fotogrammetrie der Referenzprobe CS2b

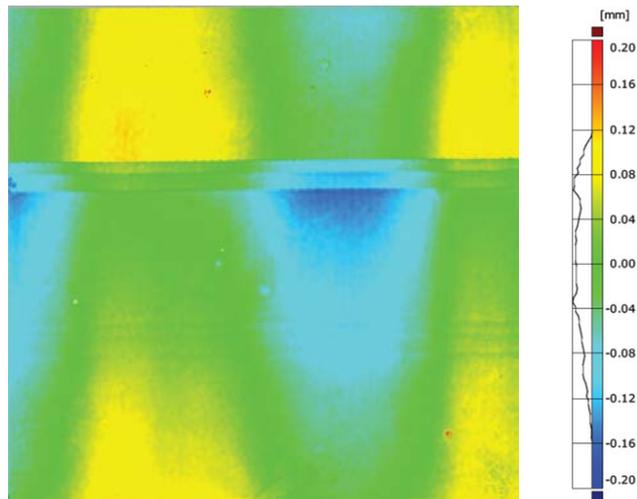
Probe: CS2b – stark alteriert  
Exposition der Bewitterungsfläche: waagrecht  
frei bewittert

---

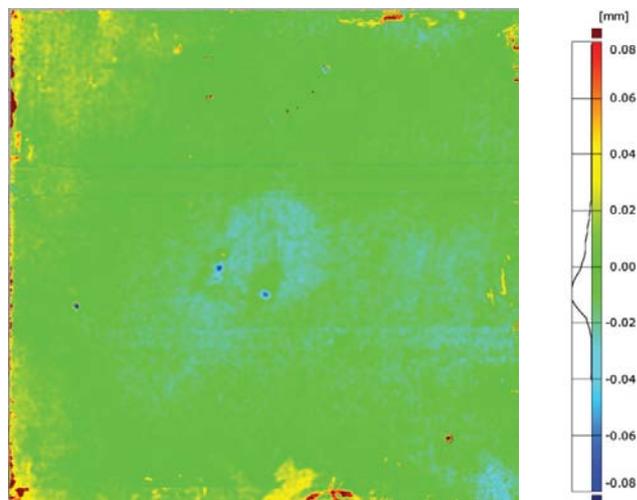
Ausgangszustand



Nach Auslagerung



Differenzbild

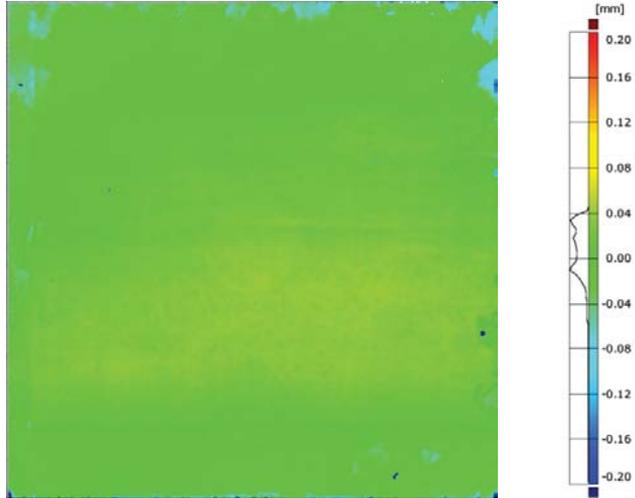


**Tabelle 7:** Ergebnis der Fotogrammetrie der Referenzprobe CS7a

Probe: CS7a – schwach alteriert  
Exposition der Bewitterungsfläche: waagrecht  
frei bewittert

---

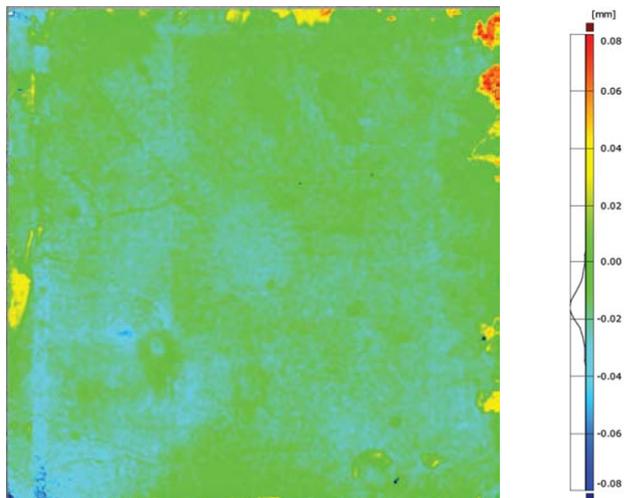
Ausgangszustand



Nach Auslagerung

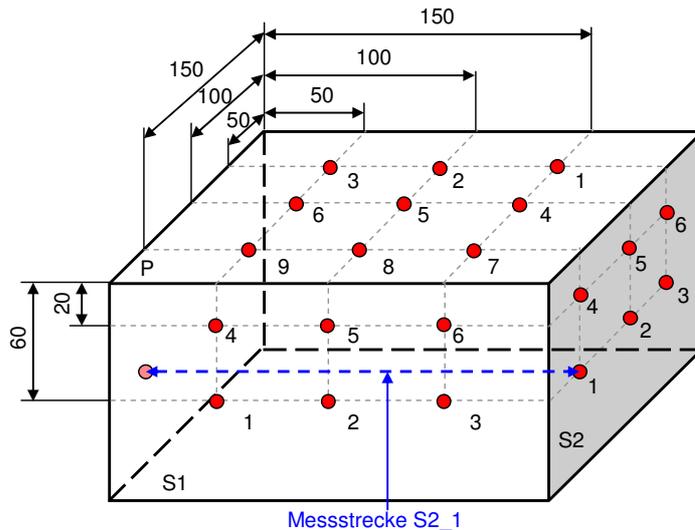


Differenzbild

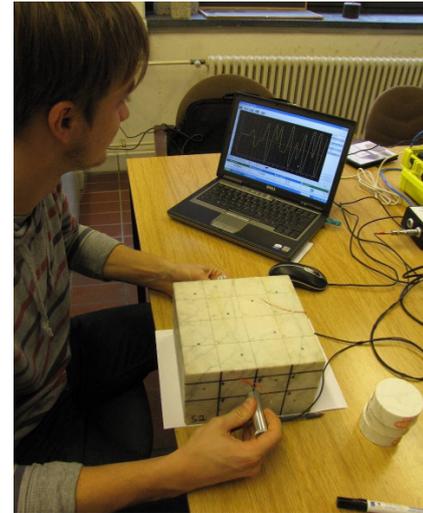


## Erfassung der inneren Gefügeveränderungen

Der Erhaltungszustand von Marmor kann anhand der Ultraschallgeschwindigkeit klassifiziert werden [3]. Um die Änderungen des inneren Gefügestandes der Referenzproben während der Auslagerung verfolgen zu können, wurden deshalb Ultraschallmessungen durchgeführt (Abbildung 16). Gemessen wurde mit dem Ultraschallmesssystem UKS-D der Firma Geotron-Elektronik mit Punktkontaktprüfköpfen L1803 der Firma ACSYS. Die Prüfköpfe wurden mit einer Frequenz von 60 kHz und einer Spannung von 250 V angeregt. Die Messungen erfolgten dabei senkrecht sowie in zwei Ebenen parallel zur Bewitterungsfläche. Die Anordnung der Messstrecken sind der Abbildung 15 zu entnehmen.

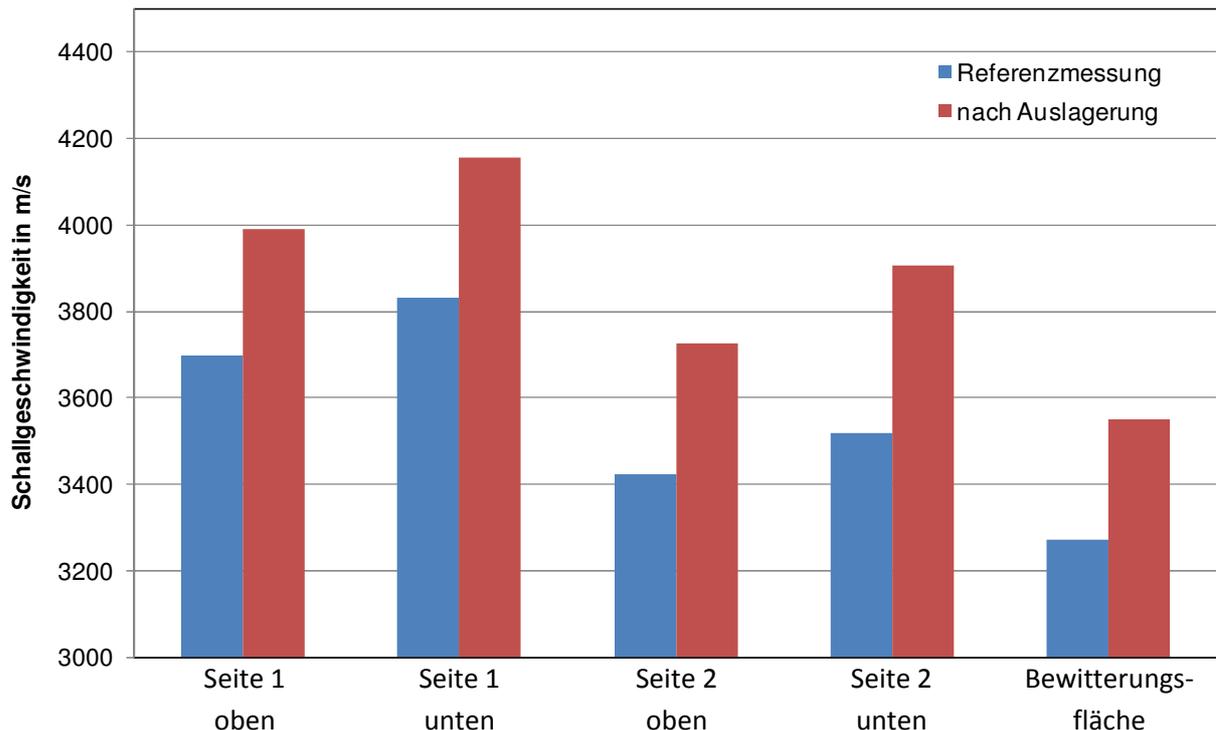


**Abbildung 15:** Anordnung der Messstrecken mit Beispiel für die Messstreckenbezeichnungen



**Abbildung 16:** Messung der Ultraschallgeschwindigkeiten an einer Auslagerungsprobe

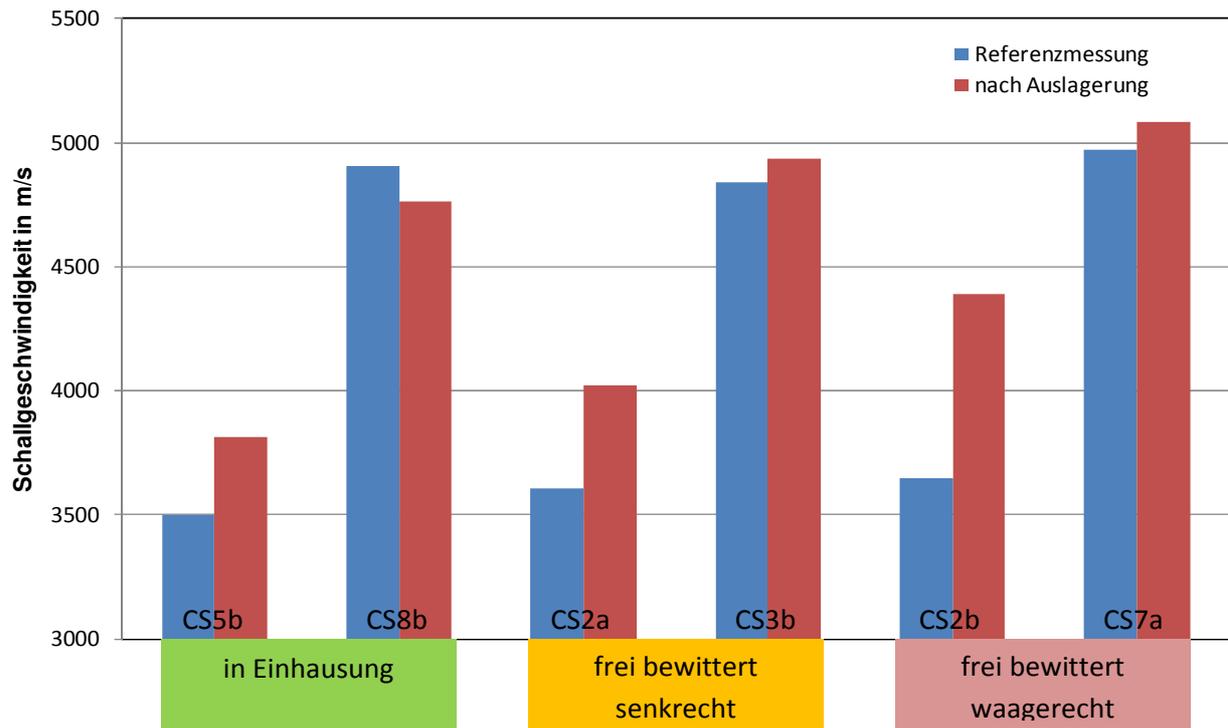
Das Diagramm in Abbildung 17 zeigt die an der Probe CS5b in den einzelnen Ebenen gemessenen mittleren Ultraschallgeschwindigkeiten. Deutlich ist die für Marmor typische Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit erkennbar. Der Vergleich der Schallgeschwindigkeiten der oberen und unteren Messebenen zeigt eine geringere Schallgeschwindigkeit in den oberen Ebenen. Zurückzuführen ist dies auf die künstliche Alterierung der Proben, die das Gefüge in diesen massiven Proben oberflächennah stärker auflockert als im Kernbereich.



**Abbildung 17:** An der Probe CS5b vor und nach der Auslagerung gemessene Schallgeschwindigkeiten, Exposition der Bewitterungsfläche: senkrecht – Südwest, in Einhausung

Überraschend fällt der Vergleich der Schallgeschwindigkeiten vor und nach der Auslagerung aus. Erwartet wurde, dass sich die Schallgeschwindigkeiten innerhalb der kurzen Auslagerungszeit nicht ändern oder durch eine weitere Gefügauflockerung leicht verringern. Für die Probe CS5b zeigt das Diagramm in Abbildung 17 aber eine Erhöhung der Schallgeschwindigkeiten in allen Messebenen und somit eine Erholung des Gefüges. Dies ist, wie Abbildung 18 anhand der mittleren Schallgeschwindigkeiten zeigt, mit Ausnahme der Probe CS8b, bei allen Proben der Fall. Die Erholung des Gefüges ist bei den stark alterierten Proben, im Diagramm an den niedrigeren Ultraschallgeschwindigkeiten erkennbar, deutlich ausgeprägter als bei den schwach alterierten Proben. Bei den stark alterierten Proben ist auch ein Trend der Abhängigkeit der Gefügerholung von der Exposition der Proben erkennbar. Je stärker die Proben der Witterung ausgesetzt sind, von der durch die Einhausung geschützten Probe über die frei bewitterte senkrecht stehende bis zur waagrecht liegenden Probe, desto mehr erholt sich das Gefüge. Bei den schwach alterierten Proben ist ein solcher Trend nicht erkennbar. Allerdings ist hier das Potential für eine erneute Verdichtung des Gefüges geringer als bei den stark alterierten Proben.

Dass die Gefügauflockerungen von künstlich alteriertem Marmor durch Erschütterungen teilweise rückgängig gemacht werden können, ist bekannt. Möglicherweise ist nicht die Bewitterung, sondern sind Erschütterungen, die während des Transports zur Schlossbrücke und während der Aufstellung der Proben an den Skulpturen aufgetreten sind, die Ursache für den gemessenen Anstieg der Schallgeschwindigkeiten. Dagegen spricht allerdings, dass die in Göttingen alterierten Proben schon während des Transports nach Berlin und der Vorbereitung zur Auslagerung einigen Erschütterungen ausgesetzt waren. Anhand der wenigen innerhalb des Projektes ausgelagerten Proben kann diese Frage nicht geklärt werden. Hierfür wären weitere umfangreiche Versuchsreihen erforderlich.



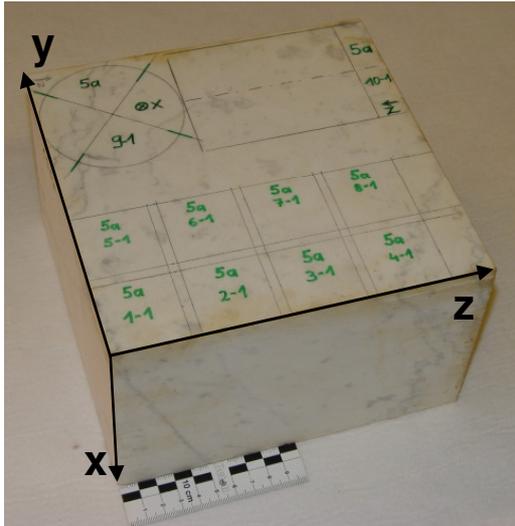
**Abbildung 18:** Vergleich der mittleren Schallgeschwindigkeiten der Referenzproben vor und nach der Auslagerung

## Zuschnitt der Proben für die Bestimmung der physikalischen Kennwerte

Die Bestimmung der physikalischen Kennwerte von Marmor als Grundlage für die numerische Modellierung des Wärme- und Feuchtetransports erfolgte an der TUD. Die Probekörper hierfür wurden vom Projektpartner GZG zur Verfügung gestellt, künstlich alteriert und dann in der BAM zugeschnitten. Um den Gefügestand des Materials zu charakterisieren, wurden die Schallgeschwindigkeiten der Bohrkerns und Prismen bestimmt, bevor diese weiter in die vorgesehenen Scheiben geschnitten wurden. Tabelle 8 gibt einen Überblick über die insgesamt 182 Probekörper und die an ihnen geplanten Messungen. Die Abbildungen 19 a) bis f) zeigen den Zuschnitt der Proben sowie die Anordnung einiger Proben im ursprünglichen Marmorblock.

**Tabelle 8:** Probekörper zu Bestimmung der physikalischen Kennwerte des Marmors

Block	Bohrkern bzw. Prisma	alteriert	Bohrachse	Maße in mm		Gewicht in g	Schallgeschw. in Achsrichtung in m/s	geplante Messung	Zuschnitt	
				d	h				Anzahl	Höhe in mm
CS7b	1-1	schwach	x	49,1	199,6	1020,1	5107	Feuchtetransport TUD	5	30
CS7b	2-1	schwach	z	49,1	124,5	636,0	4882	Feuchtetransport TUD	3	30
CS7b	3-1	schwach	z	49,1	123,8	632,5	4654	Feuchtetransport TUD	3	30
CS4a	1-1	stark	z	49,1	199,7	1016,3	3572	Feuchtetransport TUD	5	30
CS4a	2-1	stark	x	49,1	125,0	635,8	3133	Feuchtetransport TUD	3	30
CS4a	3-1	stark	x	49,1	124,5	633,1	3120	Feuchtetransport TUD	3	30
CS4b	1-1	stark	x	69,7	125,0	1285,7	3165	Auslagerung Schlossbr.	3	30
CS4b	2-1	stark	x	69,7	124,5	1279,9	3234	Auslagerung Schlossbr.	3	30
CS4b	3-1	stark	x	69,7	125,0	1283,9	3079	Auslagerung Schlossbr.	3	30
CS4b	4-1	stark	x	69,7	124,5	1278,8	3152	Auslagerung Schlossbr.	3	30
CS5a	1-1	stark	x	40 x 40	124,8	539,6	3382	Feuchtespeicherung TUD	8	10
CS5a	2-1	stark	x	40 x 40	124,3	544,2	3280	Feuchtespeicherung TUD	8	10
CS5a	3-1	stark	x	40 x 40	123,8	545,5	3191	Feuchtespeicherung TUD	8	10
CS5a	4-1	stark	x	40 x 40	123,5	556,2	3175	Feuchtespeicherung TUD	8	10
CS5a	5-1	stark	x	40 x 40	123,8	548,1	3373	Feuchtespeicherung TUD	8	10
CS5a	6-1	stark	x	40 x 40	124,1	549,3	3174	Feuchtespeicherung TUD	8	10
CS5a	7-1	stark	x	40 x 40	123,8	553,4	3142	Feuchtespeicherung TUD	8	10
CS5a	8-1	stark	x	40 x 40	123,5	561,2	3135	Feuchtespeicherung TUD	8	10
CS5a	9-1	stark	x	69,7	124,3	1280,0	3462	Dampftransport TUD	5	20
CS5a	10-1	stark	z	69,7	123,6 (kürzeste Länge)	1312,6	-	Dampftransport TUD	5	20
CS8a	1-1	schwach	z	40 x 40	124,6	557,9	4960	Feuchtespeicherung TUD	8	10
CS8a	2-1	schwach	z	40 x 40	124,2	556,8	4600	Feuchtespeicherung TUD	8	10
CS8a	3-1	schwach	z	40 x 40	123,8	559,6	4568	Feuchtespeicherung TUD	8	10
CS8a	4-1	schwach	z	40 x 40	123,3	565,4	4688	Feuchtespeicherung TUD	8	1
CS8a	5-1	schwach	z	40 x 40	124,8	560,1	4819	Feuchtespeicherung TUD	8	10
CS8a	6-1	schwach	z	40 x 40	124,2	554,6	4533	Feuchtespeicherung TUD	8	10
CS8a	7-1	schwach	z	40 x 40	123,8	557,1	4469	Feuchtespeicherung TUD	8	10
CS8a	8-1	schwach	z	40 x 40	123,4	567,1	4504	Feuchtespeicherung TUD	8	10
CS8a	9-1	schwach	z	69,7	124,5	1284,8	4611	Dampftransport TUD	5	20
CS8a	10-1	schwach	x	69,7	123,5 (kürzeste Länge)	1319,4	-	Dampftransport TUD	5	20



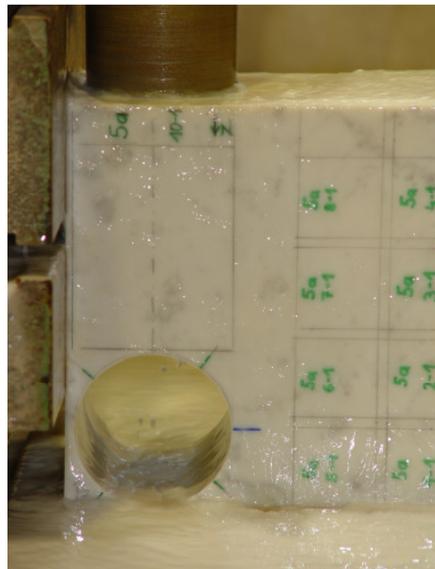
a) Anzeichnen der Bohrkern- und Prismen



b) Marmorblock in der Bohrmaschine



c) Bohren in x-Richtung



d) Bohren in z-Richtung



d) Schneiden der Prismen



f) Bohrkern- und Prismen in ihrer ursprünglichen Anordnung im Marmorblock

**Abbildung 19:** Zuschnitt der Proben für die Bestimmung der physikalischen Kennwerte

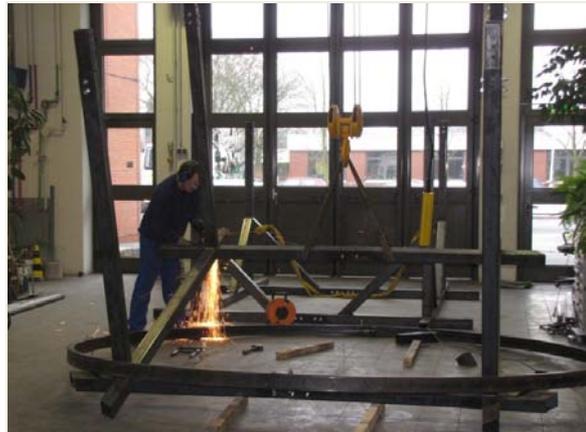
## Entwicklung einer innovativen Einhausung

Um die Wirkung einer innerhalb des Projektes konzipierten Einhausung experimentell nachweisen und mit der einer konventionellen Holzeinhausung vergleichen zu können, wurde im Februar 2009 an der Skulptur 1 eine Testeinhausung aufgebaut. Der Entwurf und der statische Nachweis der Konstruktion erfolgte durch die UdK Berlin. Der Bau dieser Einhausung sowie die Leitung des Auf- und Abbaus auf der Schlossbrücke fiel in den Aufgabenbereich der BAM.

Die Testeinhausung wurde als Stahlkonstruktion aus Hohlkastenprofilen ausgeführt, die mit einer PVC-Membran bespannt wurde. Aufgestellt wurde Sie auf einem Gerüst, das zu dieser Zeit für Restaurierungsarbeiten an der Skulptur stand. Zum Auf- und Abbau wurde ein Kran benötigt. Die Abbildungen 20 bis 29 zeigen Fotos des Baus der Einhausung und des Aufbaus auf der Schlossbrücke.



**Abbildung 20:** Lieferung des Materials zum Bau der Einhausung



**Abbildung 21:** Schleifarbeiten am untern Segment



**Abbildung 22:** Schweißen des oberen Segments



**Abbildung 23:** Probeaufbau der Konstruktion in der BAM



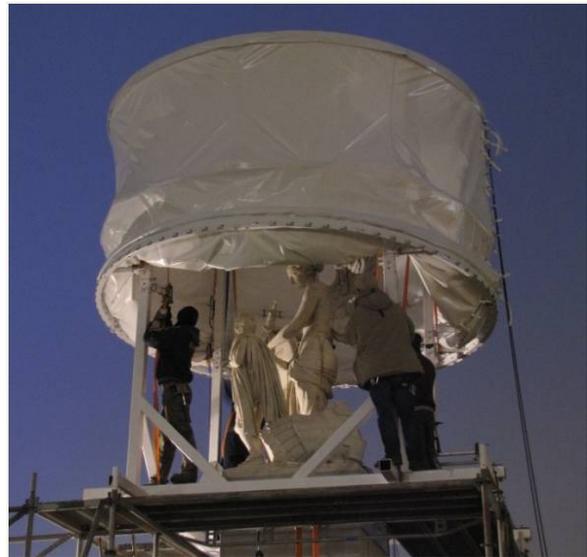
**Abbildung 24:** Aufstellen des unteren Segments an der Skulptur mit Hilfe eines Krans



**Abbildung 25:** Aufspannen der Membran auf das obere Segment



**Abbildung 26:** Montage des oberen Segments



**Abbildung 27:** Spannen der Membran



**Abbildung 28:** Abschluss der Montagearbeiten



**Abbildung 29:** Wirkung der Testeinhausung im Stadtbild

Durch den Aufbau der Testeinhausung konnten wertvolle Erfahrungen für die Entwicklung des Prototyps einer innovativen Wintereinhausung für die Schlossbrückenskulpturen gesammelt werden. So stellte sich heraus, dass vor allem das Spannen der Membran äußerst zeitaufwendig ist. Hierfür muss eine Lösung gefunden werden, bei der eine schon vormontierte Membran durch das Aufrichten der Tragkonstruktion gespannt wird. Dieser Ansatz würde auch die Gefahr einer Beschädigung der Skulpturen während des Auf- und Abbaus minimieren. Um für den Aufbau auf einen Kran verzichten zu können, müssen die einzelnen Teile der Konstruktion bedeutend leichter werden.



**Abbildung 30:** Zerstörungsfreie Untersuchung der Postamente mit RADAR

In Vorbereitung der Entwicklung eines Prototypen für eine Wintereinhausung wurden zerstörungsfreie RADAR-Untersuchungen der Postamente der Skulpturen und des Gehwegs auf der Schlossbrücke vorgenommen. Hiermit sollte geklärt werden, wie diese Einhausung auf der Schlossbrücke verankert werden kann. Es stellte sich dabei heraus, dass die Postamente im Kern aus Betonsockeln bestehen, die lediglich mit Marmorplatten verkleidet sind. Als Verankerungspunkte für eine Einhausung kommen sie somit nicht in Frage. Auch der Gehweg auf der Schlossbrücke, unter dem zahlreiche Rohre und Leitungen verlegt sind, bietet keine ausreichenden Verankerungsmöglichkeiten. Eine Verankerung kann deshalb nur in den Natursteinsockeln der Brückenpfeiler erfolgen.

## 5 Klimaaufzeichnung an den Skulpturen und Einhausungen

Obwohl viele kulturell und künstlerisch bedeutende Skulpturen traditionell im Winter durch Einhausungen vor der Witterung geschützt werden gibt es nur wenige Messdaten, welche die Auswirkung dieser Schutzsysteme auf die Objekte belegen. Beispiele für solche Daten finden sich in [4] und [5]. Allerdings unterscheiden sich die untersuchten Objekte grundsätzlich in den Materialeigenschaften, ihrer Größe, der Exposition und den klimatischen Umgebungsbedingungen, denen sie ausgesetzt sind, von den Skulpturen auf der Schlossbrücke. Um die Wirkung der auf der Schlossbrücke getesteten Schutzsysteme nachweisen zu können, wurde ein umfangreiches Messsystem konzipiert und aufgebaut. Damit wurde es möglich, die auf die Skulpturen mit und ohne Schutzsystem einwirkenden Klimafaktoren sowie die Reaktion der Skulpturen auf diese Einflüsse aufzuzeichnen. Die gewonnenen Daten bilden die Grundlage für die Bewertung der Wirksamkeit der Schutzsysteme sowie zur Validierung der Simulationsrechnungen.

Zur Untersuchung der Wirksamkeit verschiedener Einhausungskonzepte wurden zwei verschiedene Einhausungstypen aufgestellt. Beide wurden auf temporär zur Restauration der Skulpturen aufgestellten Gerüsten montiert. Die erste Einhausung aus Holz wurde im Januar 2008, wie Abbildung 31 zeigt, um die Skulptur 2 errichtet und im Mai 2008 wieder abgebaut. Sie war nach unten offen und an den Wänden direkt unter dem Dach umlaufend mit 12 cm hohen Lüftungsschlitzen versehen. Die zweite Einhausung wurde im Februar 2009 als Stahlkonstruktion, die mit einer PVC-Membran bespannt ist, um die Skulptur 1 errichtet (Abbildung 32). Auch diese Konstruktion war nach unten offen, hatte aber sonst keine weiteren Lüftungsöffnungen. Der Abbau dieser Einhausung erfolgte im Oktober 2010.



**Abbildung 31:** Konventionelle Holzeinhausung während des Aufbaus



**Abbildung 32:** Innovative Wintereinhausung mit PVC-Membran

Zur Aufzeichnung des lokalen Klimas auf der Schlossbrücke und somit der äußeren Einwirkungen auf die Skulpturen wurde eine Wetterstation eingesetzt. Gemessen wurden die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, der Luftdruck, die Taupunkttemperatur, die Niederschlagsmenge, die Windgeschwindigkeit und -richtung sowie die Globalstrahlung.

Die Reaktion der Skulpturen auf die klimatischen Einflüsse wurde anhand von Oberflächentemperaturen und oberflächennahen Materialfeuchten erfasst. Die Messung der Oberflächentemperaturen erfolgte an massiven Skulpturenteilen in den Ausrichtungen nach Norden, Süden, Osten und Westen. Des Weiteren wurden die Oberflächentemperaturen an filigranen Skulpturenteilen im oberen und unteren Bereich der Skulpturen gemessen. Die oberflächennahen Materialfeuchten wurden an nach Norden und Süden ausgerichteten Oberflächen massiver Skulpturenteile erfasst. Innerhalb der Einhausungen wurden außerdem die Lufttemperaturen und Luftfeuchten in zwei verschiedenen Höhen gemessen.

Die Messung eines Temperaturprofils in den Skulpturen ist ohne einen zerstörenden Eingriff nicht möglich. Sie wurden deshalb an den schon beschriebenen Referenzproben durchge-

führt. Zur Simulation eines eindimensionalen Wärmetransportes wurden die Seitenflächen und die Rückseiten dieser Proben wärmegeklämt.

Einen Überblick über das Messkonzept gibt die Tabelle 9. Die Abbildungen 36 bis 38 geben zusammen mit den Tabellen 10 bis 12 die genauen Positionen der Sensoren an den Skulpturen und die dort gemessenen Größen wieder.

**Tabelle 9:** Konzept der Klimamessungen an den Schlossbrückenskulpturen



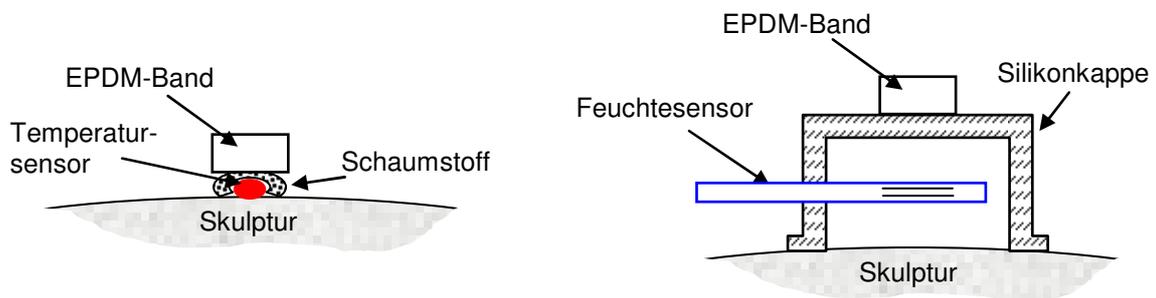
Messgröße	Position an Skulptur	Frei bewittert				In Holzeinhausung				In Membraneinhausung			
		Ausrichtung											
		N	S	O	W	N	S	O	W	N	S	O	W
Oberflächentemperatur	Massiv (Rumpf)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Filigran (Arm, Bein)	x	x			x	x			x	x		
Oberflächennahe Materialfeuchte	Massiv (Rumpf)	x	x			x	x			x	x		
Luftfeuchte, Taupunkt, Temperatur	Oberes Drittel und unterhalb Plinte	x				x				x			
Windgeschwindigkeit	Oberes und unteres Drittel									x			
Temperaturprofil	In Auslagerungsproben	Ausrichtung nach SW und horizontal								Ausrichtung nach SW			
Klimadaten	Umgebung	x											

Die technischen Anforderungen an das eingesetzte Messsystem waren sehr hoch. So mussten die Daten über den gesamten Projektzeitraum zuverlässig und möglichst wartungsfrei aufgezeichnet werden. Da sowohl beim Projektpartner TUD als auch bei der Arbeitsgruppe BAM gute Erfahrungen mit Messsystemen der Firma Ahlborn vorliegen, wurde ein speziell auf die Anforderungen abgestimmtes System dieser Firma zusammengestellt. Die Stromversorgung erfolgte über einen festen Anschluss. Auch bei Stromausfällen blieben die gespeicherten Daten erhalten und das System begann nach der Wiederherstellung der Stromversorgung automatisch wieder mit der Datenaufzeichnung. Die einzelnen Datenerfassungseinheiten wurden in wasserdichten und witterungsbeständigen hellgrauen Kästen untergebracht, die dann auf den Plinten der Skulpturen aufgestellt wurden. Da sie somit nach der Installation nicht mehr zugänglich waren, erfolgte das Auslesen der Daten über eine Funkverbindung.

Alle installierten Monitoringsysteme arbeiteten stabil. Während der gesamten Projektlaufzeit kam es nur zu wenigen kurzfristigen Ausfällen einzelner Sensoren an den Skulpturen. Allerdings fiel die Wetterstation in der Zeit vom 22. April 2008 bis zum 27. August 2008 aus. Ursache hierfür war ein Wackelkontakt im Sensor, ausgelöst durch die Umsetzung der Wetterstation bei Gerüstarbeiten. Nach der Umsetzung war der Sensor zunächst nicht zugänglich, wodurch die Reparatur erst Ende August möglich war. In der Zeit vom 20. August 2008 bis zum 11. März 2009 war der Globalstrahlungssensor aufgrund eines defektes, der in einer Servicewerkstatt behoben werden musste, nicht in Betrieb.

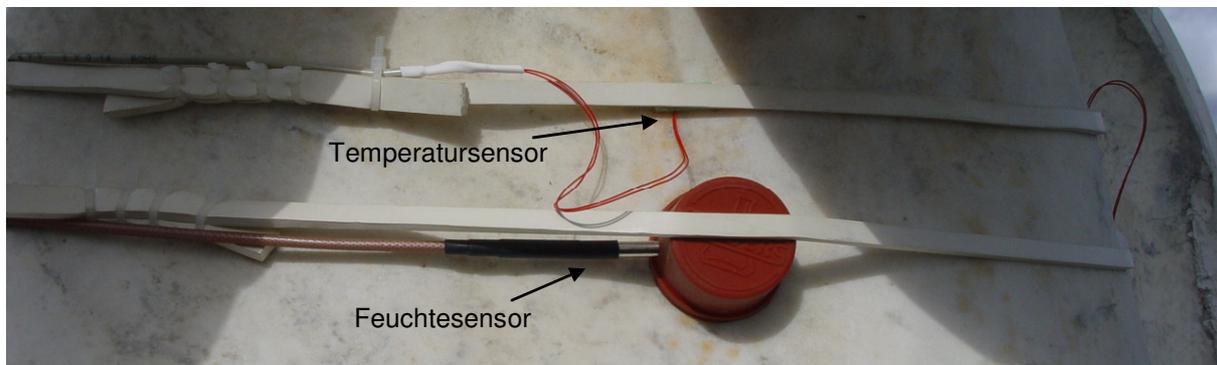
Als Herausforderung erwies sich die Befestigung der Sensoren auf den Oberflächen der Skulpturen. Zum Einen durften die Skulpturen dabei in keiner Weise beschädigt und zum Anderen sollte der Gesamteindruck der weiterhin sichtbaren Skulpturen möglichst wenig be-

einträchtigt werden. Als geeignet zur Befestigung der Sensoren erwiesen sich Bänder aus weißem EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk), die um die Skulpturen gespannt wurden (Abbildung 33).



a) Befestigung der Oberflächentemperatursensoren

b) Befestigung der Oberflächenfeuchtesensoren



**Abbildung 33:** Befestigung der Sensoren an den Skulpturen mit EPDM-Bändern

Dieses Material ist äußerst witterungsbeständig und dauerhaft elastisch, wodurch eine Beschädigung der Skulpturen ausgeschlossen werden konnte, während die Sensorik zuverlässig an den Skulpturen gehalten wurde. Die so installierte Sensorik ist, wie Abbildung 34 zeigt, vom Bürgersteig auf der Schlossbrücke aus kaum zu bemerken.



**Abbildung 34:** Monitoringsystem an der Skulptur 2



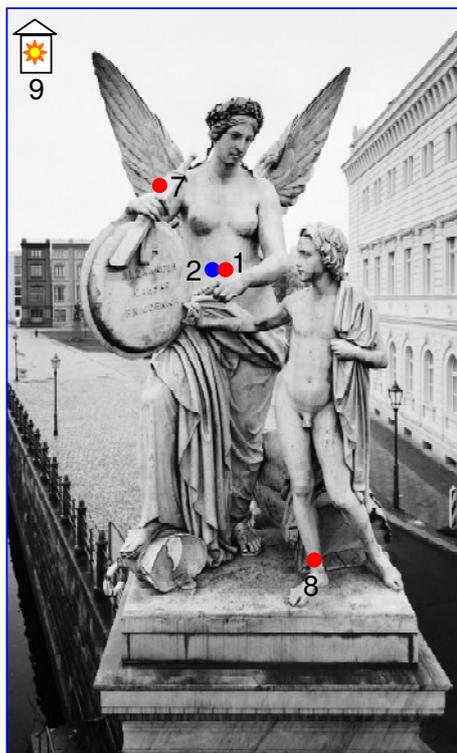
**Abbildung 35:** Monitoringsystem und Wetterstation an der Skulptur 1

Bei der Messung der Oberflächentemperatur der Skulpturen ist es wichtig, den direkten Einfluss der Lufttemperatur auf die Messung so gering wie möglich zu halten. Die auf die Oberfläche geklebten Sensoren wurden deshalb mit wasserdichtem Schaumstoff gegen die

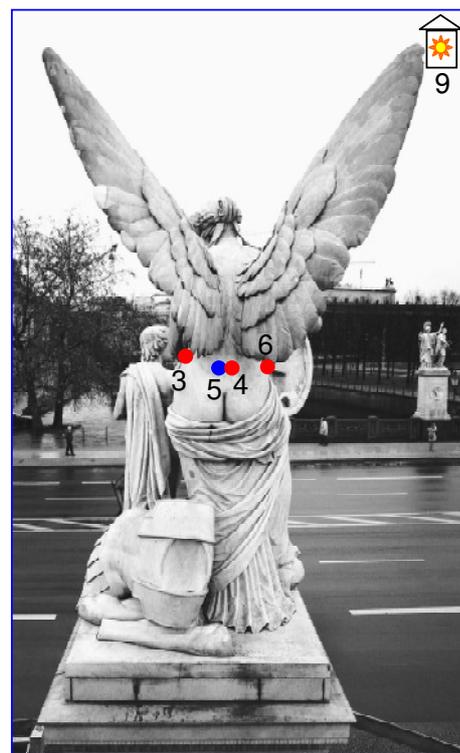
Umgebungsluft isoliert (Abbildung 33 a)). Zur Messung der oberflächennahen Materialfeuchte wurden Luftfeuchtesensoren in Kappen aus Silikon eingebettet, deren Öffnung an die Oberfläche der Skulpturen geklemmt wurde (Abbildung 33 b)). So entsteht über der Skulpturenoberfläche eine abgeschlossene Luftkammer, in der sich die Luftfeuchte in Abhängigkeit von der oberflächennahen Materialfeuchte einstellt [6].

**Tabelle 10:** Lage der Messstellen an Skulptur 1

<b>Skulptur 1, Nike unterrichtet den Jungen in Geschichte</b>			
	<b>Messgröße</b>	<b>Lage der Messstelle</b>	<b>Ausrichtung</b>
1 ●	Oberflächentemperatur	Bauch der Nike	Nord
2 ●	Oberflächenfeuchte	Bauch der Nike	Nord
3 ●	Oberflächentemperatur	Hüfte der Nike	West
4 ●	Oberflächentemperatur	Rücken der Nike	Süd
5 ●	Oberflächenfeuchte	Rücken der Nike	Süd
6 ●	Oberflächentemperatur	Hüfte der Nike	Ost
7 ●	Oberflächentemperatur	Rechter Oberarm der Nike	Oben
8 ●	Oberflächentemperatur	Rechtes Bein des Jungen, Spann	Nord
9 ☀	Wetterstation: -Lufttemperatur -Luftfeuchte -Luftdruck -Windgeschwindigkeit -Windrichtung -Niederschlagsmenge -Globalstrahlung	ca. 2m südöstlich der Skulptur	



a) Skulptur 1, Nordansicht



b) Skulptur 1, Südansicht



Wetterstation

● Oberflächentemperatur

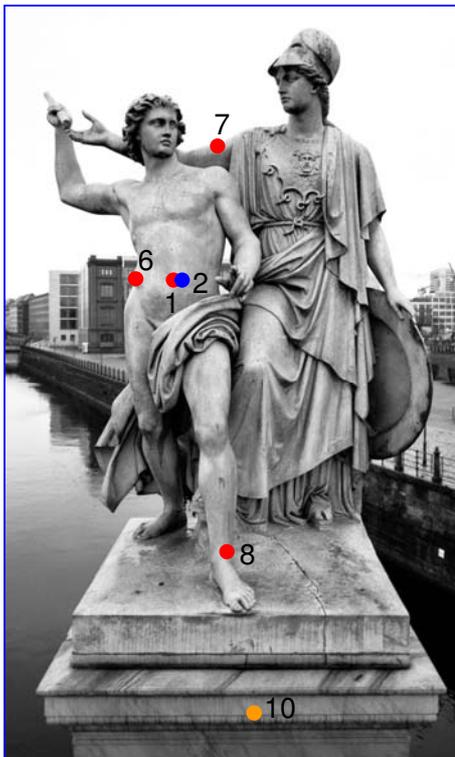
● Oberflächenfeuchte

● Lufttemperatur, Luftfeuchte

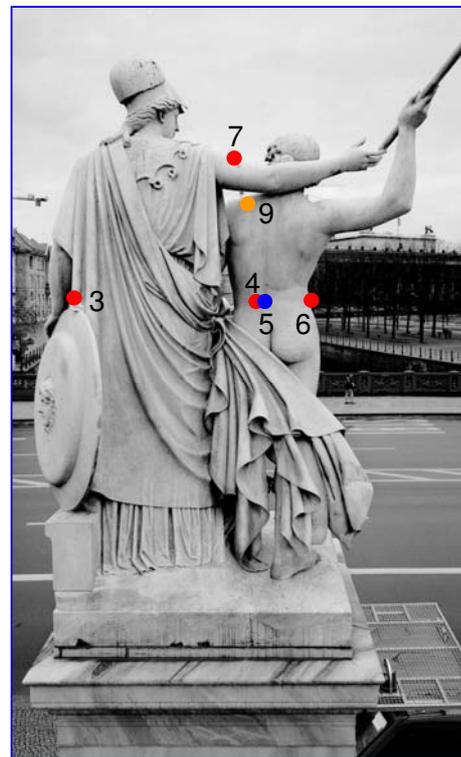
**Abbildung 36:** Anordnung der Messstellen an Skulptur 1

**Tabelle 11:** Lage der Messstellen an Skulptur 2

<b>Skulptur 2, Athene unterrichtet den Jungen im Gebrauch der Waffen</b>			
	<b>Messgröße</b>	<b>Lage der Messstelle</b>	<b>Ausrichtung</b>
1●	Oberflächentemperatur	Bauch des Jungen	Nord
2●	Oberflächenfeuchte	Bauch des Jungen	Nord
3●	Oberflächentemperatur	Hüfte der Athene	West
4●	Oberflächentemperatur	Rücken des Jungen	Süd
5●	Oberflächenfeuchte	Rücken des Jungen	Süd
6●	Oberflächentemperatur	Hüfte des Jungen	Ost
7●	Oberflächentemperatur	Rechter Oberarm der Athene	Oben
8●	Oberflächentemperatur	Linkes Bein des Jungen, Spann	Nord
9●	Lufttemperatur/ Luftfeuchte	Höhe rechte Schulter des Jungen	Süd
10●	Lufttemperatur/ Luftfeuchte	Unterhalb der Plinte	Nord



c) Skulptur 2, Nordansicht



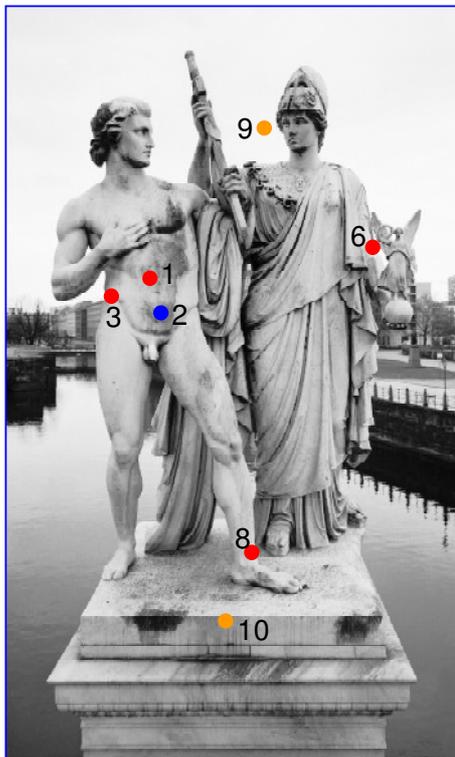
d) Skulptur 2, Südansicht

- Oberflächentemperatur
- Oberflächenfeuchte
- Lufttemperatur, Luftfeuchte

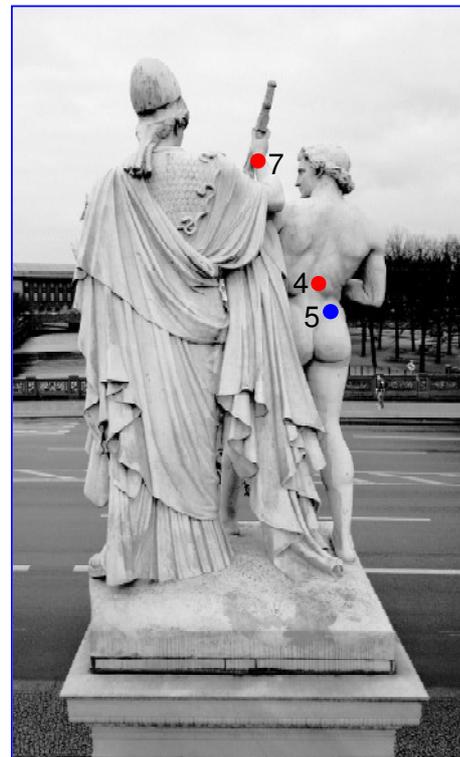
**Abbildung 37:** Anordnung der Messstellen an Skulptur 2

**Tabelle 12:** Lage der Messstellen an Skulptur 3

<b>Skulptur 3, Athene bewaffnet den Krieger</b>			
	<b>Messgröße</b>	<b>Lage der Messstelle</b>	<b>Ausrichtung</b>
1●	Oberflächentemperatur	Bauch des Kriegers	Nord
2●	Oberflächenfeuchte	Bauch des Kriegers	Nord
3●	Oberflächentemperatur	Hüfte des Kriegers	Ost
4●	Oberflächentemperatur	Rücken des Kriegers	Süd
5●	Oberflächenfeuchte	Rücken des Kriegers	Süd
6●	Oberflächentemperatur	Linker Arm der Athene	West
7●	Oberflächentemperatur	Rechter Arm der Athene	Oben / Süd
8●	Oberflächentemperatur	Linkes Bein des Kriegers, Spann	Nord
9●	Lufttemperatur/ Luftfeuchte	Höhe Gesicht der Athene	-
10●	Lufttemperatur/ Luftfeuchte	Höhe der Plinte	Nord



c) Skulptur 3, Nordansicht



d) Skulptur 3, Südansicht

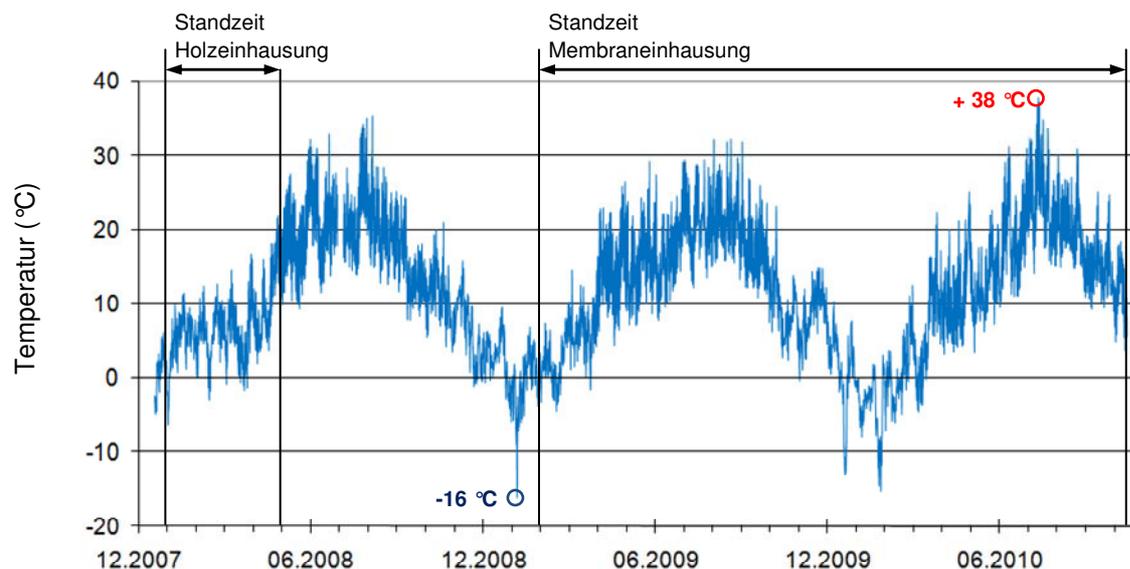
- Oberflächentemperatur
- Oberflächenfeuchte
- Lufttemperatur, Luftfeuchte

**Abbildung 38:** Anordnung der Messstellen an Skulptur 3

Die Aufzeichnung der Klimadaten an den Schlossbrückenskulpturen umfasst einen Zeitraum von insgesamt 34 Monaten. Aufgezeichnet wurden die Messwerte in einem Takt von 15 Minuten. Das erste System wurde am 21. Dezember 2007 an der Skulptur 2 in Betrieb genommen. Beendet wurden die Klimaaufzeichnungen am 13. Oktober 2010.

Der so entstandene Datensatz ist sehr groß und kann im Rahmen dieses Berichtes nicht vollständig wiedergegeben werden. Im Folgenden werden deshalb einige für das Projekt besonders interessante Zeitabschnitte dargestellt und in Hinblick auf die Wirkung der Einhausungssysteme diskutiert.

Die Abbildung 39 zeigt die auf der Schlossbrücke gemessenen Lufttemperaturen über den gesamten Projektzeitraum. Um die Zuverlässigkeit der Daten zu überprüfen, wurden Sie mit den Aufzeichnungen der Wetterstation Berlin-Tempelhof des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verglichen [7]. Dieser Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung der Daten. Allerdings liegen die an der Schlossbrücke gemessenen Temperaturen tendenziell höher als die in Tempelhof. Insbesondere die in Tempelhof gemessenen niedrigsten Temperaturen während der Sommertage werden an der Schlossbrücke nicht erreicht. Dies lässt auf ein ausgeprägtes lokales Klima auf der Schlossbrücke schließen, bedingt durch die dichte Bebauung in der Umgebung und die Lage direkt über der Spree. Bestätigt wird dies durch die langjährigen Mittelwerte der Temperaturen im Zeitraum von 1961 bis 1990 an den beiden Standorten. Dieser Mittelwert liegt für die Station Tempelhof bei 9°C bis 9,5°C, während er für das Gebiet um die Schlossbrücke bei 10°C bis 10,5°C liegt [8]. Die von der Wetterstation gemessene Hauptwindrichtung an der Schlossbrücke ist Süd-West.



**Abbildung 39:** Lufttemperatur auf der Schlossbrücke während der Projektlaufzeit

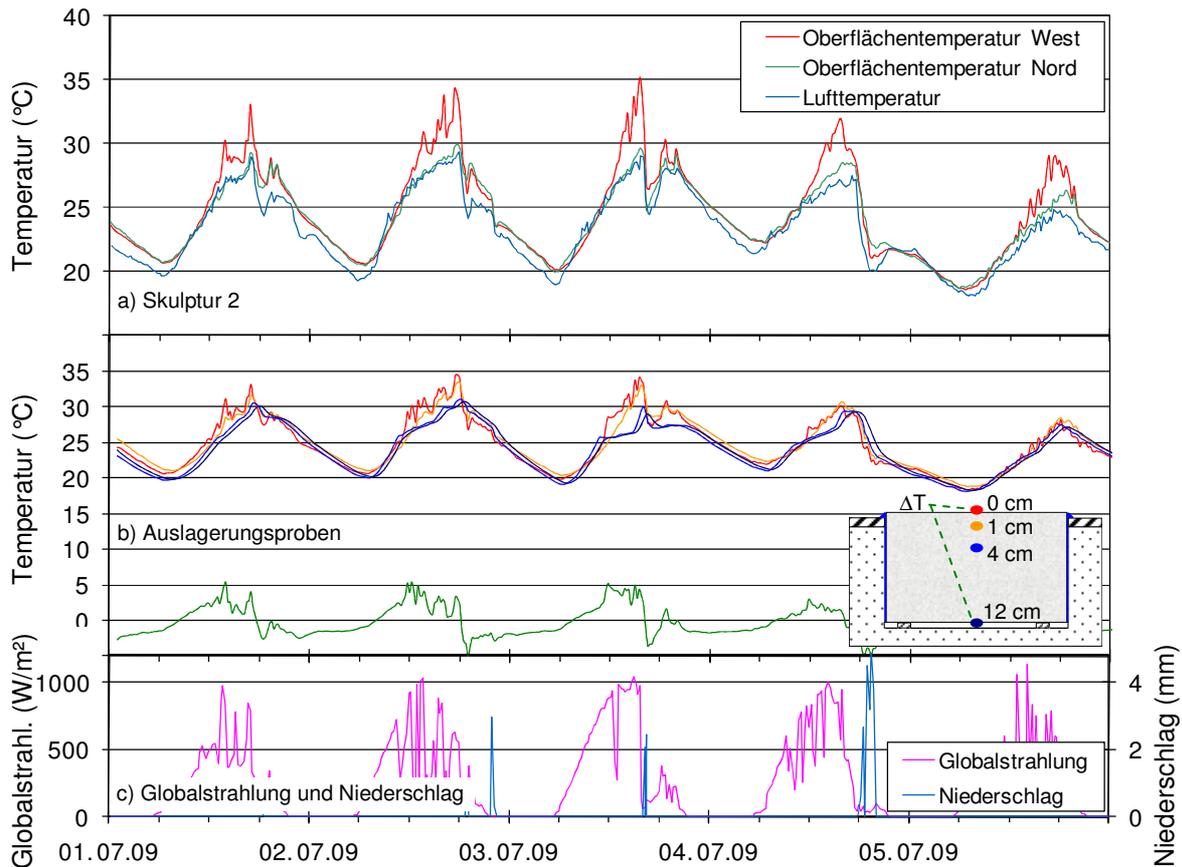
Die Entfestigung von Marmor wird im Wesentlichen durch Temperaturwechsel in Kombination mit Durchfeuchtung und Austrocknung verursacht. Der wichtigste Indikator für die Entfestigung ist die Schallgeschwindigkeit. Eine erste Entfestigung findet allein durch eine Temperaturänderung des trockenen, bruchfrischen Marmors statt. Dies ist eine Folge der richtungsabhängigen Ausdehnungskoeffizienten der Kalzitkristalle. Während des gesamten Messzeitraumes wurden die niedrigste Temperatur am 7. Januar 2009 mit -16°C und die höchste Temperatur am 11. Juli 2010 mit +38°C gemessen. Allein in dieser, im Vergleich zur gesamten Standzeit der Skulpturen kurzen Zeit, betrug die Temperaturdifferenz, der die Skulpturen ausgesetzt waren, also mehr als 50 K. Es ist davon auszugehen, dass die Skulpturen der Schlossbrücke seit ihrer Aufstellung in den Wintern mehrmals auf ca. -20°C abgekühlt und in den Sommern auf ca. 40°C erwärmt wurden. Die durch diese jahreszeitlichen Temperaturwechsel hervorgerufene Temperaturspanne von ca. 60 K führt zu einer Minderung der Schallgeschwindigkeit gegenüber dem bruchfrischen Carraramarmor um ca. 1000 m/s. Eine weitere Entfestigung findet dann nur noch statt, wenn der Marmor während der Temperaturwechsel durchfeuchtet ist [9]. Eine Schädigung des Marmors kann auch durch Frost-Tau-

Wechsel stattfinden, wenn im Gefüge während der Unterschreitung des Gefrierpunktes Wasser vorhanden ist. Durch hohe Temperaturgradienten im Material können sich aufgrund der thermischen Ausdehnung zusätzliche Spannungen aufbauen. Auch dies kann zur Rissbildung im Inneren und somit zur Entfestigung des Marmors beitragen.

Die Temperatur des Marmors wird von der Temperatur der Umgebungsluft und der Globalstrahlung bestimmt. Die Materialfeuchte stellt sich entsprechend der Luftfeuchte ein. Hinzu kommt der direkte Eintrag flüssigen Wassers durch Niederschläge und durch Tau, wenn die Materialtemperatur unterhalb Taupunkttemperatur liegt.

Aus den genannten Schädigungsmechanismen und Umwelteinwirkungen lassen sich die Anforderungen ableiten, die ein Schutzsystem für Marmorskulpturen im Idealfall erfüllt. So muss es die Temperatur der Skulpturen konstant halten und sie vor Feuchtigkeit schützen. Diese Anforderungen sind nur innerhalb von Gebäuden oder durch ein aktiv klimatisiertes Schutzsystem zu erfüllen. Ein passives Schutzsystem für den Winter kann aber Niederschläge abhalten und die relative Luftfeuchte soweit verringern, dass eine Taupunktunterschreitung auf dem Marmor verhindert wird. Dadurch wird ein wesentlicher Beitrag zur Schädigung bereits deutlich vermindert. Auch können die Skulpturen vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt und die Amplituden der täglichen Temperaturwechsel verringert werden.

Der Einfluss der direkten Sonneneinstrahlung lässt sich verifizieren, indem man die Oberflächentemperaturen massiver Skulpturenteile auf der der Sonne zu- und abgewandten Seite vergleicht. Die Diagramme der Abbildung 40 a) und der Abbildung 41 a) zeigen Beispiele für die an der Skulptur 2 gemessenen Oberflächentemperaturen im Vergleich zur Lufttemperatur. Im Winter werden die höchsten Temperaturen an sonnigen Tagen auf der Südseite der Skulptur gemessen. Allerdings ist der Einfluss der direkten Sonnenstrahlung nur gering. In dem im Diagramm a) in Abbildung 41 gezeigten Ausschnitt beträgt die Differenz der Oberflächentemperaturen der ungeschützten Skulptur auf der Nord- und Südseite an sonnigen Tagen weniger als 4 K. Ohne direkte Sonneneinstrahlung ist keine Temperaturdifferenz festzustellen. Wie am Beispiel der Temperaturverläufe vom 1. Juli 2009 bis zum 6. Juli 2009 in Diagramm a) der Abbildung 40 zu erkennen ist, ist auch im Sommer die Temperaturerhöhung infolge einer direkten Sonneneinstrahlung nicht sehr hoch. Im dargestellten Zeitabschnitt werden die höchsten Temperaturen auf der Westseite der Skulptur gemessen. Die größte Temperaturdifferenz zur Nordseite ist kleiner als 6 K. Die größten, im gesamten Messzeitraum aufgetretenen Oberflächentemperaturdifferenzen sind kleiner als 10 K.



**Abbildung 40:** Einfluss des lokalen Klimas auf die Temperaturen des Marmors im Sommer

Hauptursache für den relativ geringen Einfluss der direkten Sonneneinstrahlung auf die Oberflächentemperatur ist die hohe Reflektivität des auch optisch sehr hellen Marmors. Hinzu kommen eine hohe Wärmeleitfähigkeit und eine hohe Dichte, wodurch die auf der Oberfläche in Wärme umgewandelte Strahlung schnell ins Innere abgeleitet wird.

Besonders interessant ist der Verlauf der Globalstrahlung und der Temperatur am 3. Juli 2009. Wie an der Globalstrahlung erkennbar, ist der Vormittag sonnig. Die Lufttemperatur und die Oberflächentemperatur auf der Nordseite steigen von ca. 20 °C um 6 Uhr auf ca. 30 °C um 15:30 Uhr. In der gleichen Zeit steigt die Oberflächentemperatur auf der Südseite von ebenfalls ca. 20 °C auf 35 °C. Ab 12:30 Uhr ist der Himmel für eine Stunde bedeckt, wodurch die Oberflächentemperatur auf der Südseite kurzzeitig von 33 °C auf 30 °C fällt. Um 15:30 Uhr fällt die Temperatur auf der Südseite plötzlich innerhalb einer Stunde um 8 K auf ca. 27 °C. Gleichzeitig fallen auch die Lufttemperatur und die Oberflächentemperatur auf der Nordseite auf 20 °C. Ursache hierfür ist ein plötzlich einsetzender Regenschauer. Anschließend steigen die Temperaturen noch im Laufe des Abends auf fast 30 °C und die Oberfläche der Skulptur trocknet dabei ab. Die hygrothermische Belastung des Marmors während solcher Wetterereignisse ist sehr hoch. Sie tragen wesentlich zur Entfestigung des Marmors bei.

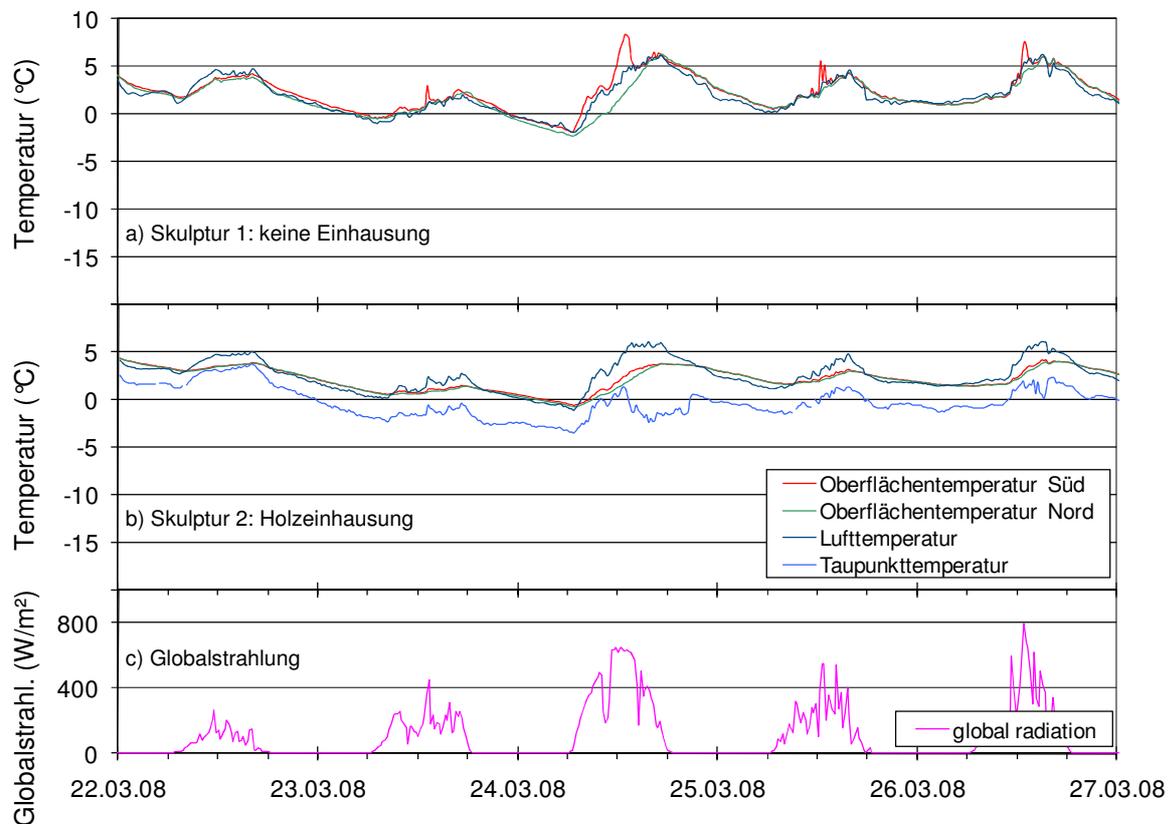
Auch am 4. Juli 2009 beginnt es nachmittags zu regnen, allerdings ist es schon im Laufe des Tages zeitweilig bewölkt, so dass der Temperatursturz weniger abrupt ist. Da der Regen länger anhält, gehen die Temperaturen weiter zurück.

Das Diagramm b) in Abbildung 40 zeigt das an der nach Südwesten ausgerichteten, senkrecht stehenden Auslagerungsprobe gemessene Temperaturprofil. Der Verlauf der Oberflächentemperatur entspricht erwartungsgemäß im Wesentlichen dem Verlauf der an der Westseite der Skulptur 2 gemessenen Temperaturen. Die in 1 cm Tiefe gemessene Temperatur folgt der Oberflächentemperatur aufgrund der relativ hohen Wärmeleitfähigkeit des Marmors sehr schnell. Höhere Oberflächentemperaturen sind lediglich zu Zeiten mit direkter Sonneneinstrahlung festzustellen. Die größten gemessenen Temperaturdifferenzen zwischen der Oberfläche der Probe und der Rückseite liegen im betrachteten Zeitabschnitt bei 5 K. Bei

steigenden Umgebungstemperaturen sind die Oberflächentemperaturen höher als die der tiefer liegenden Messstellen. Fallen die Umgebungstemperaturen, so kehrt sich das Temperaturprofil in den Auslagerungsproben um.

### Wirkung der Holzeinhausung im Winter

Die Abbildung 41 zeigt vergleichend die Klimasituation an den Skulpturen 1 und 2 vom 22. März 2008 bis zum 27. März 2008. Die Einhausung beeinflusst die Lufttemperatur direkt neben der Skulptur nur sehr geringfügig. Dies ist auf die großen Lüftungsöffnungen im Boden und unterhalb des Daches der Einhausung zurückzuführen. Hierdurch ist eine hohe Luftaustauschrate innerhalb der Einhausung möglich. Trotzdem wird der Gang der Oberflächentemperaturen im Vergleich zur frei bewitterten Skulptur 1 leicht gedämpft. So ist zwischen den Oberflächentemperaturen auf der Nord- und Südseite innerhalb der Einhausung aufgrund der Abschattung kein Unterschied mehr messbar. Zum Anderen folgen die Oberflächentemperaturen in der Einhausung der Lufttemperatur langsamer als außerhalb, so dass Temperaturdifferenzen von bis zu 3 K entstehen. Der Grund hierfür ist wahrscheinlich ein geringerer Wärmeübergang zwischen der Luft und dem Marmor aufgrund kleinerer Strömungsgeschwindigkeiten in der Einhausung. Der Taupunkt innerhalb der Einhausung liegt im dargestellten Zeitraum nur wenige Kelvin unterhalb der Oberflächentemperatur der Skulptur. Allerdings zeigt der Gesamtverlauf der Messungen, dass die Oberflächentemperatur der Skulptur innerhalb der Einhausung die Taupunkttemperatur ca. 430 Stunden unterschreitet. Das entspricht einem Anteil von ca. 13 % der 133 Tage, welche die Einhausung aufgebaut war. Im gleichen Zeitraum gab es an 51 Tagen Niederschlag. Leider liegen für diesen Zeitraum keine Daten zur Taupunktunterschreitung an der frei bewitterten Skulptur 1 vor. Es ist aber davon auszugehen, dass die Schutzwirkung dieser Einhausung aufgrund der hohen Luftwechselrate im Wesentlichen auf dem Schutz vor Niederschlag beruht.



**Abbildung 41:** Einfluss des lokalen Klimas und der Holzeinhausung auf die Marmortemperaturen im Winter

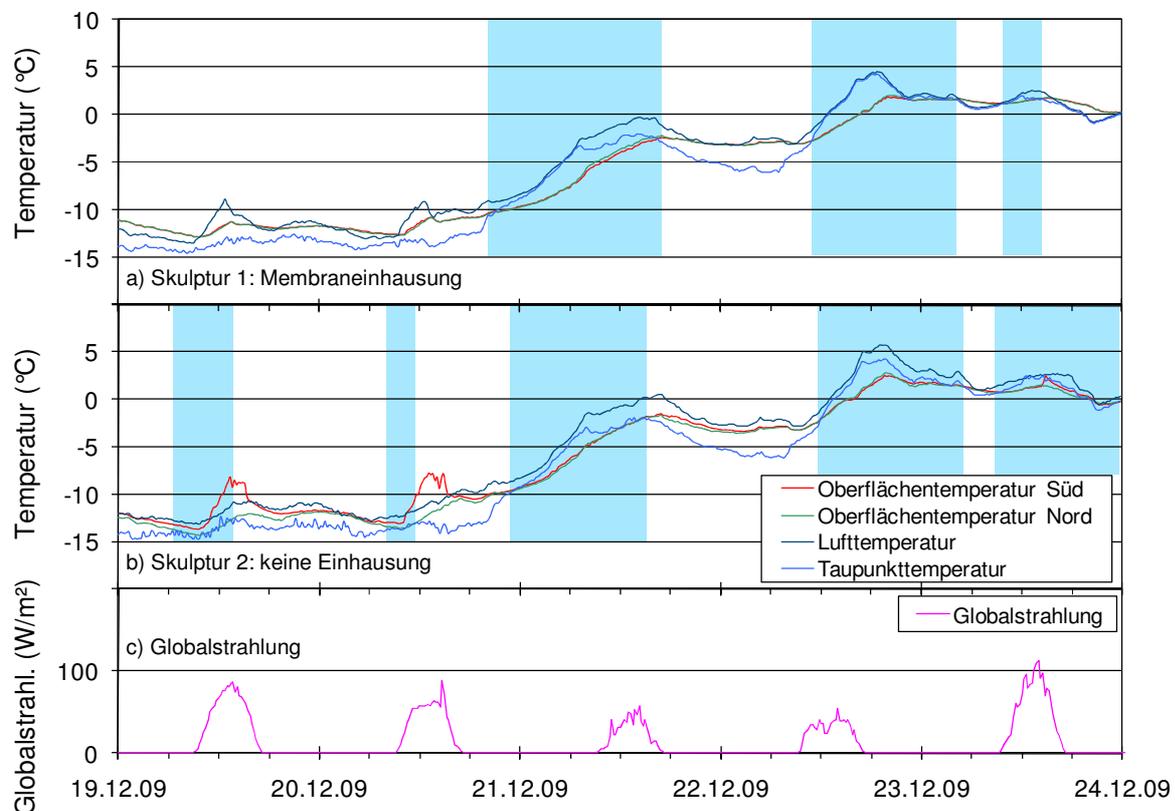
## Wirkung der Membraneinhausung im Winter

Die Membraneinhausung zeigt eine ähnliche Wirkung auf das Innenklima wie die Holzeinhausung. Auch hier unterscheiden sich die Oberflächentemperaturen der Nord- und Südseite aufgrund der Abschattung nicht. Allerdings ist bei Sonnenschein ein leichter Anstieg der Lufttemperatur innerhalb der Einhausung zu verzeichnen. Da die Wetterstation im Winter im Schatten der Einhausung liegt, enthält die im Diagramm c) der Abbildung 42 dargestellte Strahlung nicht die direkte Sonnenstrahlung. Der Vergleich mit den Daten des DWD zeigt aber, dass der 19. Dezember 2009 und der 20. Dezember 2009 in Berlin sonnige Tage waren.

Auch innerhalb dieser Einhausung unterschreiten die Oberflächentemperaturen zeitweise die Taupunkttemperatur. In Abbildung 42 sind diese Zeiten hellblau markiert. Bei Temperaturen deutlich unter dem Gefrierpunkt kann dies zu Reifbildung auf den Skulpturen führen. Erst wenn die Temperaturen wieder über 0°C steigen, kommt es zu einer direkten Befeuchtung der Oberfläche. Diese Situation tritt in dem in Abbildung 42 gezeigten Ausschnitt am Morgen des 22. Dezember 2009 ein. Die Taupunkttemperatur liegt in dieser Zeit weiterhin über der Oberflächentemperatur der Skulptur.

Im Zeitraum vom 1. Oktober 2009 bis zum 24. Februar 2010 wird die Taupunkttemperatur an der Oberfläche der frei bewitterten Skulptur 2 in insgesamt 960 Stunden unterschritten. Das entspricht ca. 27 % der betrachteten 147 Tage. Innerhalb der Einhausung wird die Taupunkttemperatur an der Skulpturenoberfläche nur in 694 Stunden unterschritten, was einem Anteil von 20 % der Zeit entspricht. Innerhalb dieser Zeit gab es an 63 Tagen Niederschlag.

Durch die Einhausung wird die Zeit des Feuchteintrages durch Tau und durch Niederschläge verkürzt, obwohl durch die große Öffnung in der Unterseite der Einhausung eine hohe Luftwechselrate gegeben ist. Durch die Schließung der Unterseite lässt sich der Feuchteintrag wahrscheinlich weiter reduzieren. Außerdem hat sich gezeigt, dass sich innerhalb der Einhausung verstärkt Staub ablagert. Auch um dies zu verhindern, sollten Schutzsysteme die Skulpturen generell staubdicht umschließen.



**Abbildung 42:** Einfluss des lokalen Klimas und der Membraneinhausung auf die Marmortemperaturen im Winter

## Zusammenfassung

Innerhalb des Forschungsprojektes konnten wertvolle Daten und Erkenntnisse über die auf die Skulpturen der Schlossbrücke einwirkenden Schadstoff- und Klimabelastungen gesammelt werden. So zeigte sich, dass die Belastungen durch Luftschadstoffe in den letzten Jahren deutlich zurückgegangen sind. Die Belastung durch Staub ist aber immer noch hoch. Dies bildet die Grundlage für einen starken mikrobiologischen Bewuchs der Oberflächen und erfordert regelmäßige Reinigungen.

Das an den Skulpturen der Schlossbrücke installierte Klimamonitoringsystem arbeitete über den gesamten Projektzeitraum zuverlässig. Die gewonnenen Daten bilden über das Ziel des Projektes hinaus eine wertvolle Grundlage zur Untersuchung von klimatischen Einflüssen auf die Verwitterung von Marmor. So lassen sich an diesen Daten nicht nur die jahreszeitlichen klimatischen Belastungen, sondern auch kurzfristige Wetterereignisse wie plötzliche Temperaturstürze durch Schlagregen und deren Einfluss auf die Skulpturen, ablesen.

Anhand der vergleichend an den frei bewitterten und durch zwei verschiedene Einhausungssysteme geschützten Skulpturen aufgezeichneten Klimadaten konnte eine Bewertung der getesteten Einhausungen vorgenommen werden. So zeigte sich, dass sich die Wirkung der getesteten konventionellen Holzeinhausung aufgrund der hohen Luftaustauschrate auf den Schutz vor Niederschlag beschränkt. Die Membraneinhausung hingegen reduziert auch die Kondensatbildung an den Skulpturen und somit deren Belastung durch direkten Wassereintrag. Durch ein Schließen der im Test unten offenen Einhausung lässt sich dieser Effekt wahrscheinlich weiter verstärken. Zusätzlich ließe sich so der Tagesgang der Materialtemperatur weiter dämpfen und die Staubbelastung der Skulpturen für die Wintermonate minimieren. Die gewonnenen Klimadaten bilden die Grundlage zur Validierung hygrothermischer Simulationsrechnungen.

Die Messung von Temperaturprofilen und die Verfolgung innerer und äußerer Gefügeveränderungen des Marmors erfolgten an Referenzproben, die auf der Schlossbrücke ausgelagert wurden. Innerhalb des kurzen Auslagerungszeitraumes konnten keine signifikanten Schädigungen an diesen Proben festgestellt werden. Die Proben sollen deshalb auch nach dem Ende des Projektes auf dem Gelände der BAM weiter bewittert und die Gefügeveränderungen langfristig dokumentiert werden.

Durch den Bau und Aufbau der Membraneinhausung an einer Skulptur auf der Schlossbrücke konnten wertvolle Erfahrungen hinsichtlich der Konstruktion und Handhabung solcher Schutzsysteme gewonnen werden. So zeigte sich, dass zu Minimierung der Gefährdung der Skulpturen in der Aufbauphase die einzelnen Elemente der Konstruktion möglichst klein und leicht sein sollten. Als zeitraubend erwies sich vor allem das Spannen der Membran. Dieses Problem soll bei künftigen Konstruktionen durch einen Faltmechanismus gelöst werden.

## 5 Literatur

- [1] Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt- und Verbraucherschutz Berlin, Bereich Umwelt; [www.berlin.de/sen/umwelt](http://www.berlin.de/sen/umwelt), 2010
- [2] Gorbushina A. ,BAM Abt. 4, interne Mitteilung
- [3] Köhler W. (1991) Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara-Marmor in Potsdam-Sanssouci. Berichte zu Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland, Steinschäden -Steinkonservierung 2:50–55
- [4] Berry J (2005) Assessing the performance of protective winter covers for outdoor marble statuary—pilot investigation. In: Verger I, Coccia Paterakis A, Chahine C, Kardes K, Eshoj B, Hackney S, de Tagle A, Cassar M, Thickett D, Villiers C, Wouters J (eds) 14th Triennial Meeting The Hague, 12–16 September 2005, Preprints. Earthscan/James & James, London, pp 879–887. ISBN 9781844072533
- [5] Blum R (2002) Projekt Winterzelt, Bericht über die Denkmaleinhausungen in Clemenswerth und Weikersheim. In: DBU Abschlussbericht (AZ 12559)
- [6] Weise, F. (2008) Feuchtemessung im Beton - eine Gegenüberstellung gängiger Verfahren. In: Ernst und Sohn Special; 2/2008 ,S.60-68
- [7] Deutscher Wetterdienst, Klimadaten Deutschland, [www.dwd.de](http://www.dwd.de), 2010
- [8] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, Digitaler Umweltatlas, Ausgabe 2001, [www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas](http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas), 2010
- [9] Siegesmund S, Ruedrich J, Koch A (2008) Marble bowing: comparative studies of three different public building facades. Environ Geol doi:10.1007/s.00254-008-1307-z

Entwicklung und Überprüfung von Einhausungssystemen für außenexponierte Marmorobjekte mit dem Ziel des langfristigen Erhalts in situ an einem national bedeutenden Objektkomplex, den Schlossbrückenfiguren Unter den Linden, Berlin



DBU Abschlussbericht 29.11.2010

Arbeitsgruppe GZG, Dr. Joerg Ruedrich und Prof. Dr. Siegfried Siegesmund

# 1 Einleitung

Ziel der Untersuchungen der Arbeitsgruppe GZG untergliederten sich in drei wesentliche Hauptthemengebiete.

1 Erfassung des Erhaltungszustandes der Marmore

2 Kenntniserweiterung über die Marmorverwitterungsprozesse von Marmoren insbesondere auch unter Frost Tau Bedingungen

3. Überprüfung der Marmorverwitterung unter eingehausten und nicht eingehausten Bedingungen

Diese Punkte dienen in enger Verknüpfung mit den jeweiligen anderen Arbeitsgruppen der Optimierung einer möglichen Einhausung. Speziell sollen die verfolgten Ziele die Grenzparameter in einer Aushausung definieren helfen, bei denen für die entsprechenden Marmore die geringste progressive Schädigung zu erwarten ist.

## 2 Quellenstudium zur Marmorverwitterung

Allgemein bekannt ist die hohe Reaktivität von Calcit und Dolomit in humiden Gebieten bezüglich lösungsschemischer und biochemischer Verwitterungsprozesse. Bei bruchfrischen Marmoren bewirken diese Korrosionsvorgänge vor allem, dass die Oberfläche von frei bewitterten Objekten in relativ kurzer Zeit aufgeraut und nach längerer Exposition von einem sichtbaren Relief überzogen wird (Mikrokarst, z.B. Grimm 1996, Grimm 1999, Simon & Sneath 1993).

Besonders in Gebieten mit verstärkter Schadstoffbelastung der Luft werden Stickoxide, Schwefeloxide und Kohlendioxid durch Regen gelöst und verursachen so die o.g. Veränderungen (Lösung/Fällung sowie durch Alteration und Korrosion mit Aufweitung des geringen Porenraums; z.B. Schwarz et al. 1991 a,b). Die Prozess-Raten der intergranularen Korrosion zeigen nicht nur Richtungsabhängigkeiten in Bezug auf die kristallographischen Orientierungen der beteiligten Grenzflächen. Weitere Einflussgrößen sind Defektdichten an der Grenzfläche und innerhalb des Realkristalls (MacInnis & Brantley 1992), die Benetzbarkeit durch Fluide (Watson & Brenan 1987) sowie deren Unter-/Übersättigung bezüglich des Festkörpers (z.B. Lasaga & Blum 1986). In verbautem Zustand unter Belastung kommt auch der Spannungskorrosion eine besondere Bedeutung zu, die also ebenfalls in Betracht gezogen werden muss.

Marmore besitzen in der Regel eine vergleichsweise dichte Kalkmatrix, die neben makroskopisch sichtbaren Spalten und Klüften zunächst nur eine oberflächliche, mikrobielle Besiedlung erlauben. Dennoch unterliegt dieses Gesteinsmaterial langfristig einem biokorrosiven Angriff z.B. von endolithischen Flechten, Cyanobakterien und Pilzen (Nimis et al. 1992, Siegesmund et al. 2005a). Im Laufe dieser mikrobiellen Korrosion bilden sich vermeintlich schützende Oxalatschichten (als Ca-Oxalat-Monohydrat - Whewellit - und Ca-Oxalat-Dihydrat - Weddelit -), die man auch als „scialbatura“ bezeichnet und deren genaue Entstehung noch weitgehend kontrovers diskutiert wird (Monte et al. 1992).

Biomechanische Schadensprozesse am Marmor werden den sog. „schwarzen“ Hefen (Dermatiaceae) nachgesagt, die durch das Eindringen Ihrer Hyphen in den Marmor zum Abplatzen von Gesteinsschuppen („chipping“) führen (Dornieden et al. 2000).

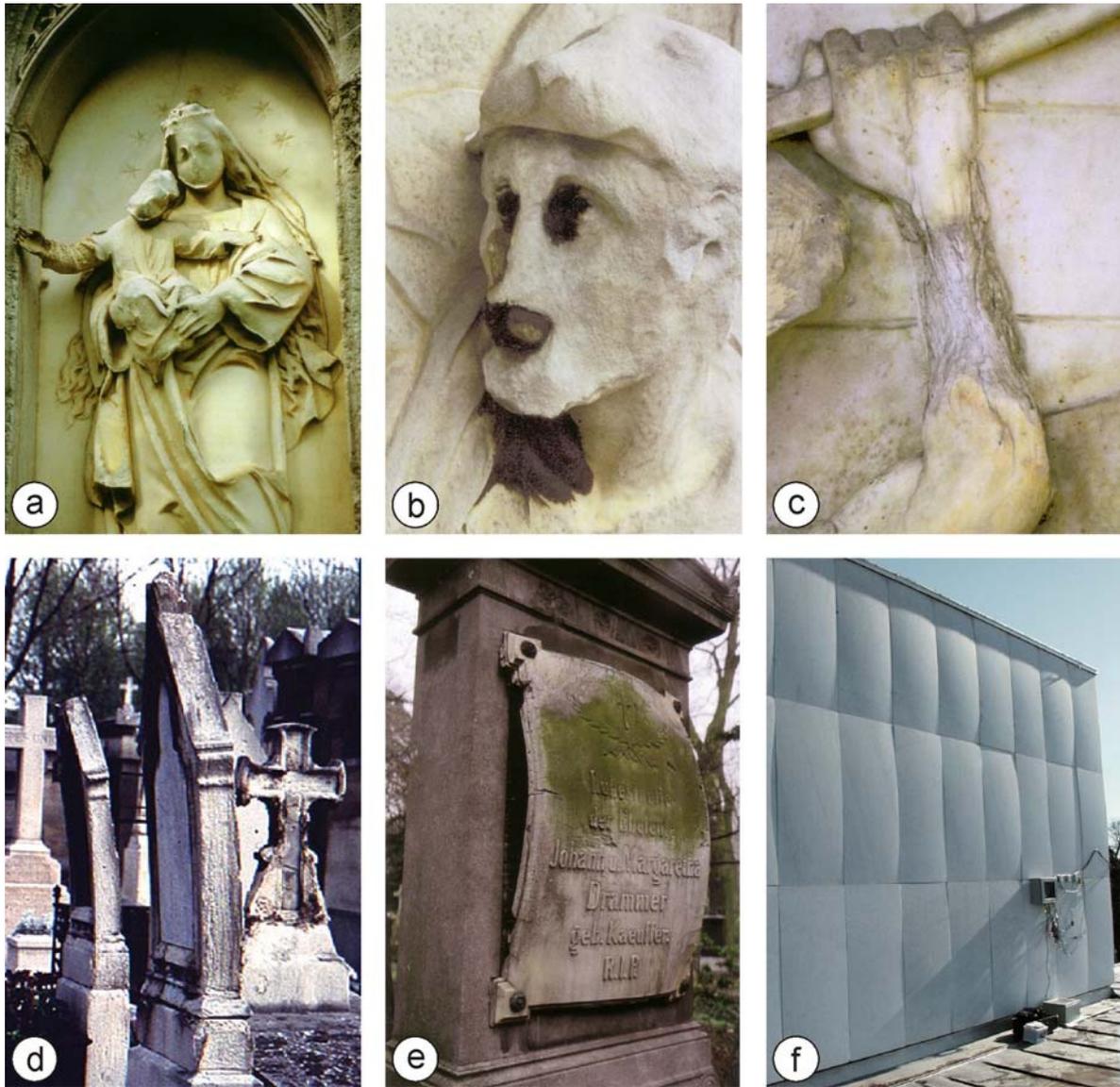


Abb. 1: Charakteristische Schadensformen der Marmorverwitterung: a) Sandiger Materialverfall mit Verlust der Kontur, b) mit zusätzlicher Ausbildung von schwarzen Gipskrusten, c) schichtparalleles Aufblättern mit ausgeprägter Makrorissbildung als Endstadium der Verwitterung, d) Verbiegung von Grabmalen, e) Aufwölbung von vorgesetzten Marmorplatten und f) konvexe Aufwölbung von Fassadenplatten (a, e aus Grimm 2005, b, c aus Ettl & Pfanner 2005 und f aus Koch 2006).

Die Auflockerung des Gefüges von kristallinen Marmoren ist vermutlich im Initialstadium physikalischer Natur (Thermospannungen, Frost-/Salzsprengung, hygri sche Dehnung, mechanische Belastung). Diese Gefügeentfestigung in Verbindung mit anisotropen Gesteinsgefügen ist weitgehend unverstanden. Grundsätzlich kann man davon ausgehen, dass den extrem anisotropen Einkristall-Eigenschaften von Calcit und untergeordnet Dolomit eine entscheidende Bedeutung zukommt (Boas & Honeycombe 1946, Evans 1978, Tvergaard & Hutchinson 1988, Fredrich & Wong 1986). So variiert der Koeffizient der thermischen Dilatation ( $\alpha$ ) von Calcit von positiven Werten ( $\alpha_{11}=26 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) parallel zur kristallographischen c-Achse bis zu negativen Werten ( $\alpha_{22}=\alpha_{33}=-6 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) parallel zu den a-Achsen (Kleber 1959). Das bedeutet, dass sich Calcitkristalle bei Erwärmung in c-Richtung dehnen und gleichzeitig in den a-Richtungen eine Kontraktion stattfindet. Durch diese Anisotropie der thermischen Dilatation können sich bei Temperaturwechseln Zug-, Druck- bzw. Scherspannungen aufbauen, die vermutlich zum Aufreißen von Korngrenzen führen (Battaglia et al. 1993, Siegesmund et al. 1997, Widhalm et al. 1996) oder

transgranulare Risse erzeugen. Über die Auswirkungen dieser Einkristallanisotropie in einem texturierten Gestein (Polykristall) liegen nur geringe Erkenntnisse vor (s. z. B. Weiss et al. 2002, 2003).

Wichtig sind somit die Orientierungsbeziehungen benachbarter Körner, Textur, Formregelung, präexistierende Mikrorisse, Geometrie der Korngrenzen und ihre Verzahnung sowie die Korngröße (Evans 1978, Fredrich & Wong 1986, Siegesmund et al. 1997; Siegesmund et al. 1999a, Siegesmund 2000, Weiss et al. 1999). Erste Modellrechnungen mittels finiter Elemente von Spannungsverteilungen auf Korngrenzen als Folge thermischer Beanspruchung haben gezeigt, dass besonders an Tripelpunkten Spannungsakkumulationen auftreten, die zu einer Nukleation von Mikrorissen führen können (Tvergaard & Hutchinson 1988). Grundlage für derartige Berechnungen sind ausnahmslos zweidimensionale Modelle, in denen hexagonale Korngeometrien angenommen werden (z.B. Tvergaard & Hutchinson 1988, Tschegg et al. 1999). Obwohl bei derartigen Modellierungen auch verschiedene textuelle Korn-zu-Korn-Beziehungen berücksichtigt wurden (z.B. Tschegg et al. 1999), geben diese Modelle aufgrund der starken Vereinfachung die Wirklichkeit nicht wieder. So kann man in natürlichen Gesteinen davon ausgehen, dass Heterogenitäten die Spannungsakkumulationen verstärken und damit eine Mikrorissausbreitung verursachen (Siegesmund et al. 2000). Weiss et al. (2002 und 2003) konnten mittels FE-Modellierungen den Nachweis der o.g. Hypothesen unzweifelhaft stützen und die Mikrorissbildung durch Thermospannungen belegen. Übrigens konnten auch im REM on-line-Beobachtungen zu thermisch-induzierten Rissweiten an Korngrenzen nachgewiesen werden.

Allerdings ist das durch Mikrorissbildung neugeschaffene Porenvolumen in Marmoren extrem gering. Ein initialer Porenraum in bruchfrischen Marmoren von meist deutlich weniger als 0,3% und innere Oberflächen von unter  $0,2\text{m}^2/\text{g}$  (Grimm 1996) ermöglichen kein pervasives Eindringen von Fluiden. Dass jedoch insbesondere bei Marmoren derart geringe Porositäten schon einen deutlichen Einfluss auf die Gefüge-Entfestigung haben, kann durch einen Vergleich zwischen kristallinen Marmoren und Graniten belegt werden (Winkler 1996). Beide Gesteinstypen haben im bruchfrischen Zustand vergleichbar niedrige Porositäten unter 1% (Poschlod 1990). Allerdings schreitet die weitere Gefügeentfestigung bei den Marmoren deutlich schneller voran. Als Grund dafür muss, neben den oben beschriebenen extremen Thermospannungen, bedingt durch die Calcitanisotropie, die erhöhte Reaktivität von Calcit gegenüber Porenwässern angenommen werden (Winkler 1996).

### *Marmorverwölbungen*

Der Verlust der Formbeständigkeit von Marmorplatten an Gebäudefassaden oder Grabmalen ist in der Literatur schon seit 1919 bekannt (Kessler 1919). Zu dieser Zeit wurde bereits festgestellt, dass wiederholtes Erwärmen von Marmor zu bleibenden Dehnungen und somit zu einer mikrostrukturellen Schädigung des Gefüges führen kann, wie es später auch in Rosenholtz & Smith (1949), Thomasen & Ewart (1984), Monk (1985), Zezza et al. (1985), Bortz et al. (1988), Sage (1988) und Wilson (1989) weiter untersucht und beschrieben wurde.

Es gibt kaum eine Ursache, die nicht für die Verbiegungen in Betracht gezogen wurde: kristallographische Eigenschaften der gesteinsbildenden Minerale des Marmors, Gefügeeigenschaften, Eigengewicht der Objekte (Schwerkraft), mechanische Einwirkungen, residuale Gebirgsspannungen nach raschem Abbau, physikalische und chemische Verwitterungseinflüsse wie Temperaturschwankungen, Feuchtwechsel, Salzsprengungen, Frost, Fluide oder biogener Befall (s. Zusammenfassung in Grimm, 1999). Logan et al. (1993) erklären die Verbiegung an dem bisher spektakulärsten Fall, dem AMOCO-Gebäude in Chicago, auf der Basis experimenteller Befunde durch die Kombination von anomaler Dehnung und Kontraktion der Calcitkristalle im Marmor und die Umlagerung residualer

Spannungen (s. auch Scheffzük et al. 2004, 2007). Andere Autoren, wie z.B. Thomasen & Ewart (1984), Monk (1985), Bortz et al. (1988) oder Winkler (1996), schreiben dagegen der Feuchtigkeit eine große Bedeutung zu.

### 3 Erhaltungszustand der Marmorskulpturen

#### 3.1 Makroskopische Schäden

Das Makrogefüge der Figurengruppen ist weitgehend vergleichbar. Es ist durch eine schwache, unregelmäßige bis geaderten Lagenbau (Foliation) gekennzeichnet, welcher auch als schwach marmoriert bezeichnet werden kann. Die Marmore sind ansonsten milchig weiß, welches ein typisches Merkmal von verwittertem Carrara Marmor darstellt. Die Marmore sind feinkörnig mit einer ungefähren Korngröße zwischen 200 µm bis 300 µm. Die makroskopischen Schäden werden vor allem durch zahlreiche Ergänzungen an filigranen Körperteilen geprägt. So sind einzelne Finger oder dünne Objektteile durch neue Marmorergänzungen ersetzt wurden oder fehlen (Abb. 2a,c).



Abb. 2 Schadensbilder der südlichen Figurengruppen: a) verschlossene Risse und Ergänzungen an filigranen Objektteilen, b) abgebrochene Elemente, c) stark entfestigtes Marmorgefüge mit Makrorissbildungen, c) Ausbrüche und komplexe Rissbildungen (Krakeleestrukturen) und e) Rissbildungen sowie Abplatzungen exponierter Bereiche.

Diese müssen aber nicht zwangsläufig auf eine starke Marmorentfestigung hinweisen, da die wechselvolle Historie der Objekte mit Abbau während des Krieges und Lagerung in Hinterhöfen zu einem mechanischen Abbrechen durch externe Kräfte geführt haben kann. Ansonsten fällt eine Oberflächenrauhigkeit der Objekte auf, welche im Wesentlichen durch chemische Rückwitterungsprozesse hervorgerufen wurden. Jedoch kann hier festgestellt werden, dass es sich um einen vorwiegend moderaten Verlust der originalen Oberfläche handelt. Tiefere Rückwitterung sowie ausgeprägte Makrorissbildungen können nur vereinzelt festgestellt werden (Abb. 2c). Ausnahme hierbei stellt die Figurengruppe dar, welche durch ausgeprägte Schäden in Form von Krakelestrukturen, Makrorisse und Ausbrüche gekennzeichnet ist (Abb. 2c,d).

### 3.2 Ultraschallanalysen zur Erfassung des Erhaltungszustandes der Marmore (AP 2.3)

Zur Erfassung des Inneren Erhaltungszustandes der Marmorskulpturen wurde die Ultraschallanalytik eingesetzt. Dieses Verfahren zeichnet sich durch die zerstörungsfreie Anwendung aus. Insbesondere für Marmor lassen sich aufgrund des großen Spektrums von Geschwindigkeiten zwischen ca. 6,5 km/s (frischer Zustand) und ca. 1,5 km/s (weitgehend zerstörter Zustand) Klassen des Erhaltungszustandes abgrenzen. Darauf basierend erstellte KÖHLER (1991) eine Schadensklassifikation mit fünf Schadensklassen (Tab. 1). Diese ist nicht auf alle Marmore vergleichend zu übertragen. Da jedoch die Untersuchungen von Köhler an Marmoren aus Carrara durchgeführt wurden, hat sich die Klassifizierung für diesen Marmortyp bewährt. Nach makroskopischen und mikroskopischen Befunden sowie historischen Informationen handelt es sich zweifelsfrei bei den untersuchten Objekten um Marmor aus der Region Carrara, womit die Schadensklassifikation hier angewandt werden kann.

Tab. 1: Schadensklassifikation auf der Basis von  $V_p$ -Daten für Marmor, aus KÖHLER (1991).

Schadensklasse	$V_p$ [km/s]	Zustand	Porosität $\Phi$ [%]
0	> 5,0 km/s	<i>frisch</i>	< 0,5
I	3,0 km/s – 5,0 km/s	<i>zunehmend porös</i>	1,3 – 0,5
II	2,0 km/s – 3,0 km/s	<i>absandend</i>	3,0 – 1,3
III	1,5 km/s – 2,0 km/s	<i>brüchig</i>	5,3 – 3,0
IV	< 1,5 km/s	<i>zerfallen</i>	> 5%.

Zur Klassifizierung des Erhaltungszustandes mittels Ultraschall wurde der Ersteinsatz von Kompressionswellen mittels einfachem Durchschallungsverfahren gemessen (BIRCH 1960, 1961). Über die Laufzeit der Welle und die Strecke wurde die Kompressionswellengeschwindigkeit ( $V_p$ ) berechnet. Für die Messungen der Ultraschallgeschwindigkeiten kamen zwei unterschiedliche Signalgeber zum Einsatz. Dabei wurden die umfangreicheren Querschnitte der Skulpturen mit einem 250 kHz Kompressionswellenschwinger über eine Flächenankopplung durchschallt. Für filigranere Elemente, wie die Gewandfalten der Skulpturen, wurde ein 350 kHz System mit Punktkopplung gewählt. Als Impulsgeber kam das System USG 30 der Firma Geotron zum Einsatz. Zum Ausgleich von Unebenheiten und zur besseren Schallübertragung wurde als

Kopplungsmittel ein spezieller Kopplungston bzw. im Falle der Punktankopplung ein Kopplungswachs verwendet.

Die Bestimmung der 2 D-Querschnittsverteilung von Ultraschallgeschwindigkeiten erfolgte durch eine tomographische Rekonstruktion mittels des Software Programms Migratom (Wellenfront-Migration; s. JACKSON & TWEETON, 1994). Die Berechnung wurde sowohl mit geraden als auch gekrümmten Strahlenverläufen durchgeführt. Jedoch sind in der vorliegenden Arbeit nur Tomogramme dargestellt deren Rekonstruktion mittels gerader Strahlen erfolgte. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da zum einen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Berechnungsverfahren festzustellen sind, zum anderen liegen auch die gemessenen Geschwindigkeitskontraste unterhalb 40 % womit nach TWEETON et al. (1992) die Berechnung mit geraden Strahlenverläufen zu akzeptablen Ergebnissen führen sollte.

Die Ultraschallgeschwindigkeiten von Marmor zeigen eine starke Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Gesteins. So können Marmore die im trockenen Zustand um 3,0 km/s aufweisen im wassergesättigten Zustand ca. 6,0 km/s erreichen (RÜDRICH 2003). Da die Marmorskulpturen auf einem aus granitoidem Sockel und einem weiteren Postament stehen sowie vor der Untersuchung über längere Zeit durch Einhausung gegenüber direkter Beregnung geschützt waren, ist von einem nur geringen Einfluss der Feuchtigkeit auf die hier gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten auszugehen.

### 3.2.1 Ergebnisse der Einzelmessungen

Einzelmessungen wurden an den Figurengruppen I und II durchgeführt, da für die Figurengruppe III genügend Informationen durch die tomographischen Analysen existieren. Umfangreiche Ultraschallanalysen an der Figurengruppe IV wurden von Dr. Robert Sobott ebenfalls im Jahre 2008 durchgeführt (s. Untersuchungsbericht Sobott). Die Figurengruppen der Nordseite wurden vergleichend zu der vorliegenden Arbeit untersucht und bewertet (s. Untersuchungsbericht Ruedrich 2008).

Die gemessenen Kompressionswellengeschwindigkeiten an der Skulpturengruppe Nike unternichtet den Jungen in Geschichte (Figurengruppe I von Emil Wolff 1847) variieren zwischen 2,2 km/s und 4,0 km/s (Abb. 3). Hierbei sind lokale Verteilungen zu ermitteln, die mit der Exponierung bzw. der Objektgeometrie in Verbindung stehen. So wurden an freien schmalen Arm-, Bein- und Flügelbereichen generell niedrige Geschwindigkeiten zwischen 2,2 km/s und 3,2 km/s gemessen. Nach der Schadensklassifikation von Köhler (Tabelle 1) wären diese Objektbereiche als zunehmend porös bis absandend einzuordnen. Niedrige Ultraschallgeschwindigkeiten treten weiterhin an besonders filigranen Partien wie Fingern und Gewandfalten des Objektes auf. Mächtigere Figurenbereiche weisen Ultraschallgeschwindigkeiten von 3,5 km/s bis 4,0 km/s auf. Damit liegen diese Partien in der Schadensklassifikation im Bereich zunehmend porös. Damit kann das Objekt generell als ausgeprägt geschädigt angesehen werden. Weiterhin lässt die Verteilung der Ultraschallgeschwindigkeiten den Schluss zu, dass die Schädigung in oberflächennahen Bereichen deutlicher vorangeschritten ist.

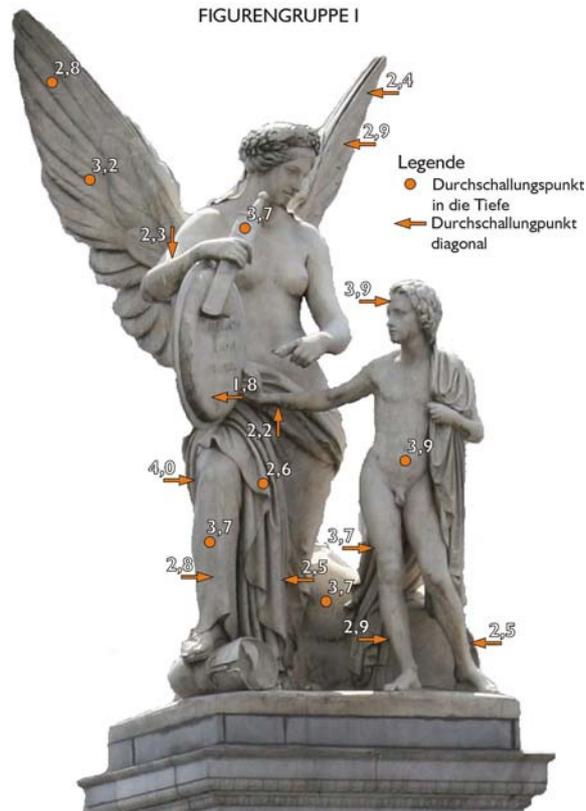


Abb. 3: Ultraschall-Einzelmessungen an der Figurengruppe I (Zahlenwerte in km/s).



Abb. 4: Ultraschall-Einzelmessungen an der Figurengruppe II (Zahlenwerte in km/s).

Die Kompressionswellengeschwindigkeiten der Skulpturengruppe „Athene unterrichtet den Jungen im Gebrauch der Waffen“ (Figurengruppe II von Hermann Schievelbein 1853), zeigen

Werte zwischen 1,7 km/s und 3,8 km/s (Abb.4). Damit sind ungefähr vergleichbare Werte zur Skulpturengruppe I festzustellen. Lediglich der Tiefstwert liegt mit 1,7 km/s niedriger. Generell ist auch die gleiche lokale Verteilung der Geschwindigkeiten zu ermitteln, die mit der Exponierung bzw. der Objektgeometrie in Verbindung steht. So zeigen schmale Arm- und Beinpartien niedrige Geschwindigkeiten zwischen 2,2 km/s und 3,2 km/s. Nach der Schadensklassifikation von Köhler (Tabelle 1) sind diese Objektbereiche als zunehmend porös bis absandend einzuordnen. Niedrige Ultraschallgeschwindigkeiten treten weiterhin an besonders filigranen Partien wie an dem Schild auf. Jedoch handelt es sich hierbei möglicherweise um ein lokales Phänomen, da an schmalen Gewandfalten auf der Rückseite des Objektes entsprechend niedrige Geschwindigkeiten nicht bestätigt werden konnten. Mächtigere Figurenbereiche weisen Ultraschallgeschwindigkeiten von 3,5 km/s bis 3,8 km/s auf. Wie die Tomographien zeigen (siehe unten) liegen die Geschwindigkeiten im Torso bei etwas höheren Werten, womit von einer mittleren Entfestigung des Objektes ausgegangen werden kann.

Die Verteilung der Geschwindigkeitswerte für die Figurengruppe II weist ebenfalls darauf hin, dass die Schädigung in äußeren Bereichen ausgeprägter ist als in zentralen Partien. Dies ist besonders gut zu erkennen, wenn die Messstrecken gegen die Geschwindigkeitswerte aufgetragen werden (Abb. 5). Hierbei sind für die beiden Figurengruppe vergleichbare Ergebnisse festzustellen. Für die Figurengruppe zwei scheinen die Geschwindigkeiten beim Vergleich von Abb. 5a und 5b niedriger zu liegen. Die Ursache hierfür ist jedoch darin begründet, dass bei der Figurengruppe 2 nur Messungen kürzeren Strecken in die Darstellung eingegangen sind. Auffällig ist weiterhin in Abb. 5, dass kurze Messstrecken sowohl mit hohen als auch niedrigen Geschwindigkeiten kommunizieren. Dies sollte auf die Exponierung der Objektpartien zurückzuführen sein. So zeigen die Daten der Figurgruppen II, dass die Werte auf der Ostseite (Abb. 4, links) höhere Werte aufweisen als auf der Westseite und damit der Seite des Hauptwitterungseinflusses.

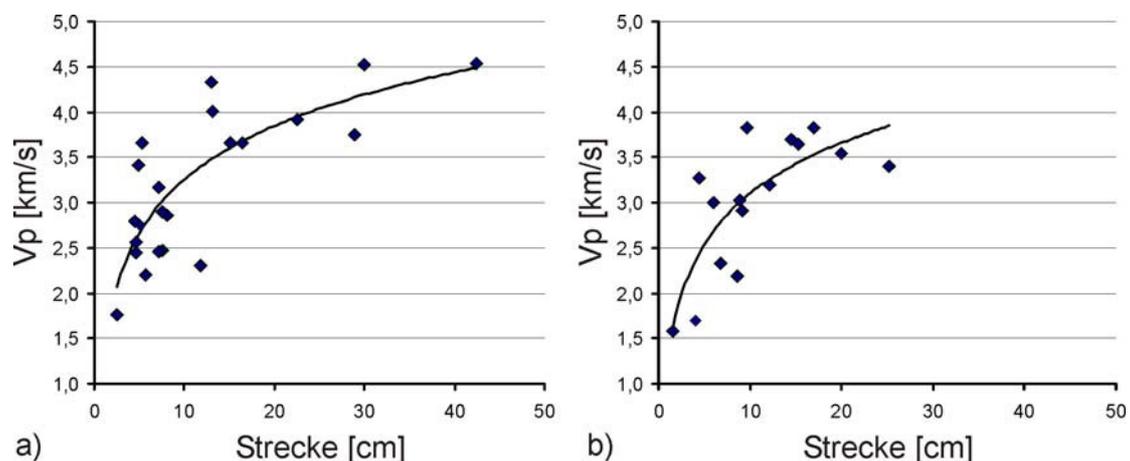


Abb. 5: Ultraschallgeschwindigkeiten der Einzelmessungen gegen die Strecke aufgetragen für a) Figurengruppe 1 und b) Figurengruppe 2. Deutlich ist für beide Objekte festzustellen, dass filigranere Elemente ausgeprägter geschädigt sind. Hingegen weisen mächtigere Objektteile höhere Geschwindigkeiten und damit eine geringere Schädigung auf.

### 3.2.2 Innere Erhaltungszustand: Ergebnisse der tomographischen Rekonstruktion

Untersuchungen mittels Ultraschalltomographie fanden an den Figurengruppen II und III statt. An der Figurengruppe II wurden zwei tomographische 2D Schnitte ermittelt. Um noch detaillierte Informationen an den mehr oder minder gleich geschädigten Objekten zu erhalten, erfolgte an der Figurengruppe III die Aufnahme von insgesamt vier tomographischen Schnitten.

Die 2D-tomographischen Rekonstruktionen eines horizontalen Schnittes der Marmorskulptur II erfolgte im Bereich des Unterschenkels des Jungen bei ca. 0,4 m oberhalb der Plintenoberkante (Abb. 6c). Dazu wurden 66 Strecken zwischen 12 ausgewählten Punkten gemessen, was zu einer komplexen Überlagerung der Strahlengänge führt (Abb. 6a). Aufgrund der örtlichen Nähe einzelner Messpunkte kommt es zum Teil zu unrealistisch hohen Geschwindigkeiten. Dies kann zum einen auf eine relativ große Ankopplungsfläche des Ultraschallsenders und -empfängers zurückgeführt werden und zum Anderen können hier auch Oberflächeneffekte die Laufzeiten beeinflussen. Daher wurden entsprechende Daten bei der tomographischen Rekonstruktion nicht berücksichtigt. Für die Messungen der Ultraschallgeschwindigkeiten kam hier das Punktmesssystem zum Einsatz.

Trotz gewisser Einschränkungen ist die mittels tomographischer Rekonstruktion erhaltene Geschwindigkeitsverteilung als vertrauensvoll einzustufen. Hierbei können für den Querschnitt durch den Unterschenkel Geschwindigkeiten zwischen 3,60 km/s und 4,15 km/s ermittelt werden (Abb. 6b). Das Verteilungsmuster zeigt dabei nach Osten hin zunehmende Geschwindigkeiten. Da das Bein des Jungen besonders witterungsexponiert ist, kann davon ausgegangen werden, dass der schlechtere Erhaltungszustand im westlichen Bereich des Unterschenkels auf die von Westen her stärker einwirkenden Witterungseinflüsse zurückzuführen ist (Abb. 6b). Der südliche Bereich des Objektes ist hingegen durch den Rest der Skulpturengruppe geschützt und auch in der Tomographie sind hier höhere Geschwindigkeiten festzustellen.

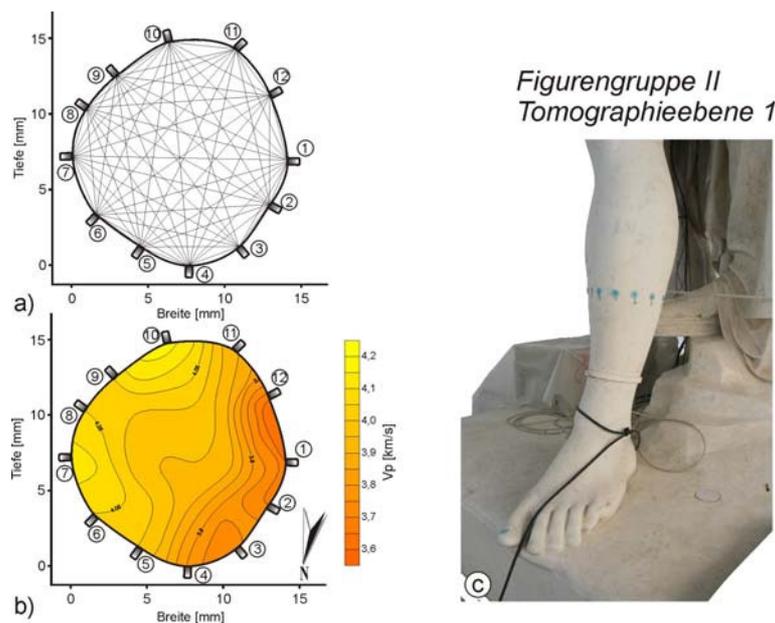


Abb. 6: Ultraschalltomographie im Unterschenkelbereich des Jungen der Figurengruppe 2: a) Messstrecken und Geometrie des Objektes, b) 2D-tomographische Rekonstruktion und c) Ausschnitt des gemessenen Skulpturenbereichs (blaue Punkte repräsentieren die Messstellen).

Ein weiterer 2D-tomographischer Schnitt wurde am Jungen der Figurengruppe II zwischen Bauch- und Brusthöhe durchgeführt (Abb. 7c). Es wurden um den Schnitt 16 Sender- und Empfängerpositionen gewählt, so dass insgesamt 120 Messstrecken erfasst wurden (Abb. 7a). Wie auch bei der Tomographie des Unterschenkels wurden kurze Strecken von benachbarten Sender-/Empfängerpositionen nicht berücksichtigt, da diese als nicht vertrauensvoll einzustufen waren.

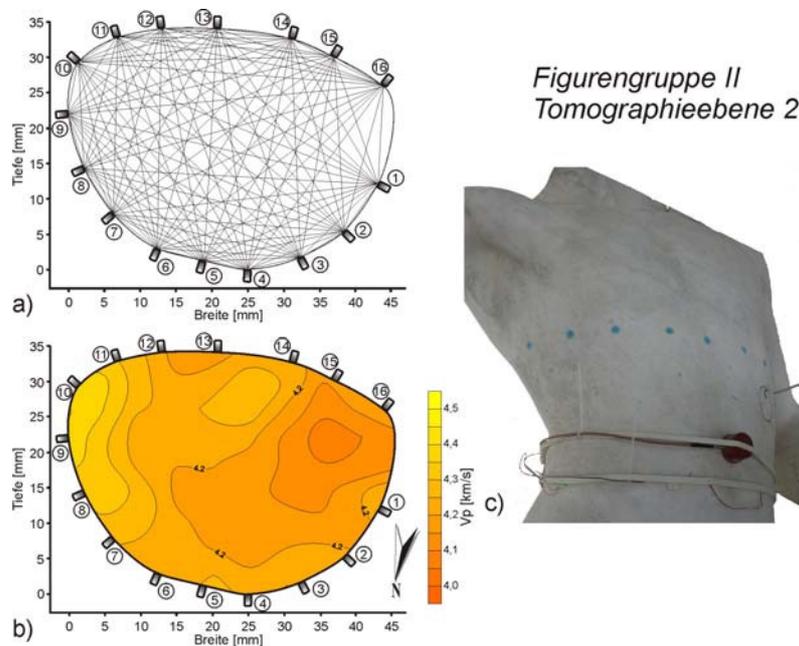


Abb. 7: Ultraschalltomographie im Brustbereich des Jungen der Figurengruppe II: a) Messstrecken und Geometrie des Objektes, b) 2D-tomographische Rekonstruktion und c) Ausschnitt des gemessenen Skulpturenbereichs (blaue Punkte repräsentieren die Messstellen).

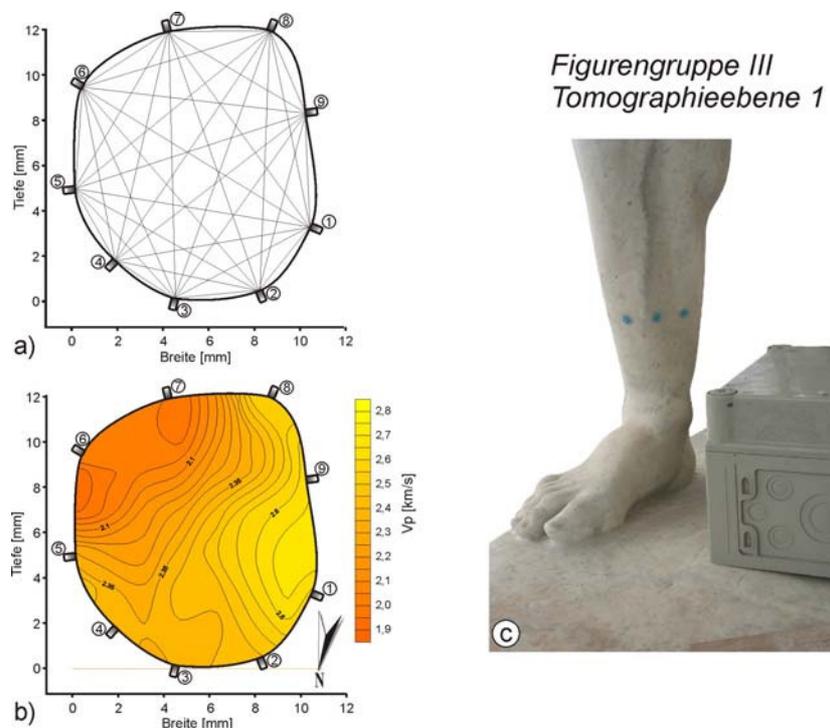


Abb. 8: Ultraschalltomographie am Unterschenkel des Kriegers der Figurengruppe III (Athene bewaffnet den Krieger von Karl Heinrich Möller 1851): a) Messstrecken und Geometrie des Objektes, b) 2D-tomographische Rekonstruktion und c) Ausschnitt des gemessenen Skulpturenbereichs (blaue Punkte repräsentieren die Messstellen).

Die 2D-tomographische Rekonstruktion zeigt Geschwindigkeiten zwischen 4,00 km/s und 4,45 km/s an. Das Geschwindigkeitsverteilungsmuster weist dabei eine Niedriggeschwindigkeitszone im südwestlichen Bereich aus. Die östliche Randzone ist hingegen durch höhere Geschwindigkeiten gekennzeichnet, was hier einen besseren Erhaltungszustand anzeigt. Das Muster der Ultraschallgeschwindigkeitsverteilung ist damit vergleichbar zur Tomographie des Unterschenkels (Abb. 6a). Auch von der Interpretation der Daten ist hier von einer verstärkten Bewitterungseinwirkung durch die Wetterseite auszugehen.

Die Tomographieebene 1 der Figurengruppe III befindet sich etwas oberhalb der Fußfessel des rechten Gliedmaßes des Kriegers (Abb. 8c). Es wurden 9 Sender-/Empfängerpositionen gewählt, womit eine Messstreckenanzahl von 36 erzielt wurde (Abb. 8a). Die Ultraschallmessungen erfolgten hier mittels Punktmessgeber/-nehmer, da zum einen der Energieeintrag dieses Messsystems ausreichend war und zum anderen auch die Messpunkte sich sehr nah beieinander befanden.

Die 2D-tomographische Rekonstruktion weist Ultraschallgeschwindigkeiten zwischen 1,95 km/ und 2,70 km/s aus (Abb. 8b). Das Muster der  $V_p$ -Verteilung zeigt hier, im Gegensatz zur Figurengruppe II, eine Niedriggeschwindigkeitszone im südöstlichen Querschnitt. Bei Betrachtung der Figurengruppe III ist auffallend, dass hier der Krieger vor der Wetterseite durch die Skulptur Athene geschützt ist. Somit kann die verstärkte Entfestigung im südöstlichen Bereich des Unterschenkels wiederum auf Exposition bzw. die lokale Einwirkung der Verwitterungsprozesse zurückgeführt werden.

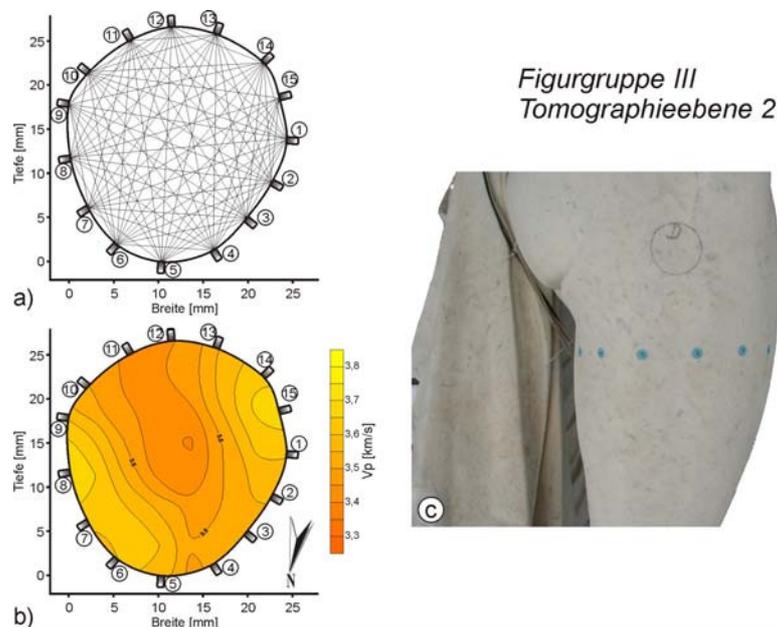


Abb. 9: Ultraschalltomographie im Oberschenkelbereich des Kriegers der Figurengruppe III: a) Messstrecken und Geometrie des Objektes, b) 2D-tomographische Rekonstruktion und c) Ausschnitt des gemessenen Skulpturenbereichs (blaue Punkte repräsentieren die Messstellen).

Der tomographische Schnitt der Ebene 2 an Figurengruppe III wurde im oberen Teil des Oberschenkels des Kriegers angelegt (Abb. 9c). Aufgrund des größeren Durchmessers dieser Schnittebene konnten 15 Sender-/Empfängerpositionen gewählt werden (Abb. 9a). Daraus resultieren 106 Messstrecken, wobei solche benachbarter Sender- und Empfängerpositionen bei der tomographischen Rekonstruktion nicht berücksichtigt wurden.

Die Ultraschallgeschwindigkeiten der tomographischen Auswertung befinden sich zwischen 3,40 km/s und 3,70 km/s (Abb. 9b). Damit ergibt sich ein recht homogenes Entfestigungsbild. Zwar zeichnet das  $V_p$ -Verteilungsmuster einen Niedriggeschwindigkeitskanal nach, welcher von südöstlicher in nordwestliche Richtung verläuft. Jedoch handelt es sich hierbei nur um Geschwindigkeitsdifferenzen von knapp 0,3 km/s. Solche Unterschiede können allein durch Anisotropien, sei es durch eine kristallographische Vorzugsorientierung oder ein richtungsabhängiges Mikrorisswachstum bedingt durch eine Kornformregelung, hervorgerufen werden.

Die Tomographieebene 3 der Figurengruppe III befindet sich im oberen Bauchbereich (Abb. 10c). Es wurden 15 Sender-/Empfängerpositionen gewählt, womit eine Strahlendichte von ebenfalls 106 Messstrecken erreicht werden konnte (Abb. 10a). In der Regel wurden auch bei dieser tomographischen Rekonstruktion Messstrecken benachbarter Sender-/Empfängerpositionen nicht eingerechnet.

Die 2D-tomographische Rekonstruktion der Schnittebene III weist maximale Geschwindigkeiten um 4,35 km/s und minimale um 3,85 km/s auf. Die Geschwindigkeitsdifferenzen sind zwar hier mit 0,50 km/s höher als für die Tomographieebene II aber zeichnen trotzdem nur geringe Unterschiede nach. Das Muster Geschwindigkeitsverteilung zeigt eine komplexere Niedriggeschwindigkeitszone in der östlich gelegenen Schnitthälfte.

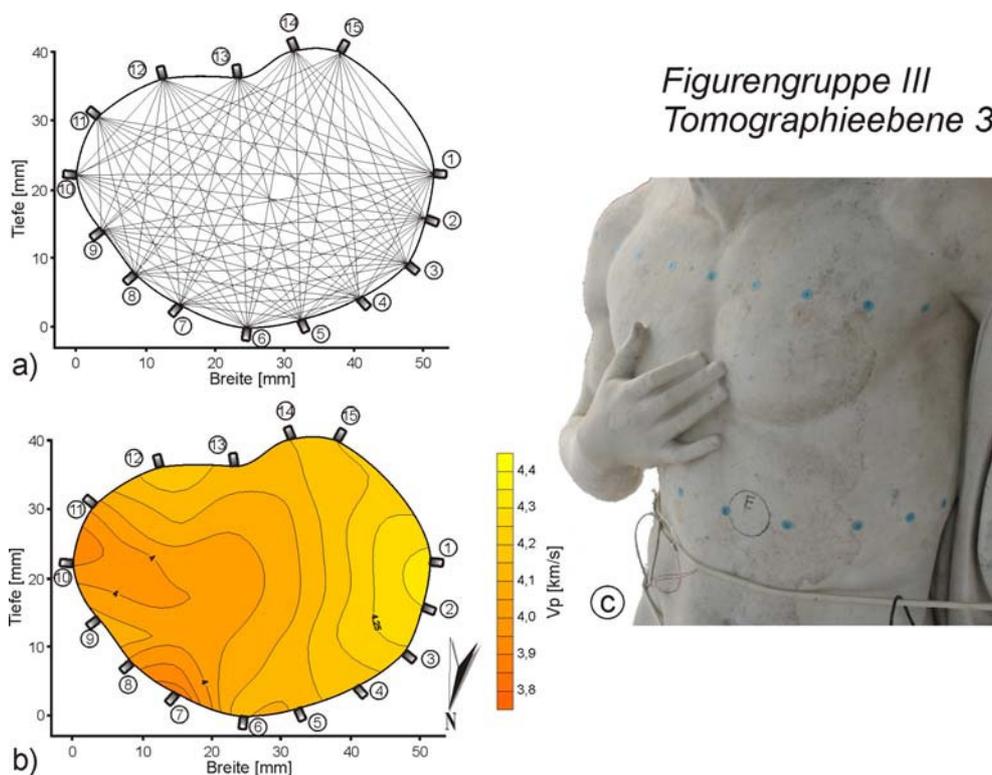


Abb. 10: Ultraschalltomographie im oberen Bauchbereich des Kriegers der Figurengruppe III: a) Messstrecken und Geometrie des Objektes, b) 2D-tomographische Rekonstruktion und c) Ausschnitt des gemessenen Skulpturenbereichs (blaue Punkte repräsentieren die Messstellen).

Die 4 Tomographieebene an der Figurengruppe III befindet sich zwischen Brust und Schulterbereich des Kriegers (Abb. 11c). Es wurden insgesamt 19 Sender-/Empfängerpositionen gewählt, womit eine Durchschallung anhand von 171 Messstrecken erfolgen konnte.

Die 2D-tomographische Rekonstruktion zeigt hier mit 3,30 km/s bis 3,90 km/s deutlich niedrigere Werte im Vergleich zur Tomographieebene 3. Diese generell niedrigeren Geschwindigkeiten können darauf zurückgeführt werden, dass die gemessene Ebene stärker der Bewitterung ausgesetzt sein sollte, da sie sich oberflächennah befindet. Die Geschwindigkeitsverteilung zeigt eine Niedriggeschwindigkeitszone in der östlichen Hälfte des Querschnittes. Im westlichen Bereich sind deutlich höhere Geschwindigkeiten festzustellen. Das generelle Muster entspricht der Witterungsexponierung, da die westlichen Teile des Kriegers durch die Skulptur Athene geschützt sind.

Allerdings ist der Anstieg der Geschwindigkeiten im Westbereich den messtechnischen Möglichkeiten geschuldet, da es in diesen Bereichen nicht möglich war ausreichend Sender bzw. Empfänger zu positionieren. Resultierend ist die Strahlenüberlagerungsdichte in der westlichen Schnittebene nur gering, womit in der tomographischen Rekonstruktion Artefakte entstehen können. Jedoch ist das generelle Muster der Geschwindigkeitsverteilung vertrauensvoll.

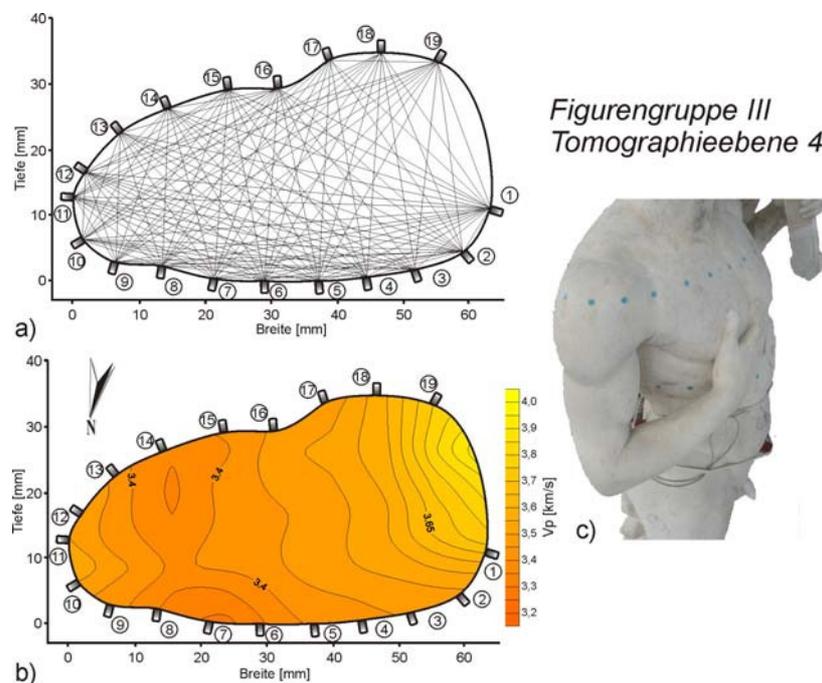


Abb. 11: Ultraschalltomographie im Brustbereich des Kriegers der Figurengruppe III: a) Messstrecken und Geometrie des Objektes, b) 2D-tomographische Rekonstruktion und c) Ausschnitt des gemessenen Skulpturenbereichs (blaue Punkte repräsentieren die Messstellen).

Im Rahmen einer Erfassung der Standsicherheit der Figurengruppe „Nike bekränzt den Sieger von Friedrich 1853“ (Figurengruppe 4) wurden drei Carrara Referenzmarmore in unterschiedlichen Erhaltungszuständen hinsichtlich ihrer Ultraschallgeschwindigkeiten und ihrer Druck- und Biegezugfestigkeiten untersucht (s. Bericht Standsicherheit Rüdrieh 2008). Die Untersuchungen dienten den vor Ort zu messenden Ultraschallgeschwindigkeiten tatsächliche Festigkeitswerte zuzuweisen und somit Aussagen über die Standsicherheit der Figurengruppen zu ermöglichen. Da nach bisherigen Erkenntnissen die verschiedenen Skulpturengruppen aus (zumindest hinsichtlich der durch die Verwitterung angelegten Rissdichten) ähnlichen Carrara Marmoren erstellt wurden, können die im Labor ermittelten Festigkeitswerte auch auf die anderen Figuren übertragen werden.

Als Beispiel soll hier die Tomographieebene 1 am rechten Unterschenkel des Kriegers der Figurengruppe III dienen (Abb. 8). An solch schmalen Objektpartien können stark herabgesetzte Ultraschallgeschwindigkeiten festgestellt werden. In diesem Beispiel liegen die

Vp-Werte zwischen ca. 1,95 km/s und 2,70 km/s. Diesen Geschwindigkeiten können Druckfestigkeiten von ungefähr 60 MPa bis 90 MPa und Biegezugfestigkeiten von 4 MPa bis 8 MPa zugeordnet werden. Somit kann ein Statiker bei Einberechnung der max. Windlast und bei Berücksichtigung der dreifachen Sicherheit Aussagen über die Standsicherheit der Figurengruppe geben.

### 3.3 Probenentnahme

Grundsätzliche Voraussetzung für die Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung, die gefügekundlichen und gesteintechnischen Eigenschaften sowie für die Einordnung und Interpretation des Erhaltungszustandes der Marmorskulpturen ist die Untersuchung von Originalmaterial. Die Daten dienen zum einen zur generellen Bestimmung der oben genannten Eigenschaften und Parameter sowie der für das Projekt wichtigen Bestimmung von entsprechendem Referenzmaterial. Ein vergleichbares Referenzmaterial war von entscheidender Bedeutung, zum einen um weiterführende Materialanalysen durchzuführen und zum anderen auch um die geplanten Verwitterungsdummys an den Schlossbrückenfiguren installieren zu können.

Dazu wurde eine Probenentnahmekampagne im Januar 2007 durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden dazu nach makroskopischen Gesteinsbefunden und Ultraschallanalysen (s. oben) zwei Figuren ausgewählt an denen folgend die Proben entnommen wurden. Die weiteren Untersuchungen hinsichtlich des Klimas und des Feuchtehaushaltes der Figuren sollen im Folgenden auf diese Objekte fokussieren. Wesentliche Anforderung für die Auswahl war die Vergleichbarkeit der Figurengruppen hinsichtlich des Gesteinsgefüges, des Erhaltungszustandes und der ungefähren Objektgeometrie um vergleichbare Daten für die jeweils einzuhausende und die nicht einzuhausende Figur zu erlangen. Ausgewählt wurden die zwei mittleren Figuren des südlichen Figurenensembles.

Die Probenentnahme erfolgte im nicht profilierten Bereich der Plinte der beiden mittleren Figurengruppen. Es wurden aus den Figuren jeweils 2 Bohrkerne mit einem Durchmesser von 40 mm und einer Länge zwischen ca. 80 mm und 100 mm entnommen. Die vorhandenen Bohrlöcher wurden nur temporär geschlossen um die Möglichkeit offen zu lassen, Messsonden einzubringen um den Feuchtehaushalt des Marmor auch in der Plinte bestimmen zu können. Weiterhin könnten so auch nützliche Daten über den Wärmeleitfähigkeitsgradienten durch Messungen im Tiefenprofil erzielt werden.

## 4 Eigenschaften der Marmore und Auswahl eines geeigneten Referenzmaterials (AP 2.2)

### 4.1 Gefügeeigenschaften

Bei den Gesteinen der untersuchten Skulpturen handelt es sich um weitgehend reine Calcit-Marmore des Typs Carrara. Das Gefüge ist als granoblastisch zu beschreiben mit einer mittleren Korngröße von ca. 200 µm. Nur vereinzelt kommen in Lagen feinkörnigere Partien vor, die darüber hinaus polymineralische Zusammensetzung aufweisen.

Der Großteil des Gesteinsgefüges wird von mehr oder minder polygonalen Calcit-Kristallen mit geraden bis geschwungenen Korngrenzen gebildet (Abb. 12 a,b). Sie weisen nur selten Zwillingsbildung und vereinzelt undulöse Auslöschung auf. Dies spricht für einen statischen Rekristallisationsprozess als Hauptgesteinsbildenden Mechanismus. Untergeordnet treten buchtige Korngrenzen und Kleinkornbildungen auf, welche einen Hinweis auf eine späte aber nur sehr schwach ausgeprägte Überprägung des Marmorgefüges durch einen dynamischen

Rekristallisationsprozess sind. Eine Kornformregelung ist bei den untersuchten Proben nur schwach ausgebildet.

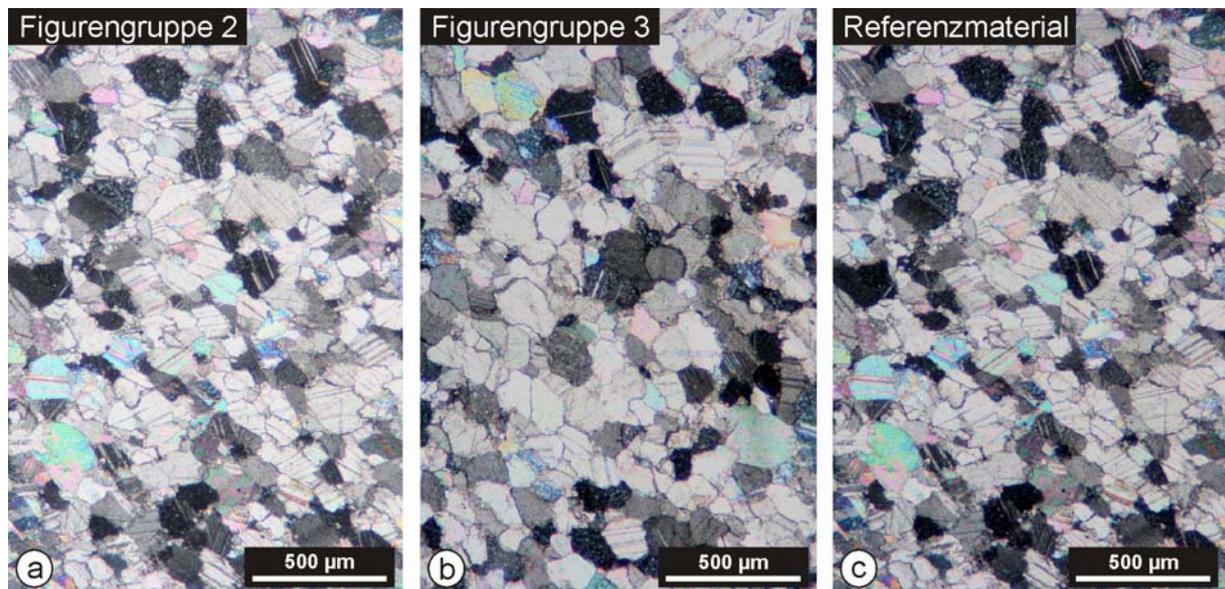


Abb. 12: Mikrogefüge der untersuchten Marmore: a) repräsentieren die original Gefüge von Figurengruppe 2 und 3 und c) des Referenzmaterials. Es handelt sich um gleichkörnige granoblastische Marmorgefüge mit leicht geschwungenen bis geraden Korngrenzen und einer mittleren Korngröße von um die 200 µm.

In den feinkörnigen Lagen sind hingegen zahlreiche Einschlüsse und Fremdminerale zu beobachten. Aufgrund der z.T. ausgeprägten Feinkörnigkeit (unter 10 µm) sind diese in meisten Fällen nicht mit dem Mikroskop zu bestimmen. Es sollte sich jedoch um Graphit oder organisches Material handeln. Pyrit, welcher häufiger in Marmoren vorkommt konnte nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden. Neben Calcit scheint auch ein größerer Anteil an Dolomit in den feinkörnigen Lagen aufzutreten. Dies ist ein bekanntes Phänomen der Carrara Marmore. Die feinkörnigen Lagen bilden dabei die makroskopisch zu erkennende dunkle Marmorierung.

## 4.2 Referenzmaterial

Für die Bestimmung des Referenzmarmors wurden verschiedene Carrara-Marmortypen untersucht. Die Wahl fiel aufgrund von mineralogischen, gefügekundlichen und gesteintechnischen Eigenschaften auf den Typ Carrara Gioia. Es wurden aus diesem Material 12 Proben (200 x 400 x 120 mm Prismen) aus einem Großblock gewonnen.

Der Marmor weist eine leicht durchschimmernde weiße Farbe mit dunkelgrauer unregelmäßiger Äderung auf (Marmorierung). Das Korngefüge ist granoblastisch mit polygonalen Körnern die ebene bis leicht geschwungene Korngrenzen aufweisen. Die Korngröße ist ebenfalls mit ca. 190 µm vergleichbar zu den untersuchten Proben der Schlossbrückenfiguren (s. Abb. 12c). Ebenfalls beinhaltet dieser Marmortyp in den dunklen Lagen eine feinkörnige Verwachsung von Calcit und vermutlich Dolomit. Neben feinsten Fluideinschlüssen sollte hier die dunkle Farbgebung durch Graphit oder organische Fremdeinschlüsse hervorgerufen werden.

Um dieses Referenzmaterial in einen vergleichbaren Erhaltungszustand zu den Skulpturen zu versetzen, wurden Proben des Marmors thermischen und thermohygrischen

Beanspruchungszyklen unterworfen. Nach jedem Beanspruchungszyklus wurde der Erhaltungszustand mittels Ultraschallanalytik überprüft. Aus technischen Gründen wurden dazu die Prismen halbiert, so dass die alterierten Objekte eine Größe von 200 x 200 x 120 mm aufweisen. Diese Dimension wurde auch für die Dummies, welche vor Ort auf der Schlossbrücke installiert werden, als optimal angesehen.

Die Ultraschallmessungen an den ausgewählten Figurengruppen ergaben Geschwindigkeiten zwischen 2,2 km/s (stark entfestigt) und 4,9 km/s (schwach entfestigt). Um in den folgenden Laboruntersuchungen die Extrema, positiv wie negativ, erfassen zu können, wurde eine Probencharge auf Vp-Werte von ca. 3,0 km/s und die andere auf ca. 4,5 km/s alteriert um die vor Ort Bedingungen wiederzuspiegeln (Abb. 13). Für die initiale Schädigung wurden die Proben auf 150 °C erhitzt, womit sich ausreichend Risse gebildet haben. Im Folgenden wurden die Proben zu erst über 24 h im Wasser gelagert und folgend bei 150 °C thermohygrisch alteriert. Um den relativ guten Erhaltungszustand zu erreichen, waren lediglich zwei thermohygrische Schädigungszyklen notwendig. Hingegen konnten die niedrigen Vp-Werte und damit der schlechtere Erhaltungszustand nur mit mehr als 10 thermohygrischen Alterationszyklen erreicht werden.

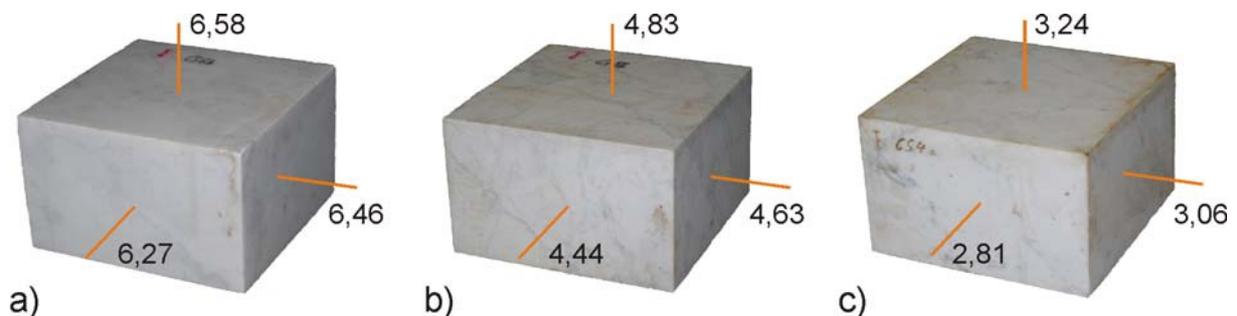


Abb. 12: Durch thermohygrische Alteration erzeugte Referenzmaterialien: a) bruchfrische b) schwach alterierte und c) stark alterierte Marmorprobe. Die Zahlenwerte geben die Kompressionswellengeschwindigkeiten in km/s an.

### 4.3 Gefügequantifizierung

Grundlegende Voraussetzung für die Interpretation von Gesteinsverwitterungsprozessen ist die fundierte Zustandsbeschreibung der petrographischen und gefügekundlichen Kenngrößen des Naturwerksteins. Hierzu stellen herkömmliche mikroskopische Analyseverfahren immer noch unverzichtbare Hilfsmittel dar, deren Vorteil in der einfachen Durchführbarkeit liegt. Zur quantitativen Erfassung der Kornparameter wurden bildanalytische Verfahren eingesetzt. Die mikroskopischen und submikroskopischen Untersuchungen wurden an polierten Standarddünnschliffen, mit einer Raumlage entsprechend dem Koordinatensystem parallel zur XY-, XZ- und YZ-Ebene, durchgeführt (s. Abb. 14).

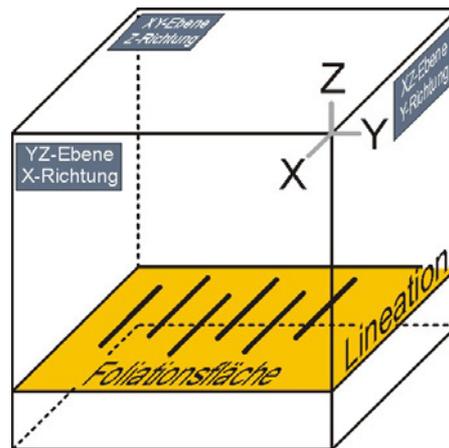


Abb. 14: Referenz-Koordinatensystem in Bezug auf die makroskopischen Elemente der Foliation und Lineation.

Die Untersuchungen wurden an Bohrkernen aus der Plinte der Figurengruppen 2 und 3 durchgeführt. Diese beiden Figurengruppen wurden ausgewählt für die exemplarischen Einhausungen, womit die gesamten Untersuchungen auf diese fokussieren. Wie alle Plastiken der Schlossbrücke sind auch die Skulpturengruppen 2 und 3 aus Carrara Marmor gefertigt. Die Herkunft des Carrara Marmor sind die Apuanischen Alpen (Alpi Apuane) Italiens (Toskana), zwischen Genua und Pisa nur wenige Kilometer im Hinterland der italienischen Riviera. Hinter dem Handelsnamen Carrara verbergen sich dabei zahlreiche Varietäten dieses Gesteins, die in verschiedenen Steinbrüchen gewonnen werden und sich anhand ihrer Prägung sowie ihrer Gefügemerkmale unterscheiden. Geologisch betrachtet befinden sich die Marmore im unteren Teil der Apenninen Decken, eines metamorphen Komplexes, welcher in Form eines tektonischen Fensters aufgeschlossen ist (CARMINGNANI et al., 1978). Die Überprägung der Marmore ist auf zwei syn-metamorphe Deformationsphasen während der alpinen Gebirgsbildung zurückzuführen (CARMINGNANI, 1990).

Das untersuchte Bohrkernmaterial ist makroskopisch durch ein hellweißes Erscheinungsbild mit vereinzelt unregelmäßig schlierenartigem Auftreten von dunkelgrauen Bändern (Marmorierung) gekennzeichnet (Abb. 13). Aufgrund ihrer äußeren Merkmale sind die Marmore in etwa der Handelsbezeichnung Bianco Carrara C zuzuordnen (vgl. ERTAG, 1980). Die unverwitterte Probe, welche in diesem Forschungsprojekt als Referenzmaterial dient, weist eine vergleichbare Gesteinsausprägung auf und kann somit ebenfalls dem Bianco Carrara C zugeordnet werden.

Mittels Bildanalyse wurde eine Quantifizierung der wesentlichen Parameter des Korngefüges durchgeführt (Kornformregelung, Korngrenzenkonfiguration, Korngrößenverteilung). Aus den Formregelungen können bereits Abschätzungen des Materialverhaltens abgegeben werden, da die Kristallgrenzen mechanische und strukturelle Diskontinuitäten darstellen. Die Untersuchungen wurden an drei senkrecht zueinander liegenden Dünnschliffen, entsprechend dem Koordinatensystem parallel zur XY-, XZ- und YZ-Ebene, durchgeführt (Abb. 14). Die Proben wurden aus den Bohrkernen der Entnahmekampagne vom Herbst 2007 entnommen (s. oben).

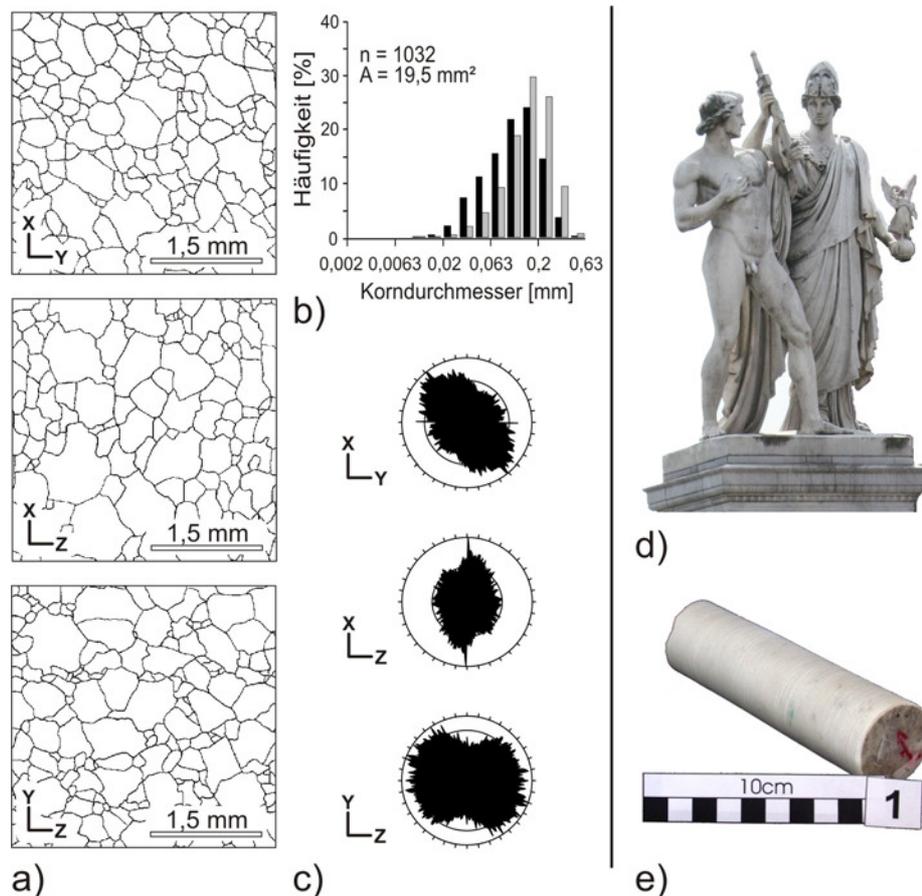


Abb. 15: Quantitative Gefügedaten des Marmors der Skulpturengruppe 3 Bohrkern I; a) Korngefüge, b) Korngrößenverteilung, dargestellt als Flächenparameter ( $n$  = Anzahl und  $A$  = Gesamtfläche der analysierten Körner) und c) bevorzugte Orientierung der Korngrenzen.

Aufgrund des häufigen Auftretens von Zwillingsbildung und Spaltflächen ist bei Marmoren eine vollautomatische Bildanalyse mit herkömmlichen Techniken nicht möglich, da die existierenden Programme nicht zwischen Korngrenze und Zwillings- oder Spaltflächengrenze unterscheiden können. Darauf beruhend erfolgte in dieser Arbeit eine „halbautomatische Bildanalyse“ (vgl. POSCHLOD, 1989). Dazu wurden die einzelnen Körner nachgezeichnet, digitalisiert und im Folgenden mit Hilfe des Analyseprogramms DIANA quantitativ ausgewertet. Für weitere Details dieses Verfahrens und des verwendeten Auswerteprogramms s. DUYSER (1991).

Im mikroskopischen Skalenbereich weist der Carrara Marmor ein charakteristisch granoblastisches Korngefüge auf, welches eine statische Rekristallisation als wesentlichen gefügebildenden Prozess anzeigt. Dabei können zwei verschiedenartige Gefügebereiche voneinander abgegrenzt werden. Dies ist eine relativ homogene Matrix, welche die makroskopisch hellweißen Bereiche darstellt und lagenartig bis fleckenhaft lokal auftretende sehr feinkörnige Domänen, welche die dunkleren Partien des Gesteins repräsentieren. Letztere zeigen Verwachsungen von Dolomit/Calcit und unterscheiden sich damit auch mineralogisch von der Matrix die fast ausschließlich von Calcit gebildet wird.

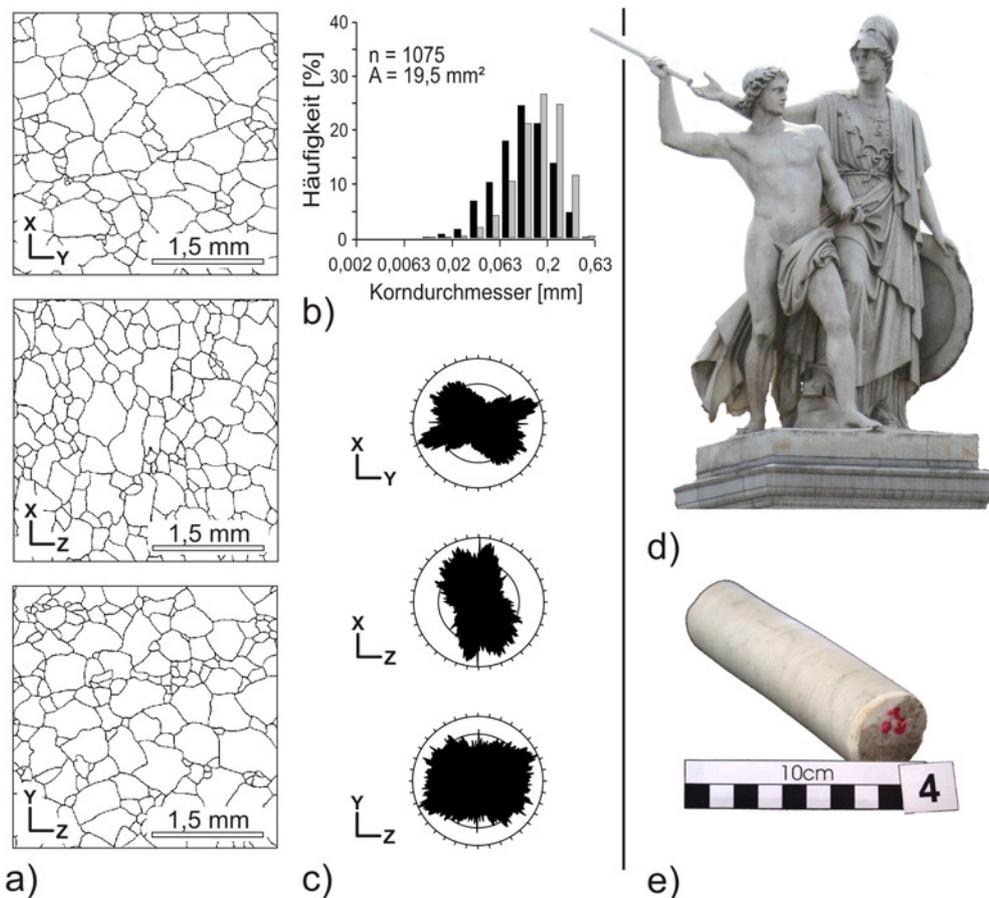


Abb. 16: Quantitative Gefügedaten des Marmors der Skulpturengruppe 2 Bohrkern 4; a) Korngefüge, b) Korngrößenverteilung, dargestellt als Flächenparameter ( $n$  = Anzahl und  $A$  = Gesamtfläche der analysierten Körner) und c) bevorzugte Orientierung der Korngrenzen.

Das Korngefüge der homogenen Matrix repräsentiert ein equigranulares Kornaggregat mit vorwiegend polygonalen Kornformen (Abb.15). Die mittlere Korngröße liegt für die untersuchten Proben zwischen ca.  $150\ \mu\text{m}$  und  $180\ \mu\text{m}$ . Die Ausbildung der Korngrenzen ist gerade bis leicht geschwungen. In Teilbereichen ist das Korngefüge durch vollständig equilibrierte Korngrenzen („foam structure“) gekennzeichnet, welches einen Erholungsprozess durch Korngrenzen/flächen Reduktionsprozesse anzeigt (vgl. PASSCHIER & TROUW, 1996). Nur lokal können auch buchtige Korngrenzengeometrien beobachtet werden. Auffällig ist eine relativ seltene Ausbildung von Zwillingen.

Für die untersuchten Proben aus Carrara Marmor ist eine deutliche Kornformregelung festzustellen. Für den Marmor der Figurengruppe II sind ausgeprägte Kornformregelungen in der XY- und XZ-Ebene festzustellen (Abb. 16). Dies gilt ebenfalls für den Marmor der Figurengruppe III. Für den herangezogenen Referenzmarmor ist die Kornformregelung deutlich in der XY- und der YZ-Ebene ausgebildet (Abb. 17).

Aus den ermittelten Kornformen bzw. des Korngefüges lassen sich entsprechende Diskontinuitäten ableiten die Schwachstellen bei der Verwitterung des Materials darstellen. So können aufgrund der polygonalen Kornformen und der geringen Kornverzahnungen die Korngrenzen als wesentliche Schwächezonen detektiert werden, welche bei Bewitterung insbesondere durch thermische und thermohygrische Beanspruchungen in Form von Mikrorissbildungen geöffnet werden. Da der Verwitterungsprozess von Marmoren gesteinsdurchdringen erfolgt sind in der Regel bei den vorliegenden Gefügetypen im Fall der Entfestigung des Gesteins quasi alle Korngrenzen geöffnet. Dies kann besonders gut durch Rasterelektronenmikroskopische Analysen erfasst werden (Abb. 18).

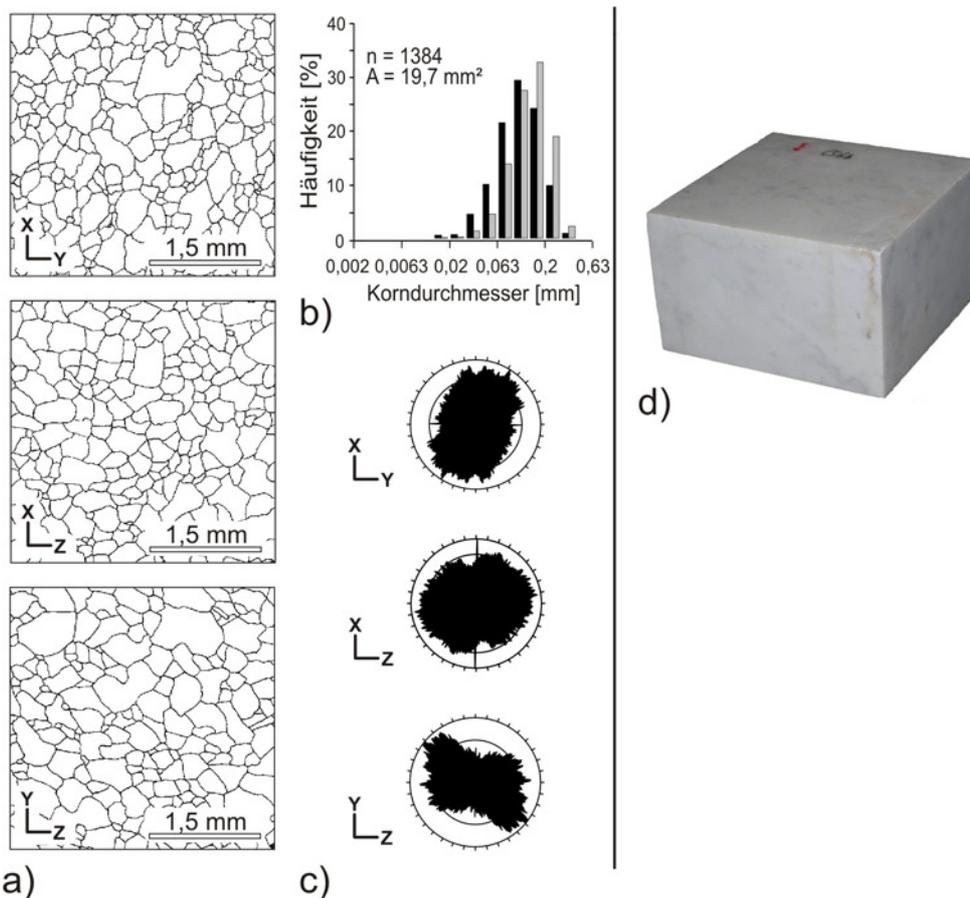


Abb. 17: Quantitative Gefügedaten des Marmors welcher als Referenzmaterial Verwendung fand; a) Korngefüge, b) Korngrößenverteilung, dargestellt als Flächenparameter ( $n$  = Anzahl und  $A$  = Gesamtfläche der analysierten Körner) und c) bevorzugte Orientierung der Korngrenzen.

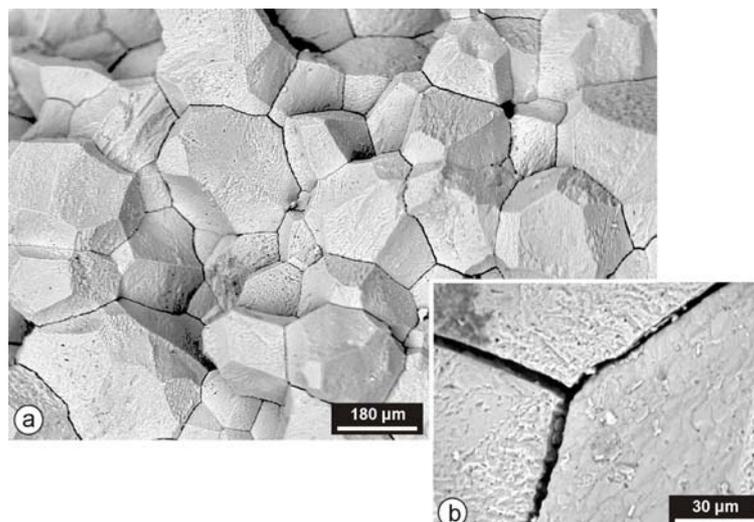


Abb. 18: Korngefüge eines an Korngrenzen entfestigten Carrara Marmors im Rasterelektronenmikroskop: a) Übersichtsbild zeigt das quasi alle Korngrenzen der Calcit-Kristalle durch Mikrorisse geöffnet sind und b) Mikrorisse entlang von Korngrenzen wobei hier Öffnungsweite dieser sogenannten Plattenspalt-poren von hier ca. 2 µm eingemessen werden können (Fraktographie REM).

Die Marmore der Skulpturengruppen 2 und 3 weisen nach den quantifizierten Gefügedaten eine mittlere Korngröße von ca. 180  $\mu\text{m}$  auf (Abb. 15b und 16b). Bei der anzunehmenden, und auch durch die Ultraschallmessungen nachzuweisenden, gesteindurchdringenden Gefügeentfestigung sollte vereinfacht gesehen in einem bestimmten Abstand ein Mikroriss im Gefüge auftreten. D.h. wenn eine Traverse den Marmor durchstechen würde, sollte statistisch gesehen jede 180  $\mu\text{m}$  ein Mikroriss vorhanden sein. Diese Kenntnis ist von besonderer Bedeutung für die in diesem Projekt durchgeführten Verwitterungssimulationen im Labor mittels Dehnungsmessungen. Die nach einer Beanspruchung auftretende permanente Längenänderung stellt ein Maß der Gesamtheit der Rissweiten dar. Rein statistisch betrachtet kann die Gesamtrestdehnung durch die Anzahl der Risse geteilt werden um die ungefähre Weitung eines einzelnen Risses für die jeweilige Beanspruchung zu ermitteln.

## 4.4 Eigenschaften der geschädigten Marmore

### 4.4.1 Porenraumeigenschaften

An den entnommenen Bohrkernen wurden weiterhin die Porenraumeigenschaften des Materials mittels hydrostatischer Wägung, als auch mit Hilfe der Quecksilberporosimetrie bestimmt. Die Originalproben weisen eine Porosität von ca. 0,5 Vol.-% auf. Dies repräsentiert im Gegensatz zu einem frischen Marmor, der in der Regel unterhalb von 0,2 Vol.-% liegt, schon eine deutliche Zunahme des Porenraums. Das Porenradienspektrum weist für beide Proben eine ungleichporig bimodale Verteilung auf (Abb. 19). Das Hauptmaximum befindet sich jeweils knapp unterhalb von 0,01  $\mu\text{m}$  und damit im Bereich von Mikroporen die keine oder nur schwache kapillare Aktivität aufweisen sollten. Hingegen ist das zweite Submaximum bei über 0,1  $\mu\text{m}$  und damit im Bereich der kapillaren Saugkraft. Dies bedeutet, dass bei zunehmender Entfestigung die kapillare Wasseraufnahme zunehmen sollte und die Marmore verstärkt der chemischen Lösung auch an den Inneren Oberflächen unterworfen sein sollten.

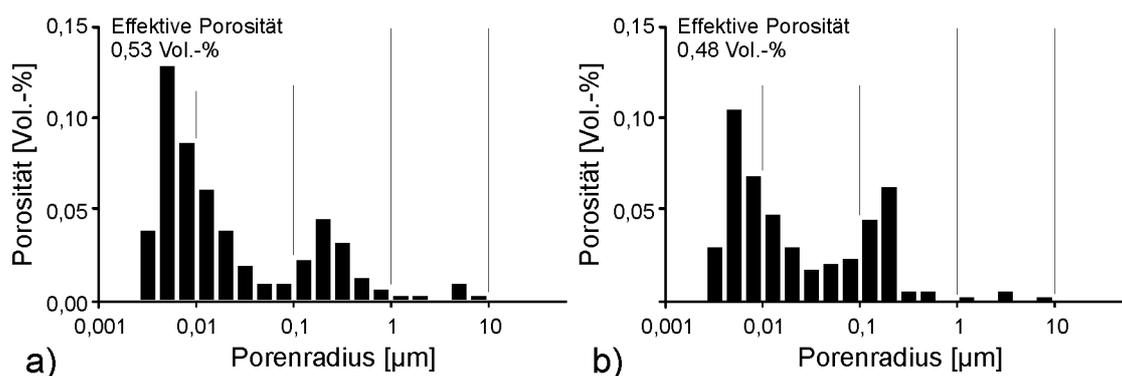


Abb. 19: Porenradienspektrum und zugehörige effektive Porosität der Proben aus a) Figurengruppe 2 und b) Figurengruppe 3.

### 4.4.2 Ultraschalleigenschaften der Bohrkern

Um weitere Informationen über den Erhaltungszustand der Marmorskulpturen zu erhalten, wurden an den Bohrkernen Ultraschallanalysen durchgeführt. Dazu kamen Kompressionswellenschwinger mit Punktankopplung zum Einsatz. Die Anregungsfrequenz betrug 350 kHz. Zur Berücksichtigung der Anisotropie erfolgten die Untersuchungen in zwei Raumrichtungen senkrecht zur Bohrkernlängsachse. Um die Entfestigung im Tiefenprofil der

Plinte zu ermitteln, wurden die Messpunkte im oberflächennahen Bereich alle 5 mm im tieferen Bereich alle 20 mm entlang des Bohrkerns angesetzt (Abb. 21).

Die Messungen im Tiefenprofil ergeben Ultraschallgeschwindigkeiten zwischen 3,25 km/s und 4,50 km/s. Im Mittel bedeutet dies ca. 3,90 km/s was nach Köhler 1991 als eine mittlere Entfestigung „zunehmend porös“ für einen Marmor angesehen werden kann (Tab. 1). Um zu überprüfen, welche Ultraschallgeschwindigkeiten in die verschiedenen Richtungen das Ausgangsmaterial besaß, wurden die Bohrkerns auch im wassergesättigten Zustand gemessen. Die Ultraschallgeschwindigkeiten variieren hier zwischen 5,80 km/s und 6,60 km/s was für Calcit Marmore typische Werte sind. Die Ultraschallgeschwindigkeiten des Einkristalls liegen zwischen 5,70 km/s parallel der c-Achse und 7,70 km/s parallel zu den a-Achsen (Abb. 20).

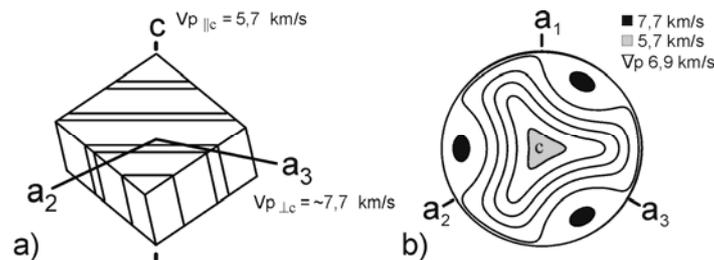


Abb. 20: Beziehung zwischen kristallographischen und physikalischen Eigenschaften des Calcit-Einkristalls; a) Kompressionswellengeschwindigkeiten parallel zu den jeweiligen Kristallachsen sowie b) Geschwindigkeitsverteilung (P-Welle) in einem Calcit-Einkristall (Schmidt'sches Netz, untere Halbkugel; modifiziert nach JOHNSON & WENK, 1985).

Auffallend hinsichtlich der Ultraschallgeschwindigkeiten der trockenen Bohrkerns ist, dass die oberflächennahen Bereiche deutliche Schwankungen der Geschwindigkeiten aufweisen. Bei Messpunkt 1 von Bohrkern 2 sind die Geschwindigkeiten mit 4,75 km/s relativ hoch (Abb. 21). Bei Messpunkt 3 hingegen auf 3,60 km/s herabgesetzt. In tieferen Bereichen steigt die Ultraschallgeschwindigkeit wieder auf ca. 4,00 km/s an. Dasselbe Phänomen ist bei Bohrkern 1 festzustellen, jedoch nicht so deutlich ausgeprägt. Das es sich hierbei um einen messbedingten Fehler handelt, der mit der oberflächennahen Datenerfassung zusammenhängt ist unwahrscheinlich, da auf der anderen Seite des Bohrkerns ein mehr oder minder gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil zu erfassen ist, obwohl die Messung ebenfalls in den entsprechenden Abständen zur Oberfläche durchgeführt wurden. Nach jetzigem Stand des Wissens ist davon auszugehen, dass die oberflächennahen Bereiche stärker geschädigt sind als der Kern der Plinte und somit Geschwindigkeiten aufweisen sollten, welche für Messpunkt drei ermittelt werden konnten. Die deutlich erhöhten  $V_p$ -Werte bei Messpunkt 1 sprechen für eine sekundäre Festigung oberflächennaher Bereiche. Diese könnte zum einen durch Lösungs-/Fällungsprozesse des Calcits aufgrund chemischer Mobilisierung und zum anderen durch vormalige Konsolidierungsmaßnahmen hervorgerufen sein.

Weiterhin wurden an den Bohrkerns Trocknungsversuche mit simultaner Überprüfung der Ultraschallgeschwindigkeiten durchgeführt, um zu ermitteln in wie weit der Feuchtehaushalt des Marmors Einfluss auf die elastischen Eigenschaften des Materials besitzt. Dazu wurden die Proben mittels Vakuum mit Wasser vollgesättigt. An ausgewählten Positionen wurde mittels Punktkopplungssensoren die Ultraschallgeschwindigkeit in regelmäßigen Abständen während des Trocknungsprozesses ermittelt.

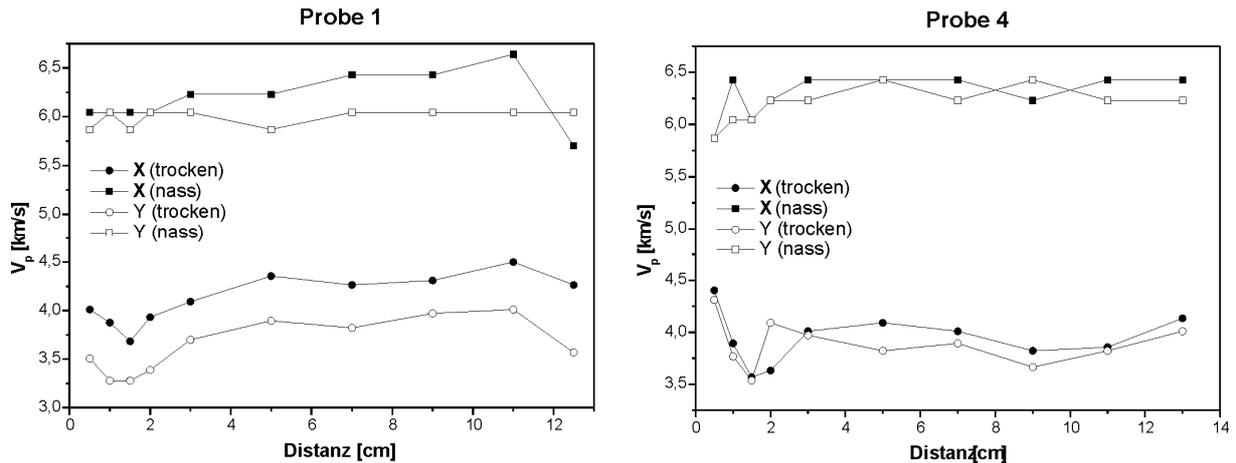


Abb. 21: Ultraschallgeschwindigkeiten ( $V_p$ ) der Bohrkern 1 (Figurengruppe 2) und 4 (Figurengruppe 3) im Längsprofil im trockenen und wassergesättigten Zustand.

Die in Abb. 21 aufgetragenen Daten zeigen deutlich die Abhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeiten vom Wasserhaushalt der Marmore. Im vollgesättigten Zustand weisen die Marmore  $V_p$ -Werte zwischen 6,25 km/s und 6,70 km/s auf, wie sie bereits oben beschrieben wurden. Mit zunehmender Abtrocknung wird auch die Ultraschallgeschwindigkeit reduziert. In Abb. 22 ist die Ultraschallgeschwindigkeit gegen den errechneten Sättigungsgrad aufgetragen. Die Daten zeigen, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen Sättigungsgrad und  $V_p$  gibt. Unterhalb eines Sättigungsgrades von ca. 20% ist jedoch keine Geschwindigkeitsreduzierung mehr festzustellen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass unterhalb dieses kritischen Sättigungsgrades Wasser keine elastischen Brücken zwischen den Calcit-Kristallen aufbauen kann, welche eine Erhöhung der Geschwindigkeiten erzeugen. Das Wasser wird hier weitgehend nur noch oberflächengebunden sein. Der kritische Sättigungsgrad sollte damit aber auch von der Rissweite der entfestigten Marmore abhängen und somit mit dem Erhaltungszustand variieren. Weiterhin wird auch die Häufigkeit der Risse bzw. die Rissdichte in einem geschädigten Marmor auf dieses Phänomen eine gewisse Kontrolle ausüben.

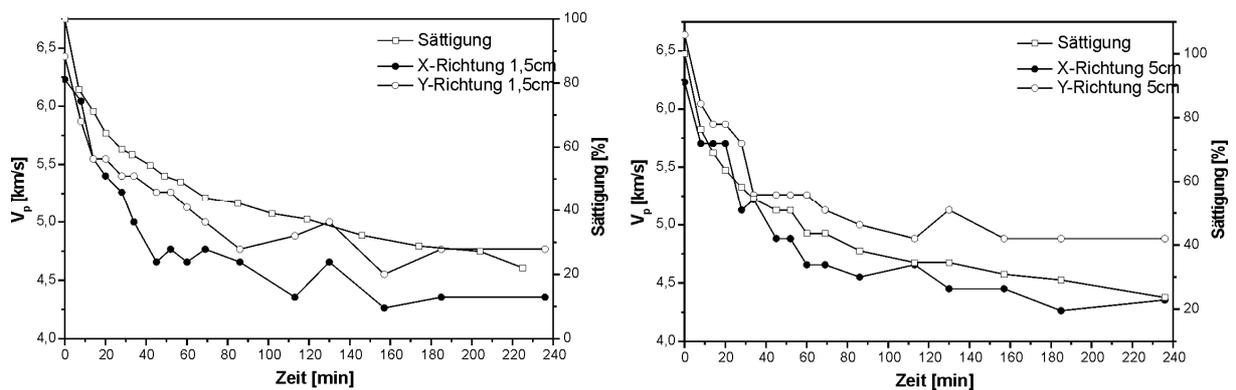


Abb. 22: Zusammenhang zwischen Wassersättigung und Ultraschallgeschwindigkeit der untersuchten Marmorproben.

## 5 Verwitterungsprozesse

### 5.1 Thermische Entfestigung

Als entscheidender Prozess, der die Gefügeentfestigung in kristallinen Marmoren einleitet, wird die Mikrorissbildung durch thermische Beanspruchung angesehen. KESSLER (1919) beobachtete, dass wiederholtes Aufheizen von Marmor zu einer Restdehnung führt, d.h. dass sich das Gestein nach thermischer Beanspruchung nicht auf seine Ausgangslänge zurückzieht. Dabei kann schon während des ersten Beanspruchungszyklus eine erhebliche permanente Längenänderung auftreten (ZEZZA et al., 1985; SAGE, 1988; TSCHEGG et al., 1999; SIEGSMUND et al., 2000b). BATTAGLIA et al. (1993) ermittelten selbst für relativ geringe Temperaturänderungen von 20 °C auf 50 °C ausgeprägte Restdehnungen bei Marmoren.

Bezüglich der thermischen Gefügeentfestigung von Calcit-Marmoren kommt den extrem anisotropen Eigenschaften des Calcit-Einkristalls eine entscheidende Bedeutung zu (EVANS, 1978; FREDRICH & WONG, 1986). In Richtung der kristallographischen c-Achse weist Calcit einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von  $26 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  ( $25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  für Dolomit) auf, in den Ebenen normal zur c-Achse einen Koeffizienten von  $-6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  ( $6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  für Dolomit). Bei Erwärmung dehnt sich daher ein Calcitkristall in der einen Richtung aus und in der Richtung senkrecht dazu zieht er sich zusammen (Abb. 23). In einem Marmor, also einem polykristallinen Material, kommt es durch die Temperaturschwankungen je nach Orientierungen der einzelnen Kristalle zum Aufbau von Zug-, Druck- und Scherspannungen an den Korngrenzen (Bild 23e). Diese Spannungen führen zur Gefügeauflockerung an den Korngrenzen durch fortschreitendes Mikrorisswachstum. Das Ausmaß der thermisch-induzierten Schädigung hängt neben der Anisotropie des Einkristalls im Wesentlichen von der Orientierung der einzelnen Calcitkristalle, ihrer Kornform und der Korngröße ab. Zeisig et al. 2002 diskutieren die Einflüsse auf die thermische Entfestigung und somit auf die physikalische Verwitterung am Beispiel von systematischen Untersuchungen an 18 Marmoren.

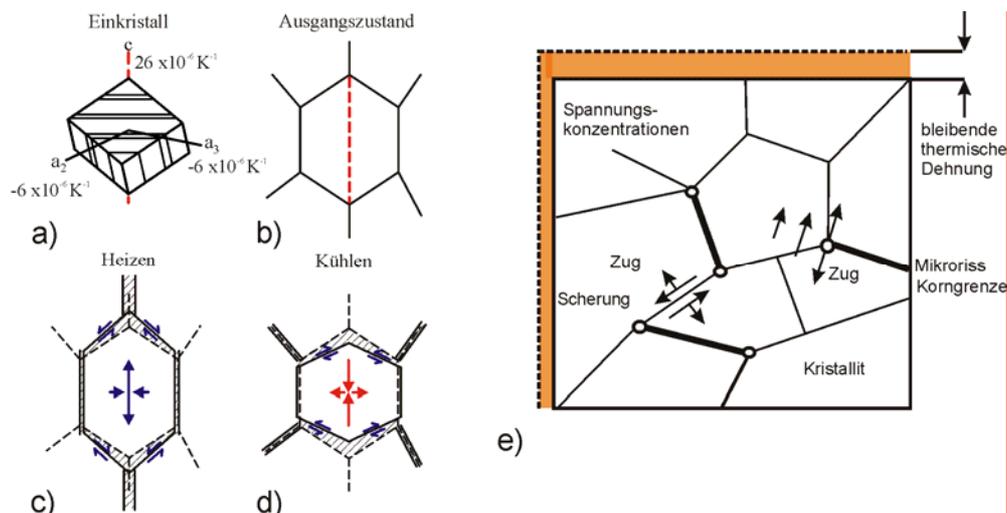


Bild 23: a-d) Anisotropie des thermischen Verhaltens eines Calcit-Einkristalls als Funktion der Temperatur. e) Prinzip der Bildung einer Restdehnung als Folge thermischer Spannungen und daraus resultierender Mikrorissbildung im Marmor (aus Sage 1988).

Der Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$ , der die genaue Längenänderung während der Aufheiz- und Abkühlphase beschreibt, ist abhängig von dem jeweils betrachteten Temperaturintervall. Generell ist festzustellen, dass die thermische Dehnung mit der Temperatur ansteigt und nach erfolgter Abkühlung in den meisten Fällen nicht zum Ausgangsstadium zurückkehrt (Abb. 24). Die verbleibende Restdehnung geht mit einer Längen- oder Volumenänderung einher, die durch eine progressive Mikrorissbildung erklärt werden kann.

Dabei konnten der Modalbestand, die Korngröße, die Kornform, die Korngrenzengeometrie, die Kornformregelung, die Textur und der Einfluss präexistierender Mikrorisse als kritische Parameter für die thermisch-induzierte Entfestigung herausgearbeitet werden (Rüdrich 2003). Bauphysikalische Aspekte als auch andere extrinsische Einflussgrößen (z.B. klimatische Verhältnisse) bleiben zunächst vollkommen unberührt.

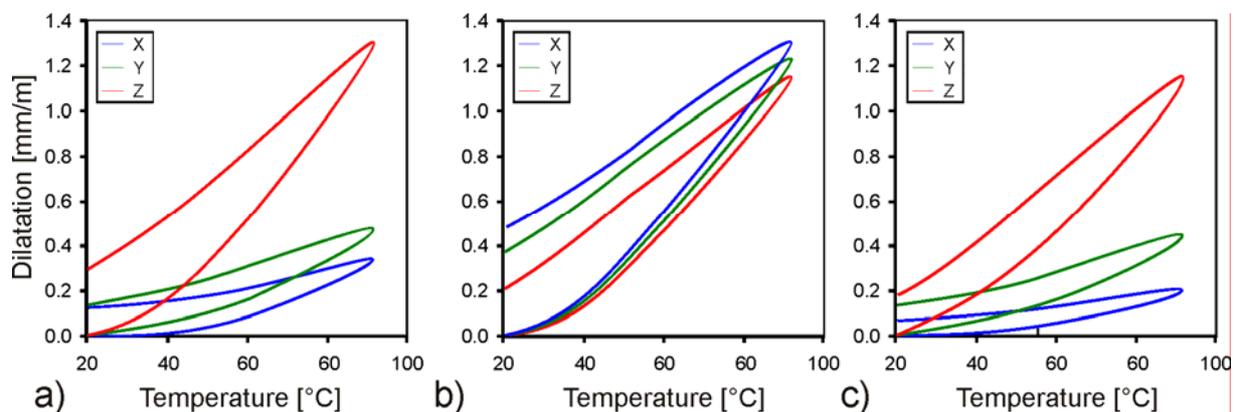


Bild 24: Richtungsabhängigkeit der thermischen Dehnung in Abhängigkeit von der Temperatur (a) Peccia, (b) Carrara und c) Rosa Estremoz Marmor (Siegesmund & Rüdrich 2008). Die starke Richtungsabhängigkeit der Dehnung wird durch die Textur hervorgerufen. Die Differenz zwischen Ausgangslänge und Länge nach der Beanspruchung repräsentiert die Intensität der Schädigung in Form einer Mikrorissbildung und wird als Restdehnung bezeichnet.

## 5.2 Thermohygrische Entfestigung

Um den Bedingungen an der Skulptur, denen der Marmor ausgesetzt ist, Rechnung zu tragen, muss der Einfluss der Feuchtigkeit berücksichtigt werden. Es wird angenommen, dass der Prozess der fortschreitenden Marmorentfestigung, nicht allein mit der thermischen Dilatation erklärbar ist. Es stellt sich daher die Frage, welche Klimaeinflüsse zu einer progressiven Schädigung führen. Feuchtigkeit alleine bewirkt keine Restdehnung und damit auch keine Schädigung. Zyklische Temperatureinwirkung unter trockenen Bedingungen führt nur zu einer limitierten Restdehnung, die auch bei weiteren Wiederholungen nicht fortschreitet (SAGE 1988). Um den Einfluss des Wassers beim Durchlaufen von Temperaturzyklen zu erfassen, wurden Proben eines Carrara Marmors zunächst achtmal trocken und anschließend zehnmal nass auf 90 °C aufgeheizt (Abb. 25).

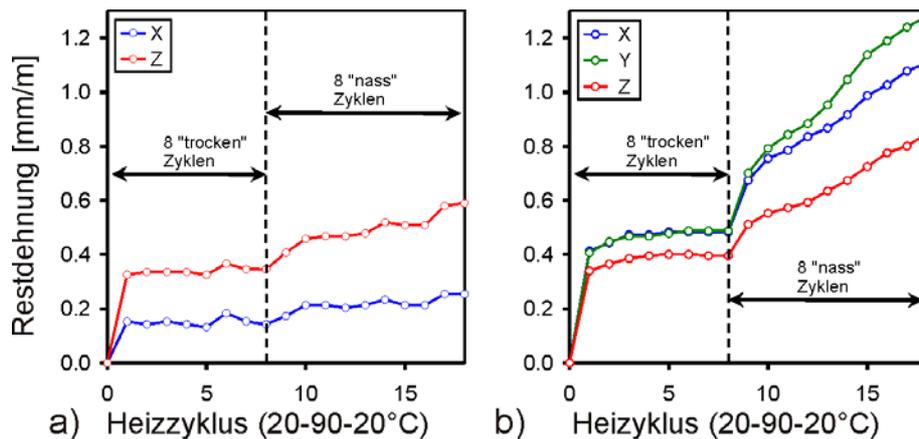


Bild 25: Thermohygrisches Dehnungsverhalten: a) Peccia und b) Carrara Marmor nach jeweils trockenem und 8 nassen Bewitterungszyklen.

Es zeigt sich, dass nur der erste Heizzyklus unter trockenen Bedingungen zu einem beträchtlichen Zuwachs an Restdehnung führt. Das Fortschreiten der Restdehnung kommt zwischen dem zweiten und fünften Zyklus mehr oder minder zum Erliegen. Unter dem Einfluss der Feuchtigkeit ändert sich die progressive Restdehnung fundamental. Sie hält kontinuierlich an, wobei der Zuwachs an Restdehnung nach zehn Nasszyklen beim Peccia Marmor relativ gering (0,25-0,59 mm/m) ist. Die Probe des Carrara Marmors weist die höchste Restdehnung zwischen 0,80 und 1,28 mm/m auf.

Analog zum Verhalten der Restdehnung unter trockenen Bedingungen ist eine starke Anisotropie der progressiven Restdehnung unter thermohygrischem Einfluss festzustellen. Der Carrara Marmor lässt parallel zur Y-Richtung nach acht Nasszyklen eine um ca. 30% höhere Restdehnung erkennen als parallel zur Z-Richtung des Gesteins

Um die Wirkung der Feuchtigkeit bei thermischer Beanspruchung eines Marmors genauer zu untersuchen, wurde die Versuchsdurchführung am Beispiel von vier Probezylindern des Carrara Marmors modifiziert. Die Anzahl der Nasszyklen wurde auf 25 erhöht, wobei in den ersten fünf die Proben nach Durchlaufen eines Temperaturzyklus noch in Kontakt mit Wasser standen. Während der letzten 20 Zyklen waren die Proben nach Wiederabkühlung trocken. Aus den Ergebnissen, dargestellt in Abb. 26, können zwei wesentliche Erkenntnisse abgeleitet werden:

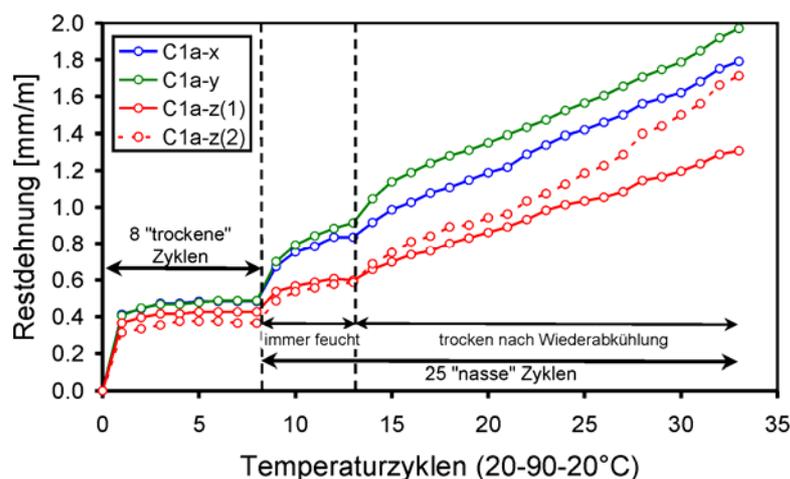


Abb. 26: Fortschreitende Entfestigung bei thermohygrischer Beanspruchung einer Probe aus Carrara Marmor.

Die progressive Restdehnung hält auch nach 25 Nasszyklen unvermindert an und erreicht bereits unter Laborbedingungen Spitzenwerte von knapp unter 2 mm/m. Daraus wird vorstellbar, wie es nach Jahren der Exposition zu hohen Dehnungsraten von Marmor kommen kann, wobei das Material in-situ zwar einer geringeren Intensität von thermohygrischen Verwitterungszyklen, dafür aber einer hohen Anzahl solcher ausgesetzt ist.

Der Feuchtigkeitsgehalt in der Probe nach einem Temperaturzyklus beeinflusst offensichtlich die Verwitterungsrate. Die Dehnungskurve wird während den ersten 5 Zyklen bei dauerhafter Benässung immer flacher, also solange das Material im ständigen Kontakt mit Wasser bleibt. Sobald die Proben während der Heizphase trocken fallen, beschleunigt sich die Restdehnungsrate und hält ungebremst an. Die Intensität der Restdehnung als Indikator für die Sensibilität eines Marmors gegenüber thermischer Beanspruchung kann nicht auf einzelne Gefügemerkmale zurückgeführt werden. Vielmehr wirken mehrere Gefügeparameter im komplexen Zusammenspiel auf die Restdehnung ein wie zum Beispiel die Korngrenzengeometrie, die Korngröße oder die Textur.

### *Einfluss der Luftfeuchtigkeit*

Entscheidende Bedeutung für die Entwicklung einer Einhausung zum Schutz der Marmorskulpturen ist der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die thermohygrischen Entfestigungsprozesse. Dazu wurden hochauflösende Längenänderungsmessungen in einem Dilatometer an Probenmaterial des ausgewählten Referenzmaterials durchgeführt. Die Untersuchungen wurden in einem Dilatometer durchgeführt bei dem die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit über einen Klimaschrank unabhängig voneinander gesteuert wurden. Es wurde bei jeweils drei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten (30%, 60%, 90%) die Proben thermisch von 20 °C auf 60 °C beansprucht und wieder auf die Ausgangstemperatur abgekühlt. Die Ergebnisse sind in Abb. 27 dargestellt. Die Untersuchungen starteten an bruchfrischen Probenmaterial.

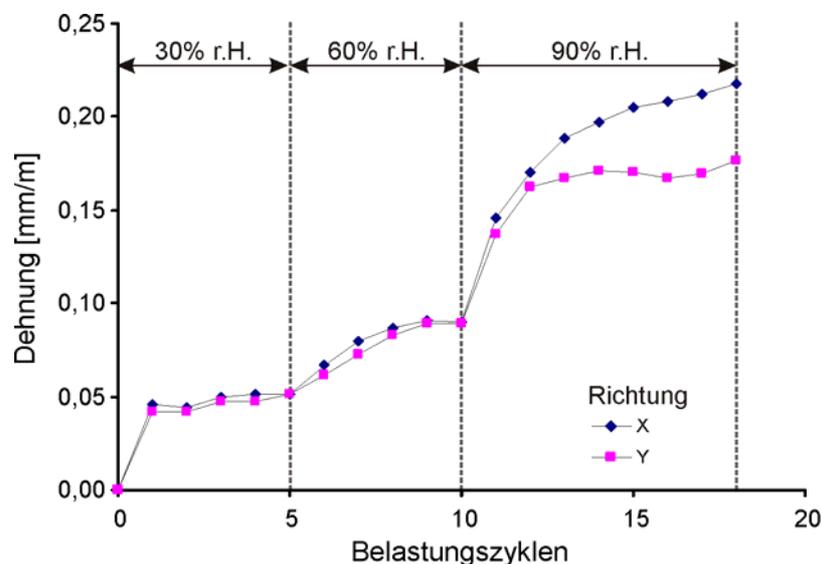


Abb. 27: Entwicklung der Restdehnungsbeträge bei thermischer Beanspruchung auf 60 °C und unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten für den als Referenzprobe ausgewählten Carrara Marmor.

Für die 5 Heizzyklen bei 30% rel. Luftfeuchtigkeit ist ein vergleichbares Entfestigungsmuster wie bei den oben dargestellten Restdehnungen bei reiner thermischer Beanspruchung festzustellen. Lediglich der erste Heizzyklus führt zu einer deutlichen Restdehnung und damit zur Schädigung des Marmors. Die folgenden 4 weitgehend trockenen Zyklen erhöhen nur unwesentlich die Restdehnung. Bei den folgenden 5 Heizzyklen bei 60% rel. Luftfeuchtigkeit

ist ein mehr kontinuierlicher Anstieg der Restdehnung festzustellen. Jedoch scheint auch hier keine progressive Schädigung induziert zu werden, da zwischen dem 4 und 5 Zyklus keine weitere bleibende Längenänderung auftritt. Hingegen zeigen die Heizzyklen bei 90% rel. Luftfeuchtigkeit zum einen eine deutlich höhere Schädigungsrate als bei niedrigen Luftfeuchtigkeiten und zum anderen scheint hier auch eine progressive Entfestigung vorzuliegen. Dies bedeutet, dass nach den vorliegenden Erkenntnissen davon auszugehen ist, dass auch hohe rel. Luftfeuchtigkeiten ohne direkte Benässung durch Regen zu einer fortschreitenden Schädigung des Marmors bei Temperatureinwirkung stattfinden kann.

### 5.3 Verwitterungsverhalten bedingt durch Eiskristallisation im Porenraum

Die Schädigung von Marmoren bei Frostbeanspruchung ist ein bislang wenig untersuchter Schadensprozess. Nur eine geringe Anzahl von Arbeiten (z.B. Ondrasina et al. 2002) widmete sich bislang diesem Thema, da in der Regel kristallin Gesteine eine relative gute Frostbeständigkeit aufweisen. Jedoch zeigen die meisten Marmore im Gegensatz zu anderen kristallinen Gesteinen eine wie oben diskutierte fortschreitende Entfestigung in Form eines Mikrorisswachstums mit dem der Porenraum sukzessive erweitert wird. Dadurch kann Wasser in die Hohlräume eindringen und dort unter entsprechenden klimatischen Begebenheiten auch gefrieren.

Um den Einfluss der Frostbeanspruchung und der daraus resultierenden Schäden zu quantifizieren wurden in einem ersten Schritt thermische Längenänderungsmessungen durchgeführt. Dazu wurden Proben des Carrara Referenzmaterials im trockenen Probenzustand von 20 °C auf -12 °C abgekühlt und wieder auf die Ausgangstemperatur erwärmt. Die Temperaturänderungsrate betrug 0,5 °C/min. Es wurde bruchfrisches Material des ausgewählten Referenzmarmors für diesen Versuch verwendet.

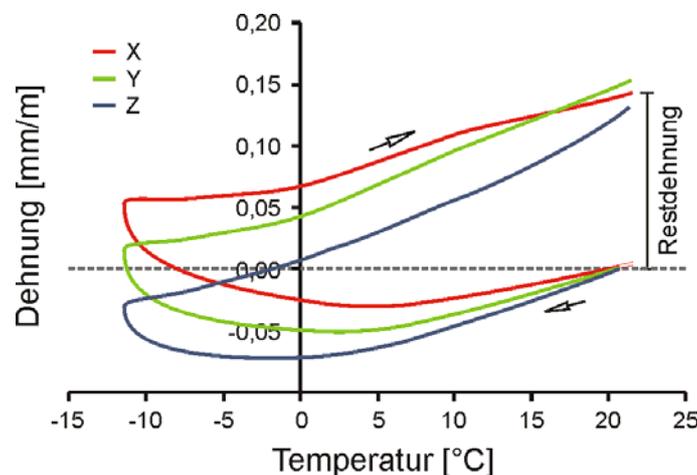


Abb. 28: Dehnungsverhalten der ausgewählten Probe des Referenzmarmors (bruchfrisch) unter trockenen Bedingungen bei Temperaturabkühlung von 20 °C auf -12 °C und wieder zurück auf die Ausgangstemperatur.

Im ersten Abkühlungszyklus ist eine deutliche Restdehnung nach der Beanspruchung von ca. 0,15 mm/m festzustellen (Abb. 28). Diese ist ungefähr vergleichbar mit der Restdehnungsrate die bei einer positiven Temperaturerhöhung um ein gleiches Maß zu messen ist (vgl. Abb. 24). Das bedeutet, dass der untersuchte Marmor sowohl auf Temperaturerhöhung als auch auf Temperaturabsenkung sehr empfindliche und mit einer deutlichen Mikrorissneubildung bzw. Rissweitung reagiert. Beim betrachten des Kurvenverlaufs in Abb. 28 ist unterhalb von 5 °C eine Änderung des Dehnungsverhaltens festzustellen. Die Dehnungskurve dreht mit

zunehmend niedrigeren Temperaturen wieder nach oben. In diesen Bereichen wird offensichtlich die Schädigung des Materials initialisiert.

Um Informationen über die Schädigung während möglicher Eiskristallisation im Porenraum der Marmore zu erhalten, wurden hochauflösende Längenänderungsmessungen an Carrara Probenmaterial durchgeführt. Im Gegensatz zu den oben angeführten Untersuchungen wurde neben dem Referenzmaterial auch auf unterschiedlich natürlich verwitterten Carrara Marmor zurückgegriffen (a: bruchfrisch thermisch alteriert, b: mittlere und c: starke natürliche Entfestigung). Die entsprechenden Proben wurden uns freundlicherweise von Herrn Detlef Röper von der Stiftung Preussische Schlösser und Gärten zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um ausgebaute Gesimsbauteile des Marmorpalais in Potsdam. Aufgrund unterschiedlicher Positionierung am Gebäude ist die Schädigung der ehemaligen Bauteile sehr unterschiedlich ausgeprägt (Abb. 29). Die Frost-Tau-Untersuchungen wurden an Bohrkernen (15x100 mm) im kapillar wassergesättigten Zustand durchgeführt. Die Temperaturänderungsrate betrug 0,5 C/min. Die au

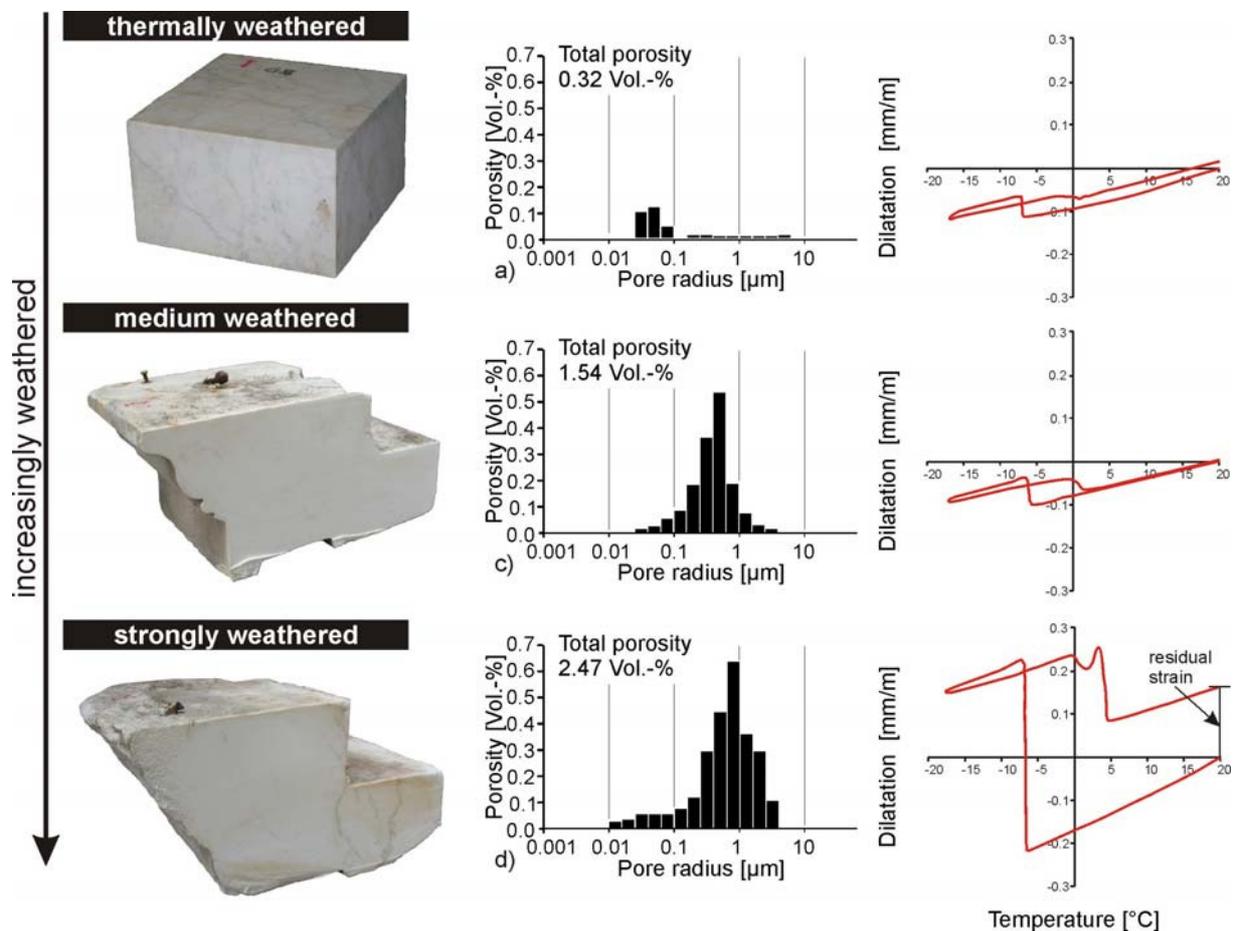


Abb. 29: Dehnungsmuster bei Frostbeanspruchung von Marmoren in unterschiedlichen Erhaltungszuständen in wassergesättigtem Zustand.

Für die weitgehend wassergesättigten Proben ist ein sehr unterschiedliches Längenänderungsverhalten bei Frost/Tau-Beanspruchung in Bezug auf den trockenen Zustand aber auch zwischen den verschiedenen Erhaltungszuständen festzustellen. In Abb. 28 sind die Ergebnisse für die drei unterschiedlichen Erhaltungszustände dargestellt. Alle drei Proben weisen bei Abkühlung auf ca.  $-7^{\circ}\text{C}$  eine sprunghafte und signifikante Dehnung auf. Dieses

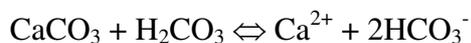
Längenänderungsverhalten ist auf die Kristallisation von Eis im Porenraum zurückzuführen. Ob es sich hierbei um reine Volumenausdehnung beim Übergang von flüssigem Wasser zu Eis oder um den Prozess des linearen Wachstumsdrucks handelt (Ruedrich et al. 2006) ist aus den Daten nicht zu entnehmen. Bei fortschreitender Abkühlung der Proben auf  $-17\text{ °C}$  ist wieder ein normales Kontraktionsverhalten festzustellen. Beim Aufheizen verkürzt sich die Probe wieder sprunghaft im Bereich um ca.  $0\text{ °C}$  was auf das Tauen des Eises zurückgeführt werden kann. Nach der Beanspruchung tritt lediglich für die stark entfestigte Carrara Probe eine deutliche Restdehnung auf. Die beiden Marmorproben im besseren Erhaltungszustand zeigen hingegen so gut wie keine Restdehnung. Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass vor allem stark entfestigte Marmorpartien an den Figuren der Schlossbrücke einen direkten Frostschaden erleiden können. Schwächer geschädigte Parteien der Objekte werden offensichtlich nur durch geringe Dehnungsbeanspruchungen belastet. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass diese Beanspruchung bei dauerhafter Einwirkung ebenfalls zu einer Schädigung des Marmorgefüges führt. Jedoch sollte das Ausmaß der Schädigung wesentlich geringer sein.

#### 5.4 Chemische Löslichkeit

In reinem Wasser sind Karbonate nur sehr gering löslich. Das Löslichkeitsprodukt von Calcit liegt bei  $25\text{ °C}$  bei:  $[Ca^{++}] \cdot [CO_3^{2-}] = 4,00E-09$ , bei Dolomit ist es noch viel geringer. Ein Liter reines Wasser würde lediglich  $0,013\text{ g}$  Calcit lösen können. Das heißt für die Marmorverwitterung in Mitteleuropa bei Niederschlägen von ca.  $600\text{ l/Jahr}$  dass es tausende von Jahren dauern würde signifikante Mengen Calcit oder Dolomit zu lösen. Entscheidende Bedeutung kommt dem Säuregehalt des Wassers zu, wobei der wesentliche Faktor das Kohlendioxid spielt. An der Atmosphäre diffundiert Kohlendioxid in die Luftfeuchtigkeit, wird hydratisiert und bildet Kohlensäure. Die Bildung von Kohlensäure aus  $CO_2$  und Wasser erfolgt über zwei Dissoziationsstufen:



Die Gleichgewichtskonstanten der 3 Reaktionen sind sehr klein, d.h. der Schwerpunkt liegt bei den Ausgangsstoffen: Regenwasser ist eine leichte Säure mit einem natürlichen mittleren pH-Wert um  $5.7$ . Die Lösung von Calcit kann als folgende Reaktion beschrieben werden:



Im Anfangstadium der Verwitterung von Marmoren sind lediglich äußere Oberflächen betroffen. Dies führt in vielen Fällen zu einer Rauigkeit der Oberfläche. Je weiter der Marmor durch den thermischen und thermohygrischen Entfestigungsprozess geschädigt ist, um so schneller und in größerer Menge kann Wasser von Mikrorissen aufgenommen und transportiert werden. Sehr stark entfestigte Marmore nehmen Wasser vergleichbar zu hochporösen Sandsteinen auf (Ruedrich 2003). Einhergehend mit einer hohen Wasseraufnahmefähigkeit steigt auch die chemische Lösung auf den inneren Oberflächen der Marmore und erzeugt Mikrokarstgefüge. Typische Phänomene sind Ätzgrübchen auf den Karbonatoberflächen (Abb. 30). Es können aber auch selektiv entlang von Kristalldiskontinuitäten das Karbonat gelöst werden. Hierbei bilden sich Ätzspalten (Abb. 30) welche den Kristallflächen folgen.

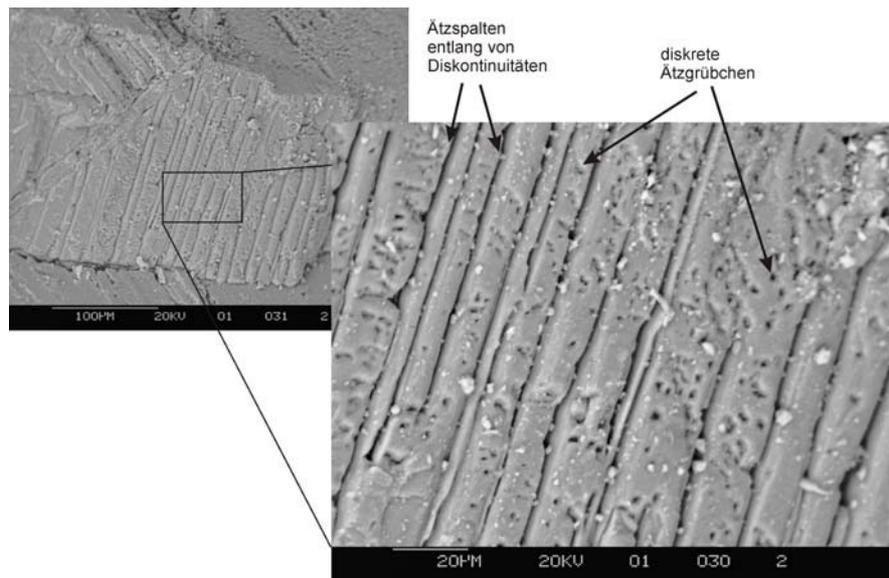


Abb. 30: Schadensphänomene durch chemische Lösung auf Calcit-Kristallflächen.

## 6 Vergleichende Verwitterungssimulation von nicht eingehaustem und eingehaustem Marmor (AP 6.1)

Um die reduzierte Einwirkung der winterlichen Klimaeinflüsse bedingt durch eine Einhausung auf die Verwitterungsintensität der Marmore zu überprüfen, sollten in diesem Forschungsvorhaben Verwitterungssimulationen im Klimaschrank mit Überprüfung der progressiven Schädigung durch Ultraschalllaufzeiten erfolgen. Schon in einem frühen Stadium dieser Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die entsprechende Ultraschallsensorik nicht ausreichend sensibel bzw. nicht hochauflösend genug ist um die geringen Schädigungen zu erfassen. Daher wurden alternativ hochauflösende Längenänderungsmessungen durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten in einem Umwelt-Dilatometer dessen Prüfraum durch einen Klimaschrank klimatisiert wurde, womit eine weitgehend unabhängige Steuerung der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur erzielt werden konnte. Die Untersuchungen fokussierten auf einen unterschiedliche Feuchtigkeitseinfluss (eingehaust/nicht eingehaust) bei Abkühlung und Frost/Tau-Einwirkung der Proben vergleichbar der Wintersituation vor Ort. Es wurden zylindrische Marmorproben ( $\varnothing$  15 mm x 100 mm) zyklisch unterschiedlichen Klimabedingungen ausgesetzt. Es handelte sich um bruchfrische Proben des, für dieses Projekt ausgewählten Referenzmarmors. Die Erfassung der Längenänderung erfolgte mittels induktiven Wegaufnehmern, welche eine Auflösung von 0,1  $\mu\text{m}$  und eine Genauigkeit von 0,2  $\mu\text{m}$  erreichen. Die Untersuchungen wurden an zwei Bohrkernsätzen in jeweils drei orthogonalen Gefügerichtungen (X, Y und Z, s. Abb. 14) durchgeführt. Die beiden Bohrkernsätze wurden vor den Simulationen bei 150 C thermisch konditioniert um eine gewisse Vorschädigung zu simulieren. Aus vergleichbaren Untersuchungen ist bekannt, dass eine solche Temperaturbeaufschlagung bei entsprechender Probendimension zu einer mittleren Schädigung führt, welche vergleichbar ist zu den besseren Erhaltungszuständen des Marmors der Skulpturen.

Die Marmore wurden derart bewittert, dass im Wechsel von 20 °C ausgehend, die Temperatur in der Probe einmal auf -7 °C und einmal auf +2 °C herabgesenkt wurde. Diese beiden unterschiedlichen Temperaturbeanspruchungen wurden in 22 Zyklen hintereinander wiederholt. Für ein Probenset erfolgte dies unter geringen rel. Luftfeuchtigkeiten (Äquilibrium bei 20 °C der Proben und bei 40% rel. Luftfeuchtigkeit, s. Abb. 31a). Für das

zweite Probenstet wurden hohe Luftfeuchtigkeiten eingestellt (Äquilibration bei 20 °C der Proben und bei 97% rel. Luftfeuchtigkeit, s. Abb. 31b).

Diese Vorgehensweise soll die Auswirkungen einer Einhausung auf die Verwitterung von Marmoren simulieren. Dabei ist davon auszugehen, dass bei geringen Luftfeuchtigkeiten die Proben trockener bleiben (Fall der Einhausung). Für den Fall der hohen Luftfeuchtigkeiten kann hingegen bei den verwendeten Probendimensionen angenommen werden, dass der Marmor durchgehend durchfeuchtet bleibt.

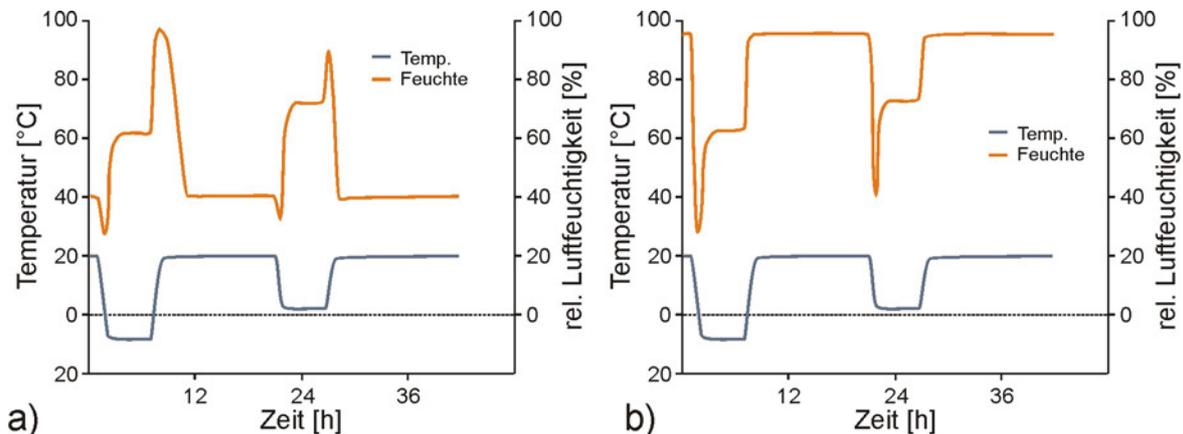


Abb. 31: Verlauf der Temperatur und der rel. Luftfeuchtigkeit für die Verwitterungssimulationen: a) Kältebeaufschlagung bei niedrigen Feuchten (Äquilibration bei 40% rel. Luftfeuchtigkeit) und b) Kältebeaufschlagung bei hohen Feuchten (Äquilibration bei 97% rel. Luftfeuchtigkeit).

Für die fortschreitende Entfestigung der Marmore wurden die Restdehnungen ausgewertet, welche nach dem jeweiligem Bewitterungszyklus aufgetreten sind. In Abb. 31a sind die verbleibenden Längenänderungen für die 44 Bewitterungszyklen unter relativ trockenen Bedingungen der drei untersuchten Gefügerichtungen (X, Y und Z) aufgetragen. Es ist festzustellen, dass vor allem in den ersten fünf Zyklen eine ausgeprägte Zunahme der Restdehnungen auftritt (gelb markierter Bereich). Danach ist eine fortschreitende Entfestigung auf einem niedrigeren Niveau beobachtbar. Bei der getrennten Betrachtung der beiden unterschiedlichen Temperaturbeanspruchungen für die trockene Bewitterungssimulation sind deutlich unterschiedliche Schädigungseffekte zu erfassen. Für den Versuch mit Frosteinwirkung und Temperaturherabsetzung auf -7 °C tritt nur für die ersten Beanspruchungszyklen eine ausgeprägte Restdehnung auf (Abb. 32b). Diese erste Restdehnung darf jedoch nicht für den weiteren Verlauf der Versuchsentwicklung berücksichtigt werden, da der Marmor in diesen Zyklen zum ersten Mal auf entsprechend niedrige Temperaturen abgekühlt wurde und somit rein thermische Entfestigung auftritt. Für die weiteren Zyklen ist nur eine geringe Zunahme der Schädigung anhand der Restdehnungswerte zu ermitteln. Im Gegensatz dazu führt die zyklische Beanspruchung knapp oberhalb des Gefrierpunktes (Abb. 32c) zu einer wesentlich größeren fortschreitenden Schädigung der Marmore. Für die Simulation bei erhöhten Feuchtigkeiten sehen die entsprechenden Restdehnungsmuster im Großen und Ganzen vergleichbar zum trockenen Zustand aus Abb. 32d-f). Insgesamt ist auch die Dimension der Restdehnung vergleichbar.

Die fehlenden Restdehnungen bei feuchter Beanspruchung deuten daraufhin, dass Marmorproben des mittleren Schädigungsbereiches wie sie in diesem Verwendung fanden, keine Schädigung durch direkte Eiskristallisation erfahren. Diese Beobachtung untermauert die Ergebnisse der in Kapitel 5.3 dargestellten Frost/Tau-Versuche, dass nur bei stark geschädigten Marmoren Eiskristallisation zu einer Gefügeentfestigung führt. Die für beide Feuchtezustände erfassbare progressive Entfestigung bei Abkühlung der Proben lediglich auf

plus 2 °C weist wiederum hier auf thermohygrische Entfestigung hin. Die mehr oder minder gleichen Restdehnungsbeträge für beide Feuchtezustände sprechen dafür, dass der Feuchtegehalt der Proben nur eine geringe Bedeutung für den thermohygrischen Entfestigungsprozess besitzt. Die fehlende Restdehnung der Proben bei Abkühlung unter den Gefrierpunkt spricht dafür, dass zum einen keine Schädigung bei Eiskristallisation auftritt und zum anderen der thermohygrische Schädigungsprozess im Frostbereich nicht mehr wirksam ist.

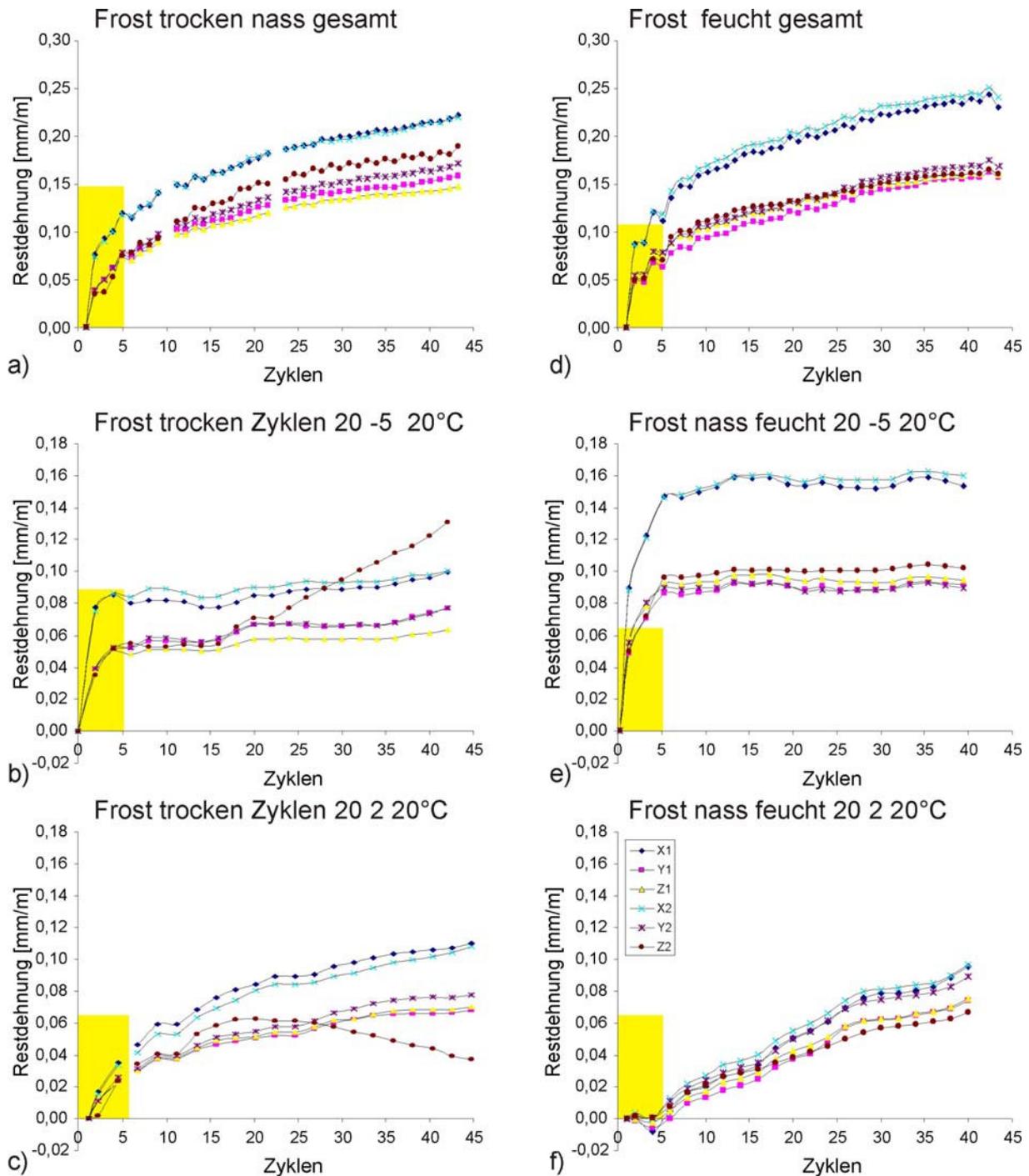


Abb. 32: Restdehnungswerte für die zyklische Beanspruchung der Proben bei feuchten Probenbedingungen: a) fortschreitende Restdehnung für die Gesamtheit der Beanspruchungen, b) Restdehnungen ausschließlich für die Frostbeanspruchung und c) Restdehnungen für die Beanspruchungszyklen oberhalb des Gefrierpunktes.

## 7 Schlussfolgerungen

Hinsichtlich der Verwitterungsprozesse von Marmor müssen für verschiedene Erhaltungszustände unterschiedliche Verwitterungsprozesse angenommen werden. Dies führt insbesondere für die komplexen Skulpturen zu einem sehr heterogenen Bild. Für den Erhaltungszustand der Skulpturen ist festzustellen, dass generell die äußeren Zonen der Objekte stärker verwittert sind als die Kernbereiche. Diese graduell/zonare Schädigung ist schematisch in Abb. 33a) dargestellt. Der Erhaltungszustand ist dabei aber sehr stark abhängig von der Mächtigkeit der einzelnen Skulptur bzw. Körperteile. Das bedeutet, dass beispielsweise filigrane Teile wie Finger oder Federspitzen eine äußerst ausgeprägte Schädigung aufweisen. Eine gemittelte Verteilung der Schadensintensitäten ist in Abb. 33b) explarisch für die Skulpturengruppe I gegeben. Darüber hinaus zeigen die ultraschalltomographischen Untersuchungen, dass die lokale Bewitterungssituation am jeweiligen Objekt einen Einfluss um den Schädigungsgrad besitzt. So weisen durch andere Objektpartien geschützte Bereiche eine geringere Schädigung als direkt bewitterte Skulpturenareale. Dies gilt insbesondere für die tiefenabhängige Schädigung, welche vor allem bei mächtigeren Objektteilen wie Torso und Oberschenkel nachzuweisen sind.

Die Verwitterung von Marmor stellt einen komplizierten Vorgang dar, bei dem verschiedene Zerstörungsprozesse in Abhängigkeit vom Erhaltungszustand wirksam werden. Für die untersuchten Schlossbrückenfiguren sind dies die vier Hauptverwitterungsprozesse i) der thermischen Dilatation, ii) der thermohygrischen Entfestigung, iii) der Schädigung durch Eiskristallisation und iv) der chemischen Lösung.

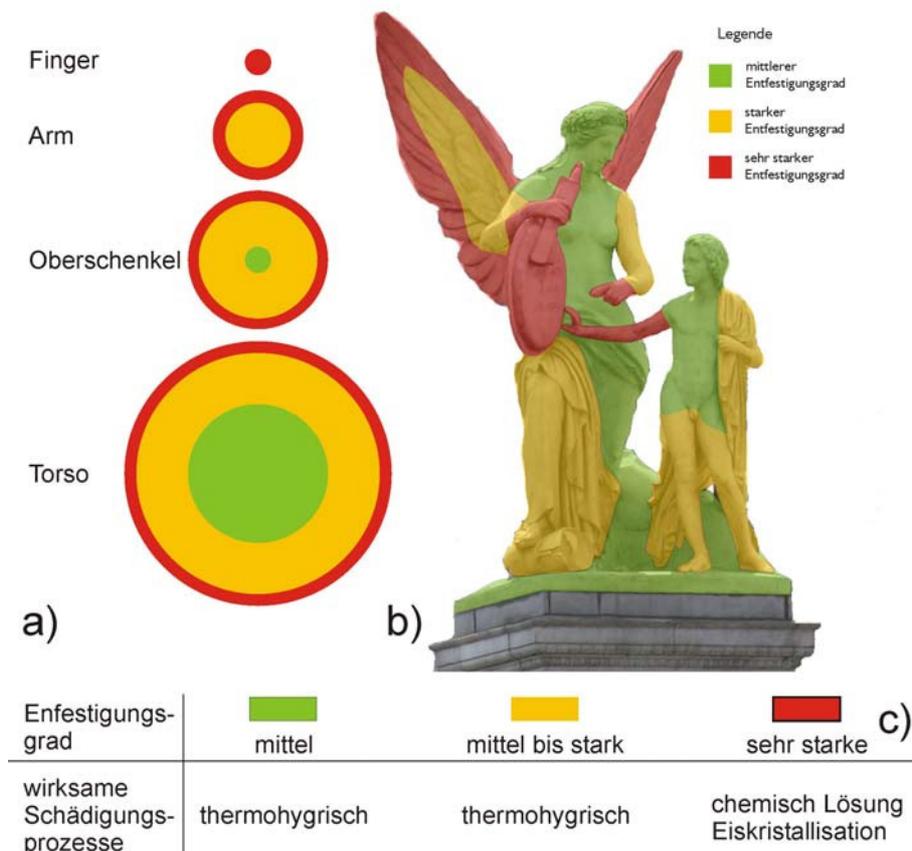


Abb. 33: a) Schematische Abbildung der graduellen Schädigungsintensitäten in Abhängigkeit von der Objektmächtigkeit und b) Schadensintensitätsverteilung ermittelt mittels Ultraschallgeschwindigkeiten am Beispiel der Figurengruppe I.

**Thermische Entfestigung:** Die Schädigung von Marmoren durch Erwärmung ist als initialer Zerstörungsprozess anzusehen, welcher aktiv wird, sobald das Gestein aus dem entsprechendem Gesteinsverband des Bruches entnommen wurde. Dieser Prozess führt zu einer Mikrorissbildung entlang von Diskontinuitäten (Korngrenzen, Spaltflächen und Zwillingsflächen) im Gestein. Die thermische Dilatation führt zu der Bildung eines Porenraums, welcher ursprünglich im Gestein nicht vorhanden war. Der Prozess der thermischen Entfestigung ist für die untersuchten Skulpturen schon seit längerem abgeschlossen und am Objekt nicht mehr wirksam. Die thermische Dilatation hat aber den entsprechenden Porenraum geschaffen, über welchen Wasser in das Gestein eindringen konnte und damit die Grundlage für die weiteren Verwitterungsprozesse gelegt.

**Thermohygrische Entfestigung:**

Der thermohygrische Entfestigungsprozess ist der wesentliche Mechanismus der zur fortschreitenden Schädigung der Marmore führt. Er folgt dem initial thermischen Entfestigungsprozess und endet erst mit der weitgehenden Dekohäsion des Marmors. Dieser Prozess ist im gesamten positiven Temperaturbereich oberhalb des Gefrierpunktes aktiv. Das Abtrocknen während der thermischen Beanspruchung resultiert in einer erhöhten Schädigung im Vergleich zu dauerfeuchten Proben. Dabei scheint der absolute Feuchtegehalt lediglich eine untergeordnete Rolle zu spielen. Nur für wassergesättigte Marmore ist ein geringeres progressives Schadenspotential festzustellen. Im Frostbereich unterhalb des Gefrierpunktes ist nach den durchgeführten Untersuchungen der thermohygrische Entfestigungsprozess nicht aktiv bzw. unterbunden.

**Frost/Tau Verwitterung:**

Das Schadenspotential der Eiskristallisation im Porenraum von Marmoren ist stark vom Erhaltungszustand des Marmors abhängig. Ein schwacher bis mittlerer Schädigungsgrad des entsprechenden Marmors lässt keine signifikante Kristallisation von Eis im Porenraum zu und/oder die Menge an Wasser ist zu gering um ausreichend Kraft auf das Marmorgefüge auszuüben um eine Gefügeentfestigung zu erzeugen. Lediglich für stark entfestigte Marmore ist eine deutliche Schädigung durch Kristallisation von Eis im Porenraum anzunehmen.

**Chemische Lösung:**

Neben der Eiskristallisation ist auch die chemische Lösung ein wesentlicher Schädigungsprozess von stark geschädigtem Marmor. Schwache bis mittlere Schädigung eines Marmors lässt keine signifikante Wasseraufnahme in das Innere des Materials zu. Daher spielt die chemische Lösung für solch geschädigte Marmore nur an der Oberfläche eine Rolle. Die chemische Lösung kann zu einer signifikanten Vergrößerung des Porenraums von Marmoren führen ohne dass die Ultraschallgeschwindigkeiten herabgesetzt werden sowie die Porenradien der Mikrorisse geweitet werden (Ruedrich 2003).

Basierend auf den Ergebnissen der in diesem Forschungsprojekt durchgeführten Untersuchungen muss davon ausgegangen werden, dass die jeweiligen Verwitterungsmechanismen in Abhängigkeit vom Erhaltungszustand wirksam sind (Abb. 33). Das bedeutet, dass die initiale thermische Entfestigung an den Skulpturen nicht mehr aktiv ist, da dieser Prozess bereits abgeschlossen ist. Für einen mittleren bis starken Entfestigungsbereich (Ultraschallgeschwindigkeiten zwischen 5,0 und 2,5 km/s) ist der wesentliche wirksame und progressiv verlaufende Entfestigungsmechanismus die thermohygrische Gefügeaufweitung.

Der Prozess der Frost/Tau-Verwitterung und die chemische Lösung an Inneren Oberflächen scheint erst für Bereiche sehr starker Entfestigung wirksam zu werden. Hierbei handelt es sich um Marmor, welcher Ultraschallgeschwindigkeiten von unter 2,5 km/s aufweist (Abb. 33).

Diese Ergebnisse bedeuten für die Marmorskulpturen der Schlossbrücke, dass gleichzeitig an unterschiedlichen Stellen der Objekte verschiedenartige Zerstörungsprozesse wirksam sind. Zum einen an verschiedenen Stellen der Objekte in Abhängigkeit von ihrer Mächtigkeit und zum anderen in verschiedenen Tiefenbereichen. Diese Zusammenhänge gestalten sich noch komplexer bedingt durch die heterogene Bewitterung am jeweiligen Objekt selbst. Zudem ist davon auszugehen, dass auch die kunsthandwerkliche Herstellung durch verschiedene Bildhauer mechanisch unterschiedliche Bearbeitungsintensitäten schon primär eine unterschiedliche Ausgangssituation der einzelnen Skulpturengruppen angenommen werden muss.

Bezüglich einer Winterschutzeinhausung ist für die untersuchten Objekte festzustellen, dass die Reduzierung der Luftfeuchtigkeit in der Einhausung den thermohygrischen Entfestigungsprozess nur bedingt reduziert. Eine deutliche Abschwächung dieses Schadensprozesses kann nur durch eine Reduzierung der Temperaturschwankungen erzielt werden. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass auch geringe Temperaturschwankungen von 5 bis 10 °C zur Schädigung durch thermohygrische Prozesse führen. Für die stark bis sehr stark geschädigten Bereiche der Skulpturen, bei denen verstärkt die chemische Lösung und die Frost/Tau-Verwitterung wirksam ist, wird eine wesentliche Reduzierung der progressiven Schädigung durch eine Einhausung zu erwarten. Dies resultiert durch das Fernhalten von flüssigem Wasser.

Für Verwitterungsexperimente im Labor stellt sich generell die Frage in welchem Umfang die Ergebnisse an die Gesteine am Objekt übertragen werden können. In den Vergleichsmessungen wurden 22 Frost/Tau-Wechsel simuliert. Bei den in Berlin herrschenden Klimabedingungen ist mit 2 bis 5 Frost/Tau-Zyklen pro Jahr zu rechnen (vgl. BAM). Bei einer Übertragbarkeit der Laborergebnisse würde dies bedeuten, dass nach ca. 10 Jahren eine Schädigung der Marmore von ca. 1 mm/m durch thermohygrische Entfestigungsprozesse zu erwarten wäre.

Neben der Häufigkeit von Frost/Tau-Wechseln sollte auch die Frostintensität eine wesentliche Rolle spielen. Die Frostintensität beschreibt wie lange und bis zu welchem Ausmaß die Temperatur unter die 0 °C Grenze sinkt. Nach Walder und Hallet (1985) kann angenommen werden, dass das höchste Schadenspotential bei einer Temperatur von -10 °C zu erwarten ist. Wie auch immer, dieser Temperaturbereich wird im urbanen Umfeld von Berlin nur selten erreicht (vgl. Abschlußbericht Arbeitsgruppe BAM).

Ein weiterer sehr wichtiger Punkt ist der Feuchtegehalt der Marmore während des Gefriervorgangs. An Objekten sind sogenannte „Feuchte Frost/Tau-Ereignisse“ recht selten, da die Objekte vor dem 0 °C Durchgang befeuchtet werden müssen. Dies könnte durch Regen erfolgen oder durch zuvor aufgetauten Schnee im positiven Temperaturbereich. Für die Region um Budapest/Ungarn führen Grossi et al. (2007) an, dass zurzeit im Mittel ca. vier feuchte Frost/Tau-Ereignisse pro Jahr erfolgen (Abb. 34). Für die Beurteilung einer Einhausung muss weiterhin die Klimaentwicklung in den nächsten Jahren herangezogen werden. Hierzu liegen nur wenige Arbeiten bislang vor. Nach Kalkulationen von Grossi et al. (2007) kann für zahlreiche Gebiete in Zentral Europa in den nächsten Jahrzehnten eine Reduktion der Häufigkeit von Frost/Tau-Ereignissen angenommen werden. In anderen Gebieten hingegen, welche heute durch längere Permafrostphasen gekennzeichnet sind, wird die Anzahl von Frost/Tau-Zyklen ansteigen.

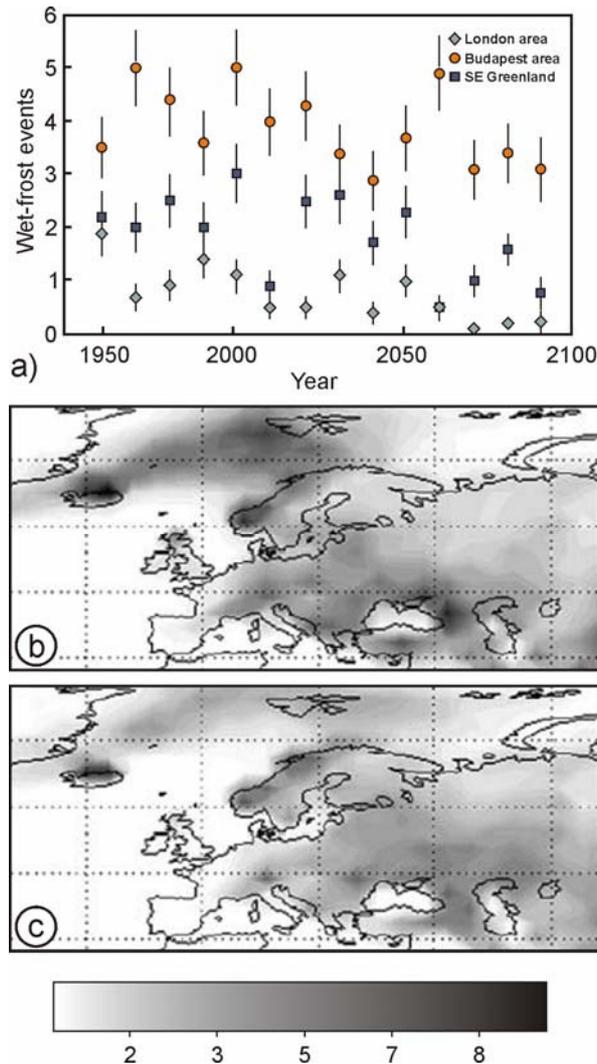


Abb. 34: a) Jährliches Mittel von feuchten Frost-Tau-Ereignissen in den Gebieten um zentral England, Ungarn und Südost Grönland. Die Anzahl der Frost-Tau-Ereignisse zeigt eine Abnahme für die Zukunft an. Pan-Europäische Karte von jährlicher Häufigkeit von feuchten Frost Ereignissen b) in der Gegenwart (1961-1990) und c) der Zukunft (2070-2099) modifiziert nach Grossi et al. (2007).

## 8 Literaturverzeichnis

- Battaglia, S., Franzini, M. & Mango, F., 1993: High sensitivity apparatus for measuring thermal expansion: preliminary results on the response of marbles. *Il Nuovo Cimento*, 16: 453-461.
- Blöchl, B., Kirchner, D. & Stadlbauer, E., 1998: Die hygriische Dehnung von Baumberger Kalksandstein – tonmineralogische und gesteinsphysikalische Aspekte.
- Boas, W. & Honeycombe, R.W.K., 1946: The plastic deformation of non-cubic metals by heating and cooling. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A.*, 186.
- Bortz, S. A., Erlin, B., Monk, C.B., 1988: Some field problems with thin veneer building stones. In: *New Stone Technology, Design and Construction for Exterior Wall Systems* (edited by Donaldson, B.). American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 11-31.
- Brunauer, S., Emmet, P.H. & Teller, E., 1938: Adsorption of gases in multimolecular layer. *J. Amer. Chem. Soc.* 60: 309-319.

- Cantisani, E., Fratini, F., Malesani, P & Molli., G., 2005: Mineralogical and petrophysical characterisation of white Apuan marble. *Per. Mineral.* 74: 117-140.
- Dornrieden, T., Gorbushina, A.A. & Krumbein, W.E., 2000: Patina - Physical and Chemical Interactions of Sub-aerial Biofilms with Objects of Art. In: *Of Microbes and Art: The Role of Microbial Communities in the Degradation and Protection of Cultural Heritage* (Eds. O. Ciferri, P. Tiano and G. Mastromei), Kluwer Academic Publishers, 105 - 119.
- Ettl, H. & Pfanner, M., 2005: Die Marmorrelief des Münchner Siegestors. In: Siegesmund, S., M. Auras & R. Snethlage (Hrsg.) "Stein. Zerfall und Konservierung", Edition Leipzig: 182-187.
- Evans, A.G., 1978: Microfracture from thermal expansion anisotropy - 1. single phase systems. *Acta Metallurgica*, 26: 1845-1853.
- Fredrich, J.T. & Wong, T.F., 1986: Micromechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks. *J. Geophys. Res.*, 91 B12: 12743-12764.
- Grimm, W.D., 1996: Marmor als Werkstein und Denkmalsgestein. *Naturstein* 11.
- Grimm, W.D., 1999: Beobachtungen und Überlegungen zur Verformung von Marmorobjekten durch Gefügeauflockerung. *Z. dt. geol. Ges.*, 150 No. 2: 195-236.
- Grimm, W.D., 2005: Historische Friedhöfe als Untersuchungsobjekte zur Verwendung, Verwitterung und Restaurierung von Denkmalgesteinen. *ZDGG* 156/1:103-128.
- Grunert, S., 1988: Eine Theorie zu der an Marmorskulpturen beobachteten Innenverwitterung. *Abhandlungen des Staatlichen Museums für Mineralogie und Geologie zu Dresden*, 35: 95-98.
- Holtkamp, A., 1999: Marmorkonservierung: Vergleich ausgewählter Festigungsmittel und Applikationsmethoden an einer Probenreihe aus verwittertem Prieborner Marmor. Unveröff. Dipl. Arb., FH Potsdam: 100 S.
- Kessler, D.W., 1919: Physical and chemical tests on the commercial marbles of the United States. *Technology papers of the Bureau of Standards*, No. 123.
- Kleber, W., 1959: Einführung in die Kristallographie. VEB Verlag Technik: S. 384, Berlin.
- Koch, A., 2006: Deformation von Fassadenplatten aus Marmor: Schadenskartierungen und ff Untersuchungen zur Verwitterungsdynamik von Marmorfassaden. Dissertation, Göttingen Universitätsverlag.
- Koch A, & Siegesmund, S., 2004: The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble. In: Siegesmund S, Viles H, Weiss T (eds) *Stone Decay Hazards. Environmental Geology* 46, pp 350-363
- Kocher, M., 2005: Quelldruckmessungen und thermische Druckmessungen an ausgewählten Sandstein. Diss. Universität München: S. 129.
- Köhler, W., 1991: Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara-Marmor in Potsdam-Sanssouci. *Berichte zu Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland, Steinschäden - Steinkonservierung* 2: 50-5.
- Lasaga, A.C. & Blum, A.E., 1986: Surface chemistry, etch pits and mineral-water reactions. *Geochimica et Cosmochimica Acta.*, 50 (10): 2263-2379.
- Leiss, B. & Ullemeyer, K., 1999: Texture characterisation of carbonate rocks and some implications for the modelling of physical anisotropies, derived from idealized texture types. *Z. dt. geol. Ges.*, 150: 259-274.

- Logan, J.M., Hadedt, M., Lehnert, D. & Denton, M., 1993: A case study of the properties of marble as building veneer. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanics* 30, 1531-1537.
- MacInnis, I.N. & Brantley, S.L., 1992: The role of dislocations and surface morphology in calcite dissolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56: 1113-1126.
- Meccheri, M., Molli, G., Conti, P., Blasi, P. & Vaselli, L., 2007: The Carrara marbles (Alpi, Apuane, Italy): a geological and economical updated review. *ZDGG* 158/4 (im Druck)
- Monk, C.B., 1985: The rational use masonry. *Proc. third North Am. Masonary Conf., Constr. Res. Ctr. Civ. Engrg. Dept. Univ. of Texas*: 191-227; Arlington, Texas.
- Monte, M., Sabbioni, C. & Zappa, G., 1992: The origin of calcium oxalates on historical buildings, monuments and natural outcrops. *Science of the Total Environment* 67:17-39.
- Nimis, P.L., Pinna, D. & Salvadori, O., 1992: *Licheni e conservazione dei monumenti*, CLU Editrice, Bologna (Italy).
- Nur, A. & Simmons, G., 1969: The effect of saturation on velocity in low porous rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 7: 183-193.
- O'Connell, R.J. & Budiansky, B., 1974: Seismic velocities in dry and saturated cracked solids, *J. Geophys. Res.*, 79(35): 5412-5426.
- Ondrasina, J., Kirchner, D. & Siegesmund, S., 2002: Frost-/Thaw cycles and their influence on marble deterioration: a long-term experiment. In: Siegesmund, S., Weiss, T. & Vollbrecht, A. (eds.): *Natural stones, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*. Geological Society Special Publication, 205, 1-10.
- Poschlod, K., 1990: Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluß auf die Verwitterung. *Münchener Geowiss. Abh. B* 7.: 1-62.
- Rosenholtz, J.L., Smith, D.T., 1949: Linear thermal expansion of calcite, var. Iceland spar, and Yule Marble. *The American Mineralogist* 34, 846-854.
- Ruedrich, J., Kirchner, D., Seidel, M. & Siegesmund, S., 2005: Deterioration of natural building stones induced by salt and ice crystallisation in the pore space as well as hygric expansion processes. In: Siegesmund, S., Auras, M., Ruedrich, J. & Snethlage, R. (eds), *Geowissenschaften und Denkmalpfleg. Z. dt. geol. Ges*, 156/1: 59-73.
- Ruedrich, J., Hertrich, M., Just, A., Siegesmund, S., Yaramanci, U. & Jacobs, F., 2004: Construction physics of the Market Gate of Miletus discovered by non-destructive tools. *Proceedings 10<sup>th</sup> International congress on deterioration and conservation of stone*, in press; Stockholm (Elsevier).
- Ruedrich, J., 2003: *Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore*. Diss. Universität Göttingen: S. 158.
- Ruedrich, J., Weiss, T. & Siegesmund, S., 2001: Deterioration characteristics of marbles from the Marmorpalais Potsdam (Germany): a compilation. *Z. dt. geol. Ges*, 152: 637-664.
- Sage, J.D., 1988: Thermal microfracturing of marble. In: Marinos, P. & Koukies, G. (eds.) *Engineering Geology of Ancient Works*, Balkema, Rotterdam: 1013-1018.
- Scheffzük, C., Siegesmund, S., Nikolayev D.I., & Hoffmann, A., 2007: Texture, spatial and orientation dependence of internal strains in marble: a key to understanding the bowing of marble panels? In: Prikryl R, Smith BJ (eds.) *Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation*. Geological Society, London, Special Publications, 271 pp 237-249.

- Scheffzük, C., Siegesmund, S. & Koch, A., 2004: Strain investigations on calcite marbles using neutron time-of-flight diffraction. In: Siegesmund S, Viles H, Weiss T (eds) Stone Decay Hazards. Environmental Geology 46, pp 468-476
- Schwarz, A., Lehlhorn, L., Boue, A. & Mangels, H., 1991a: Bewitterung von Natursteinen mit schadgashaltiger Luft - orientierende Simulationsversuche in einer Doppelklimakammer, Teil 1. Bautenschutz und Bausanierung, 14: 85-97.
- Schwarz, A., Lehlhorn, L., Boue, A. & Mangels, H., 1991b: Bewitterung von Natursteinen mit schadgashaltiger Luft - orientierende Simulationsversuche in einer Doppelklimakammer, Teil 2. Bautenschutz und Bausanierung, 14: 108-110.
- Siegesmund, S., Mosch, S., Scheffzük, C. & Nikolayew, D. 2007: The bowing potential of granitic rocks: Rock fabrics, thermal properties and residual strain. Environmental Geology, 55/7: 1437-1448.
- Siegesmund, S., Koch, A. & Ruedrich, J., 2007b: Fassadenplatten aus Marmor: Verwitterungsdynamik und Verbiegungspotentiale. Z. dt. geol. Ges., Band 158: 631-647.
- Siegesmund, S. & Steiger, M., 2007: Salt decay. Environmental Geology, 52: 420 p.
- Siegesmund, S. & Ehling, A., 2007: Rohstoff Naturstein. Z. dt. geol. Ges., Band 158 Heft 3/4: 349-1087.
- Siegesmund, S., Weiss, T., Ruedrich, J. & Schwarzburg, R., 2005a: Marmortumben auf dem Jüdischen Friedhof Hamburg – Altona – Verwitterungsstatus und Provenienzanalyse. In: Siegesmund, S., Auras, M., & Snethlage, R. (Hrsg.), Stein: Zerfall und Konservierung, Edition Leipzig, 188-193.
- Siegesmund, S., Auras, M. & Snethlage, R., 2005b: Stein: Zerfall & Konservierung. Edition Leipzig: S. 311.
- Siegesmund, S., Auras, M., Ruedrich, J. & Snethlage, R., 2005c: Geowissenschaften und Denkmalpflege. Z. dt. geol. Ges., Band 156 Heft 1: S. 238.
- Siegesmund, S., Ruedrich, J. & Weiss, T., 2004a: Marble deterioration. Dimension Stone, Prikryl, R. (ed.). Taylor & Francis Group, London 2004: 211-217.
- Siegesmund, S., Viles, H. & Weiss, T., 2004b: Stone decay hazards. Environmental Geology, Vol. 46 Number 3-4: 303-532.
- Siegesmund, S., Weiss, T. & Vollbrecht, A., 2002: Natural stones, weathering phenomena, conservation strategies and case studies. Geological Society Special Publication, 205: S. 448.
- Siegesmund, S., Ullemeyer, K., Weiss, T. & Tschegg, E.K., 2000: Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. International Journal of Earth Science, 89: 170-182.
- Siegesmund, S., Weiss T., Vollbrecht A. & Ullemeyer K., 1999a: Marble as a natural building stone: rock fabrics, physical and mechanical properties. Z. dt. geol. Ges., 150: 237-257, Stuttgart.
- Siegesmund, S., Vollbrecht, A., Weiss, T. & Snethlage, R., 1999b: Marmorkonservierung. Z. dt. geol. Ges., Band 150 Teil 2: 197-406.
- Siegesmund, S., Vollbrecht, A., Ullemeyer, K., Weiss, T. & Sobott, R., 1997: Application of geological fabric analyses for the characterization of natural building stones - case study Kauffung marble. International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, 3: 269-292.

- Siegesmund, S., 1996: The significance of rock fabrics for the geological interpretation of geophysical anisotropies. *Geotekt. Forsch.*, 85: S. 123.
- Siegesmund, S. & Dahms, M., 1994: Fabric-controlled anisotropy of elastic, magnetic and thermal properties. In: Bunge, H.J., Siegesmund, S., Skrotzki, W. & Weber K. (eds.), *Textures of Geological Materials*. DGM Informationsgesellschaft, Oberursel: 353-379.
- Simon, S. & Snethalge, R., 1993: The first stages of marble weathering, preliminary results after short-term exposure of nine month. *Forsch.-Ber.* 11/1993 ( Eurocare-Euromarble EU 496): 37-44; München (Bayer. Landesamt für Denkmalpflege).
- Snethalge, R., Ettl, H. & Sattler, L., 1999: Ultraschalluntersuchungen an PMMA-getränkten Marmorskulpturen. *Z. dt. geol. Ges.*, 150: 387-396.
- Thomassen, S.E., Ewart, C.S., 1984: Durability of thin-set marble. *Proceedings of the 3rd International Conference on Durability of Building Materials and Components*; American
- Tschegg, E., Widhalm, C. & Eppensteiner, W., 1999: Ursachen mangelnder Formbeständigkeit von Marmorplatten. *Z. dt. geol. Ges.*, 150, 283-298.
- Tvergaard, V. & Hutchinson, J.W. (1988): Microcracking in ceramics induced by thermal expansion or elastic anisotropy. *J. Am. Ceram. Soc.*, 71 (3): 157-166.
- Watson, B.E. & Brenan, J.M., 1987: Fluids in the lithosphere; 1. Experimentally-determined wetting characteristics of CO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub> O fluids and their implications for fluid transport, host-rock physical properties, and fluid inclusion formation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 85 (4): 497-515.
- Weiss, T., Siegesmund, S. & Fuller, E.R., 2003: Thermal degradation of marbles: Indications from finite element modelling. *Building and Environments* 38: 1251-1260.
- Weiss, T., Siegesmund, S. & Fuller, E.R., 2002: Thermal stresses and microcracking in calcite and dolomite marbles via finite element modelling. In: Siegesmund, S., Weiss, T. & Vollbrecht A. (eds.), *Natural stones, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*. Geological Society Special Publication, 205: 81-94.
- Weiss, T., Siegesmund, S. & Rasolofosaon, P.N.J., 2000: The relationship between deterioration, fabric, velocity and porosity constraint. *Proceedings 9<sup>th</sup> International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice*: 215-223.
- Weiss, T., Leiss, B., Oppermann, H. & Siegesmund, S., 1999: Microfabric of fresh and weathered marbles: Implications and consequences for the reconstruction of the Marmorpalais Potsdam. *Z. dt. geol. Ges.*, 150: 313-332; Stuttgart.
- Widhalm, C., 1998: Anisotrope physikalische Eigenschaften und Formbeständigkeit von Marmorwerkstoffe. *Diss. Technische Universität Wien*.
- Widhalm, C., Tschegg, E. & Eppensteiner, W., 1996: Anisotropic thermal expansion causes deformation of marble cladding. *J. of Performance of Constructed facilities, ASCE*, 10: 5-10.
- Wilson, F., 1989: The perils of using thin stone and safeguards against them. *Arch. The AIA J.*, 78(2): 96-97; New York.
- Winkler, E.M., 1996: Technical Note: Properties of Marble as building veneer. *Int. J. Rock. Mech. Mine. Sci & Geomech. Abstr.*, 33 (2): 215-218.
- Zeisig, A., Siegesmund, S. & Weiss, T., 2002: Thermal expansion and its control on the durability of marbles. In: Siegesmund, S., Weiss, T. & Vollbrecht, A. (eds.): *Natural*

stones, weathering phenomena, conservation strategies and case studies. Geological Society Special Publication, 205, 65-80.

Zeza, U., Mssara, E.P., Massa, V. & Venchiarutti, D., 1985: Effect of temperature on intergranular decohesion of the marbles. Proceedings 5<sup>th</sup> Int. Congr. on Deterioration and Conservation of Stone, Lausanne, Vol. 1: 131-140.

Abschlußbericht 2011

# Entwicklung und Überprüfung von Einhausungssystemen zur Reduzierung umweltbedingter Schädigungen von außenexponierten Marmorobjekten

Objektkomplex: Schlossbrückenfiguren Unter den Linden, Berlin

vorgelegt von:

Institut für Bauklimatik  
Fakultät Architektur  
Technische Universität Dresden

Dr.- Ing. Rudolf Plagge

Dipl.-Ing. Christian Conrad, Dipl.-Ing. Heiko Fechner, Dipl.-Ing. Philipp Heinze, Cand.-Ing. Sören Klose,  
Dipl.-Ing. Uwe Meinold, Dipl.-Ing.(FH) Frank Meissner, Dipl.-Ing. Ulrich Ruisinger, MSc. Jianghua Zhao

# Entwicklung und Überprüfung von Einhausungssystemen zur Reduzierung umweltbedingter Schädigungen von außenexponierten Marmorobjekten

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Entwicklung einer innovativen Einhausung	3
1.1 Umsetzung eines Architekturmodells im Rahmen eines Wettbewerbs unter Studierenden	7
1.2 Gestalterischer Entwurf innovativer Einhausungen unter Berücksichtigung des städtebaulichen Ensembles	9
2. Experimentelle Untersuchungen am Carrara Marmor und unterschiedlichen Einhausungsfolien	10
2.1 Bestimmung der hygrothermischen Materialkennwerte	10
2.1.1 Beprobung	11
2.1.2 Beschreibung der einzelnen Kennwerte und Messverfahren	12
2.1.3 Zusammenfassung der Messergebnisse	24
2.2 Erstellung von Materialfunktionen	25
2.2.1 Physikalisch basierte Materialfunktionen und deren Anpassung	25
2.2.2 Kalibrierung des Materialmodells und der Materialfunktionen	29
3. Numerische Simulation von Einhausungssystemen	37
3.1 Das Simulationsprogramm DELPHIN 5 <sup>®</sup>	37
3.2 Simulation unterschiedlicher Einhausungssysteme	39
4. Exemplarische Darstellung der Simulationsergebnisse	48
4.1 Holzeinhausung, Nordorientierung, Luftwechselrate $n = 2.5$	48
4.2 Holzeinhausung, Nordorientierung, Vergleich unterschiedlicher Luftwechselraten $n = 0.1$ , $n = 0.5$ und $n = 2.5$	59
4.3 Einfluss der Orientierung am Beispiel der transparenten PE-Folie mit $s_d = 6\text{m}$ und Luftwechselrate $n = 0.1$	78
4.4 Vergleich unterschiedlicher Einhausungssysteme bei verschiedenen Luftwechselraten $n = 0.1$ , $n = 0.5$ und $n = 2.5$	80
4.5 Vergleich unterschiedlicher Einhausungssysteme an verschiedenen Positionen der Marmorskulpturen, Nordorientierung und Luftwechselrate $n = 0.1$	82
5. Auswertung und Interpretation der Simulationen	90
5.1 Belastungskennzahlen	91
5.2 Tabellarische Ergebnisse und Auswertungen	92
6. Literatur	98

## 1. Entwicklung einer innovativen Einhausung

Die gestalterische Umsetzung eines Architekturmodells für die Einhausung der Marmorskulpturen wurde im Rahmen eines Studentenwettbewerbes an der Fakultät Architektur der TU Dresden realisiert. Auf der Basis eines Kriterienkatalogs für die Einhausungsmaterialien und für das Einhausungssystem wurde von den Studierenden unter Betreuung ein Architekturmodell entworfen. Der Kriterienkatalog wurde dabei erarbeitet und vorgegeben von dem Projektteam, bestehend aus

- Landesdenkmalamt Berlin, LDA,
- Institut für Bauklimatik, IBK, der TU Dresden
- Abteilung Strukturgeologie und Geodynamik, GZG, der Universität Göttingen
- Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM
- sowie von den Betreuern aus den Fachgebieten Grundlagen des Entwerfens, Denkmalpflege und Entwerfen und Institut für Bauklimatik der TU Dresden.

Unterstützt wurden die Arbeiten durch Exkursionen zu den Figuren nach Berlin, sowie Veranstaltungen im Landesdenkmalamt und in dem Museumslager, in dem Kopien der Figuren von nächster Nähe beobachtet werden konnten.

Die entwickelten Entwürfe wurden einer bauphysikalisch, bauklimatischen Bewertung unterzogen und auf ihre statisch-konstruktive Realisierbarkeit geprüft. Aus den vorliegenden Architekturmodellen wurde 3 geeignet Einhausungen durch eine Jury nominiert.

Im Folgenden werden die Wettbewerbsaufgabe und der Kriterienkatalog als wesentliche Grundlage der Entwicklung einer innovativen Neueinhausung dargestellt.

### Anlass des Wettbewerbs

Unter freiem Himmel exponierte Skulpturen erleiden in unseren Breitengraden durch die Einflüsse der Witterung in Verbindung mit Schadstoffemissionen erhebliche Substanzverluste. Die seit 1986 wieder an ihrem ursprünglichen Standort aufgestellten Marmorfiguren der Schlossbrücke zeigen heute an der Oberfläche starke Verwitterungserscheinungen, die auf chemische Lösungsvorgänge zurückzuführen sind. Die starke Reliefbildung weist auch darauf hin, dass die Objekte von der für Marmor charakteristischen Gefügeentfestigung durch Mikrorisse im Inneren betroffen sein können. Carrara Marmor gehört in dem Zusammenhang zu einem besonders gefährdeten Material. Auffällig ist auch, dass die Figuren trotz zahlreicher Restaurierungsmaßnahmen und einer gründlichen Reinigung vor 13 Jahren u.a. bedingt durch das hohe Verkehrsaufkommen Unter den Linden mit durchschnittlich 32.000 Fahrzeugen täglich bereits wieder starke Verschmutzungen aufweisen. Gasförmige Verbindungen und feste Schmutzpartikel wie Russ, Feinstaub, Gummiabrieb etc. sind neben mikrobiologischer Kolonisation für die Verschmutzung und die Beanspruchung oberflächennaher Bereiche ursächlich. Für die Erhaltung dieser Figuren am überlieferten Standort besteht daher ein akuter Handlungsbedarf.

Aufgrund der herausragenden künstlerischen, geschichtlichen und städtebaulichen Werte sieht das Landesdenkmalamt Berlin in der kontinuierlichen Pflege der Skulpturen „Unter den Linden“ ein konservatorisches Kernanliegen. In diesem Pflegekatalog ist eine Einhausung der Schlossbrückenskulpturen im Winter vorgesehen, weil eine traditionelle Holzeinhausung die schädigenden Einwirkungen auf die Skulpturen nachweislich reduziert.

Europaweit ist kein Einhausungssystem bekannt, welches den erforderlichen gestalterischen, bauphysikalischen und statisch-konstruktiven Anforderung genügt. Es soll erstmals ein Einhausungssystem entwickelt werden, welches die hohen ästhetischen Ansprüche an Objekte in exponierten Lagen im Zentrum pulsierender Städte erfüllt. Wünschenswert ist dabei, dass die Skulpturen auch in eingehaustem Zustand erlebbar bleiben und die herausragende künstlerische Qualität der Skulpturen zur Geltung gebracht wird. Dafür gibt es zwar bereits Beispiele, doch wurden die klimatischen Einflüsse dieser Einhausungen auf die Natursteinskulpturen nicht weiter untersucht.

Ziel des Projektes ist es, den Prototyp eines Einhausungssystems zu entwickeln, welches über den gewählten Typus von Brückenskulpturen hinaus für den nachhaltigen Substanzschutz von Marmorskulpturen mit spezifischen Anforderungsprofilen modellierbar sein wird.

## Die Schlossbrückenfiguren

Die Berliner Bildhauerschule des 19. Jahrhunderts hatte Weltgeltung. Die Bildhauerei wurde als eine wesentliche „offizielle Kunst“ begriffen, welche Aufgaben von höchstem öffentlichem Interesse wahrzunehmen hatte. Man wollte verewigt sehen, was als schätzenswert und vorbildlich galt.

Die 1822-24 nach Entwurf von Karl Friedrich Schinkel errichtete massive dreibogige Gewölbebrücke ersetzte die seit dem 16. Jahrhundert bestehende hölzerne "Hundebrücke". Die Schlossbrücke mit ihren Skulpturen stellt einen wesentlichen Beitrag zum Skulpturenprogramm Unter den Linden dar. Auf den steinernen Strompfeilern der Brücke setzen hohe Sockel aus rotem Granit auf, die als Postamente für die überlebensgroßen Skulpturengruppen dienen. Zwischen den Postamenten sind gusseiserne Brückengeländer mit Seepferden, Tritonen und Delphinen angebracht. Erst 1842-57 wurde die Schlossbrücke vollendet mit den acht ebenfalls von Schinkel projektierten Figurengruppen – antike Göttinnen (Nike und Athene) mit jungen Kriegern - die in Carrara-Marmor von Bildhauern der Schadow- und Rauch-Schule ausgeführt wurden. Mit Rauchs Kunst wirkt die Berliner Schule Schadows fort. Den Stil der Griechen als das Ideal des Klassizismus zum Vorbild blieb seine Kunst stets personal gebunden. So kam es zu jener Denkmalkunst, in der sich humanistische Idealität mit dem konkret fassbaren Individuum verband oder umgekehrt der profilierte Einzelne zu einer idealen Norm menschlichen Verhaltens überhöht wurde. Die historische Leistung des Bildhauers Christian Daniel Rauch besteht darin, dass er für dieses Menschenbild die adäquate Form fand. Allein die Objektivierbarkeit des Typischen konnte schulbildend werden.

Der Figureschmuck der Schlossbrücke wurde zu einem großen Gemeinschaftswerk der Berliner Bildhauerei. Lehrhaft und narrativ wie das entgeltige ikonografische Programm ist auch der Stil der meisten dieser Gruppen. Die Figuren der Schlossbrücke gehören zu den aufwendigsten Ensembles des 19. Jahrhunderts. Die noble Gesinnung, das Streben nach mythologischer Idealität und humaner Allgemeingültigkeit wird deutlich, wenn man diese Anlage mit einem ähnlichen Projekt der Epoche Wilhelms II. vergleicht. Schinkel schrieb über sein Konzept: „Der Gegenstand erfordert ... viel Zeit zur Bearbeitung und viel Nachdenken, da hier besonders das Ästhetische der Hauptzweck wird...“

Die Schlossbrücke gehört zu den herausragendsten Bauten des Klassizismus in Berlin und ist wohl die schönste Brücke der Stadt.

### Der städtebauliche Kontext unter historischem Blickwinkel

Die Schlossbrücke über dem Spreekanal verbindet die Straße Unter den Linden mit dem Lustgarten und wurde seit der Anlage der Linden die wichtigste Verkehrsverbindung in Mitte von Ost nach West. Damit erhielt diese Achse ihre bis heute gültige Prägung: als Pendant zum Brandenburger Tor im Westen entstand die Schlossbrücke im Osten als krönender Abschluss der Linden und zugleich als Überleitung zum wichtigsten Platz der Stadt, dem Schlossplatz. Durch die Verbreiterung der Brücke auf die volle Breite der Straße und ihren monumentalen Aufbau mit Figureschmuck erschien die Straße Unter den Linden vom Brandenburger Tor bis zum Schloss erstmals als durchgehende Achse. Zusammen mit der gleichzeitigen Umgestaltung des Lustgartens und dem Neubau der Wache schuf Schinkel eine großzügige und stimmige Stadtanlage, die die vornehmsten Monumente der Stadt ihrer Bedeutung entsprechend zur Geltung brachte.

Der Neubau der Schlossbrücke war auch ein wesentlicher Bestandteil eines umfassenden Denkmalprojektes im Rahmen der 1816 beginnenden städtebaulichen Neuordnung des Bereichs zwischen Schloss und Opernplatz. In der Tradition der Figurenprogramme für den Wilhelmplatz unter Friedrich II. und Friedrich Wilhelm II. und als Ausdruck des im Widerstand gegen Napoleon erstarkten Nationalbewusstseins sollten preußische Heeresführer der eben siegreich beendeten Befreiungskriege geehrt werden. Die Figurengruppen – antike Göttinnen mit jungen Kriegern - und Reliefs mit preußischem Adler ergänzten das Programm der Neuen Wache als Denkmal für diese Befreiungskriege und bildete zusammen mit den Standbildern der Generäle vor und gegenüber der Wache einen Teil der nun als Siegesallee, als "Via Triumphalis" aufgefassten Hauptstraße der Stadt, die als Konzept eines Jahrzehnts in Europa ihresgleichen sucht. Die Errichtung des Reiterdenkmals Friedrich II. im Jahr 1851 erbrachte schließlich dem auf das Herrscherhaus bezogenen östlichen Teil der Straße Unter den Linden den krönenden Abschluss.

Die Brücke ist ein Teil der bedeutenden Stadtplanungen Schinkels, der dem Stadtzentrum durch seine Bauten ein neues Erscheinungsbild gab, das bis heute entscheidend die Stadt prägt.

## Der städtebauliche Kontext heute

In den 1920er Jahren bestand eine vorrangige Aufgabe der Berliner Stadtplanung darin, die innerstädtischen Verkehrsprobleme zu lösen, um der zunehmenden Anzahl von Kraftfahrzeugen gerecht zu werden, wobei immer wieder dafür gerungen wurde, dass die Verkehrlenkung vor der Denkmalerhaltung steht. Ein Planungsthema war die Schaffung einer Ost-West-Achse, welche 1871 begonnen, 1906 weitergeführt und in den 20er Jahren vollendet werden sollte, in westlicher Richtung zur Kaiser-Wilhelm-Straße, östlich an die Schönhauser- und die Prenzlauer Allee anschließend. Im Interessengebietsplan von 1938 sollten für den ungehinderten Verkehrsfluss in die Innenstadt die Seitenpavillions des Brandenburger Tores entfernt werden.

1962 begann der Wiederaufbau des westlichen Abschnitts der Straße Unter den Linden, wobei Pläne der 1920er Jahre Beachtung fanden, also unmittelbar nach dem Mauerbau, der die Straße zur Sackgasse degradiert hatte. Der grundsätzliche Wechsel in der DDR-Baupolitik, die Wende von der handwerklich geprägten historisierenden Architektur der "Nationalen Tradition" zu industriellen Baumethoden, wurde im westlichen Teil der Linden unter Verwendung von Stahlbeton und großen Glasflächen konsequent umgesetzt. Trotz des architektonischen Kontrasts zwischen dem wieder hergestellten historischen Ambiente des östlichen Abschnittes mit Zeughaus, Oper und Humboldt-Universität und dem modern gestalteten westlichen Abschnitt ist durch städtebauliche Festlegungen das historische Gesamtbild der Straße mit offenem Forum im Osten und dem geschlossenen Straßenraum der Lindenallee im Westen erhalten geblieben.

Trotz der hohen Verluste während des 2. Weltkrieges liefern uns heute noch die im Stadtbild und im besonderen die Unter den Linden vertretenen Denkmäler ein kulturgeschichtliches Panorama der Berliner Bildhauerschule des ausgehenden 18. und vor allem des 19. Jahrhunderts.

Die im Krieg ausgelagerten 1950-60 in West-Berlin restaurierten Skulpturengruppen der Schlossbrücke wurden in den 1980er Jahren wieder am ursprünglichen Standort aufgestellt.

Die Schlossbrückefiguren flankieren heute eine pulsierende Großstadtstrasse mit hohem Touristen- und Verkehrsaufkommen (33.000 Fahrzeuge täglich), gelegen in der Pufferzone der zum Weltkulturerbe gehörenden Museumsinsel.

## Denkmalverträglichkeit

Die Schlossbrücke im Berliner Bezirk Mitte ist ein Denkmal von besonderem Rang: Sie verbindet den Lustgarten mit der Straße Unter den Linden und trägt in dieser städtebaulich exponierten Lage mit einem skulpturalen Programm von bedeutenden Bildwerken Rechnung.

Jede Baumaßnahme an der Brücke und ihren Statuen sollte in Bezug auf das Umfeld und die Bedeutung des Bauwerks an sich auf seine Angemessenheit überprüft werden.

Besonders zu beachten wären dabei der Ensemblecharakter der Gesamtanlage und die Denkmalverträglichkeit der baulichen Maßnahme.

Im Zusammenhang mit einer Einhausung der Skulpturen ist es wünschenswert, dass das städtebauliche Erscheinungsbild sowohl im Straßenraum wie auch im Bezug zu den umgebenden Bauten und auch in der Ansicht vom Wasser her behutsam und respektvoll behandelt wird.

Die zu entwickelnden temporären Einhausungen müssen zerstörungsfrei montierbar sein. Sie sollten dem Bildprogramm und dem städtebaulichen Umfeld entsprechend angemessen gestaltet sein. In diesem Zusammenhang wäre zu überprüfen, ob die Gestaltung der Einhausungen Aussagen über den Inhalt der Bildwerke zulässt, indem beispielsweise den Passanten Einblicke in die Einhausungen gewährt werden.

### 1.1 Umsetzung eines Architekturmodells im Rahmen eines Wettbewerbs unter Studierenden

Aufgabenstellung: Entwickeln Sie für die Skulptur „Nike lehrt den Knaben Heldensagen“ (entstanden 1847 durch Emil Wolff), die erste Skulptur in der narrativen Folge des Ensembles der Berliner Schlossbrücke eine Einhausung, die Skulptur und Sockel während der Wintermonate vor schädlichen Umwelteinflüssen schützt.

#### Anforderungsprofil

##### Gestalterische Anforderungen

- Städtebau und Denkmalpflege
- Einbindung in die räumliche Situation
- Städtischer und stadthistorischer Kontext
- Angemessenheit in Bezug auf das Skulpturenprogramm „Unter den Linden“

##### Idee, Konzept, Form

- Beziehung von Konstruktion und Form
- Beziehung von Form und Inhalt
- Proportion und Materialität
- Farbigkeit und Oberfläche
- Erlebbarkeit der Skulpturen

##### Technische Anforderungen

###### Konstruktion

- Statik, Festigkeit (z.T. enorme Windlast!), geringes Eigengewicht
- Dauerhaftigkeit (Langzeitstabilität)
- Leichte Montierbarkeit und berührungsarme Montag
- evtl. variabler konstruktiver Aufbau und damit freie Skalierbarkeit für Skulpturen

- unterschiedlicher Größe und Form
- Eignung für Transport und Einlagerung
- Fügung und Fugenausbildung
- Unproblematische Reinigung und hohe Schmutzunempfindlichkeit
- Sicherheit, Verletzungsgefahr,
- Unempfindlichkeit gegen Vandalismus und Graffiti

#### Material

- Beachtung der Anforderungen an die gewählten Materialien nach DIN
- Platten- oder Plattenmaterial?
- Verformbarkeit und Fügbarkeit
- Festigkeiten: Bruch-, Wetterreißfestigkeit etc
- Umweltverträglichkeit der Materialien, Entsorgung, Wieder- Verwendbarkeit, Dauerhaftigkeit (Verwitterungsunempfindlichkeit / Langzeitstabilität, UV-Beständigkeit)
- Unproblematische Reinigung und hohe Schmutzunempfindlichkeit
- Transparenz und Lichtdurchlässigkeit (sichtbares Licht, UV-Licht, IV-Strahlung) hohe Durchlässigkeit für sichtbares Licht, jedoch hohes Filtervermögen der UV- und IR-Strahlung in Zusammenhang mit den bauphysikalischen Anforderungen
- Alterung, Patina
- Brandschutz: Entflammbarkeit, Brennbarkeit
- Reflektion, Blendschutz bei künstlicher Beleuchtung (Autoverkehr!)

#### Bauphysikalische Anforderungen

- Schutz der Skulpturen vor Umwelteinflüssen (chemische, physikalische und biologische: Niederschläge, Reduzierung der Temperaturschwankungen, Sonnenstrahlung, Emission, Immission u.a.)
- Berücksichtigung der Auswirkungen der Umwelteinflüsse auf das Innenklima (Mikroklima / Makroklima) und in Folge auf den Carrara-Marmor (z.B. Berücksichtigung der unterschiedlichen Strahlungsanteile auf das Innenklima in einer transparenten Einhausung)

#### Wirtschaftlichkeit

- Herstellungskosten
- Betriebskosten

#### Leistungen

Es sind zwei Blatt DIN A1 Hochformat abzugeben, auf denen folgende Leistungen enthalten sein müssen:

- A Schnitt, M 1:20
- B Grundriss, M 1:20
- C Ansicht von der Straßenmitte gesehen, M 1:20

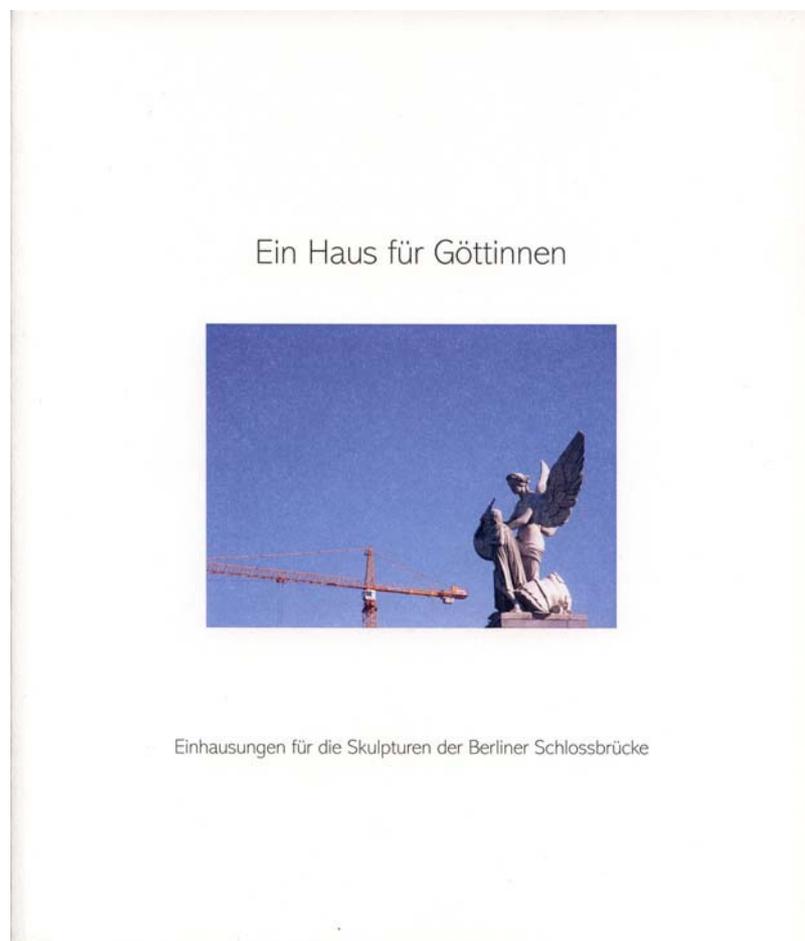
- D Perspektivische Ansicht in einer Fotomontage unter Verwendung des dafür vorgesehenen Fotos
- E Modell M 1:20
- F Erläuterungsbericht, max. 2 Seiten mit konzeptionellen und technischen Angaben

Die Pläne werden neben dem Blatt A0 querformatig auch digital (CD mit pdf A2 in der Qualität 600 dpi) benötigt. Auf die Lesbarkeit der Pläne ist zu achten!

## 1.2 Gestalterischer Entwurf innovativer Einhausungen unter Berücksichtigung des städtebaulichen Ensembles

Die vorliegenden Entwürfe wurden konsistent zusammengetragen und unter dem Titel „Ein Haus für Göttinnen“ in Form einer Buchpublikation veröffentlicht. Der hochwertige Buchdruck wird an Bibliotheken und Interessierte versendet.

Neben dem Expertenkolloquium als „Projekt Start Up“, das am 12.10.2007 im Rittersaal, Am Kölnischen Park in Berlin stattfand, ist die Buchpublikation die zweite Maßnahme zur Projektinformation und zum Transfer der Projektinhalte in die Öffentlichkeit.



## 2. Experimentelle Untersuchungen am Carrara Marmor und unterschiedlichen Einhausungsfolien

Die hygrothermische Charakterisierung des Marmors der Skulpturen „Unter den Linden“ erfordert dabei eine große Anzahl von Probekörpern. Die wertvollen originalen Carrara Marmor Skulpturen lassen eine Probenahme in dem erforderlichen Umfang nicht zu. Zur Verfügung standen jedoch 4 Probekörper aus früheren Untersuchungen, die umfangreichen Messungen unterzogen wurden. Vom Projektpartner GZG wurden diese Proben u.a. mineralogisch analysiert und vergleichbarer Carrara Marmor aus den originalen Lagerstätten in hinreichender Menge beschafft. Dieses Material repräsentiert die inneren Kernbereiche der Marmor Skulpturen „Unter den Linden“. Nach deren Konditionierung, siehe Bericht GZG, erfolgten die Materialuntersuchungen an diesen neu beprobten Carrara Marmorblöcken. Lediglich die komplexen Feuchtetransportexperimente wurden an den historischen Proben durchgeführt und anschließend über ein Materialmodell an die Ergebnisse der neuen Marmorproben adaptiert.

Im Folgenden werden die durchgeführten Messungen an den Marmorproben vorgestellt und die erhaltenen Ergebnisse erörtert.

### 2.1 Bestimmung der hygrothermischen Materialkennwerte

Die hygrothermischen Kennwerte beschreiben den Feuchte- und Wärmetransport sowie die dort ablaufenden Speichervorgänge in dem porösen Material. Die hygrothermische Simulation erfordert dabei die Kenntnis der in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgeführten Kennwerte. Für ein besseres Verständnis bei der Beurteilung und beim Einsatz der Kennwerte werden im Folgenden kurz deren Bedeutung und die zugehörigen Messverfahren aufgeführt.

Tabelle 2.1: Auflistung erforderlicher bauphysikalischer Materialkenndaten mit Bezeichnung und Einheiten.

Kennwert	Formelzeichen	Einheit
Rohdichte	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]
Spezifische Wärmekapazität	$c_p$	[J/(kgK)]
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_r$	[W/(mK)]
Offene Porosität	$\Phi_o$	[Vol.-%]

hygrische Sorptionsisotherme	$\theta_{(\varphi)}$	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$
Wasserretention	$\theta_{(\psi)}$	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$
Freie Wassersättigung	$\theta_{(\text{sat})}$	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$
Wasseraufnahmekoeffizient	$A_w$	$[\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})]$
Kapillare Wasserleitfähigkeit	$k_{\theta}$	$[\text{s}]$
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	$\mu$	$[-]$

### 2.1.1 Beprobung

Die Messung der relevanten Materialeigenschaften erfordert den Einsatz zahlreicher Messmethoden, die häufig unterschiedliche Probendimensionen, Abdichtungstechniken oder Messzellen benötigen. Aufgrund der erforderlichen, langwierigen Ausgleichszeiten für Marmor besteht die Notwendigkeit die Materialdaten und Kennwerte über Parallelmessungen zu bestimmen. Zur Beprobung werden daher insgesamt 121 Probekörper randomisiert aus den zur Verfügung stehenden Materialblöcken entnommen und in einem Probenkollektiv mit einer gewissen Anzahl von Wiederholungen zusammengestellt. Den Umfang des gesamten Probenkollektivs gibt Tabelle 2.2 wieder.

Tabelle 2.2: Probenkollektiv der untersuchten Carrara Marmor Proben.

Probengröße	Wiederholungen
Prismen 70 x 70 x 20 mm	10
Prismen 40 x 40 x 10 mm	96
Prismen 40 x 40 x 50 mm	10
Prismen 40 x 40 mm x 110 mm	5

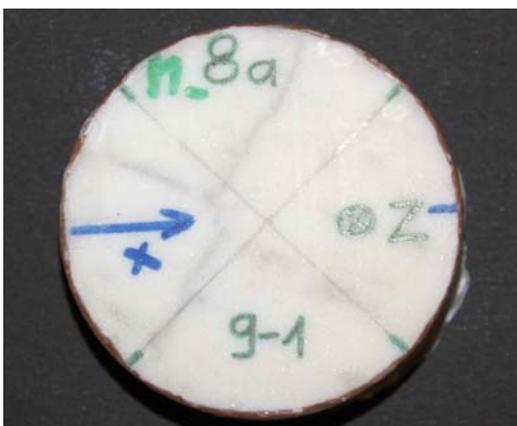


Abbildung 2.1: Bildhafte Darstellung des untersuchten Carrara Marmors in einer grob skaligen Darstellung (links Probekörper), wie auch einer fein skaligen Vergrößerung (rechts).

Nach der Beprobung werden vor den eigentlichen Messungen weitere Arbeitsschritte erforderlich, die nachfolgend aufgelistet sind:

- Metrische Messung der Probengeometrien zur Berechnung der Flächen und Volumina
- Bestimmung der Trockenmassen der Proben nach einer materialabhängigen Trocknung
- Präparation von Probekörpern; z.B. Einbau der Körper in Acrylfließzellen, laterale Probenabdichtung, Bohrung von Hohlräumen für die Aufnahme von Sensoren, etc.
- Bestimmung der Gesamtmassen der Proben nach der Präparation
- Probenkonditionierung: Lagerung der Marmorproben bei den erforderlichen experimentellen Bedingungen, z.B. kapillare Aufsättigung der Proben auf speziellen Keramiken, Lagerung bei bestimmten Luftfeuchte für die Wasseraufnahme, bzw. Wasserdampfdiffusion, etc.

### 2.1.2 Beschreibung der einzelnen Kennwerte und Messverfahren

Zur Bewertung des Carrara Marmors sind experimentelle Messungen der hygothermischen Materialeigenschaften erforderlich. Eine allgemeine Dokumentation der verwendeten Messmethoden kann den folgenden Seiten entnommen werden.

#### Feststoffdichte, Trockenraumdichte und Porosität

Die Feststoffdichte,  $\rho_m$ , auch als Partikeldichte bezeichnet, entspricht der Dichte der festen Matrix und berechnet sich aus dem Verhältnis der Gesamtmasse des Feststoffs bezogen auf das Feststoffvolumen ohne Porenräume [kg/m<sup>3</sup>]. Die Feststoffdichte wird mit einem Helium-Pycnometer bestimmt. Im Messgerät sind zwei Kammern vorhanden, eine davon mit variablem Volumen. Zu Messbeginn wird das Volumen der unbefüllten Probenkammer auf die gleiche Größe der Referenzkammer eingestellt. Dazu wird mit Hilfe von Hubkolben in beide zuvor evakuierte Kammern die gleiche Menge Helium eingebracht und das Volumen der veränderlichen Kammer so eingestellt, dass in beiden Kammern der gleiche Druck vorliegt. Zur Messung wird Helium verwendet, da es als inertes Gas den kleinsten Molekulardurchmesser besitzt und alle zugänglichen Hohlräume einer Probe erfasst. Anschließend wird die Probenkammer mit dem Prüfgut befüllt, wieder evakuiert und dann die gleiche Menge Helium wie vorher eingebracht. Um in beiden Kammern nun den gleichen Druck zu erreichen, muss das Volumen der Prüfkammer um das Volumen des reinen Feststoffes des Prüfgutes vergrößert werden. Dividiert man die Masse der Probe durch das so bestimmte Reinvolumen, erhält man die Reindichte.

Die Trockenraumdichte,  $\rho_d$ , ist das Verhältnis von Masse der trockenen Festsubstanz und dem eingenommenen Raumvolumen inklusive Porenraum der Materialprobe [kg/m<sup>3</sup>]. Die Masse wird nach Trocknung auf Gewichtskonstanz bei einer definierten Temperatur ermittelt. Die jeweilige Trocknungstemperatur richtet sich nach der Art des Materials und variiert zwischen 45 °C und von 105°C.

Die totale Porosität,  $\Phi$  [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>], berechnet sich über das Substanzvolumen aus Trockenraumdichte und Feststoffdichte ab. Sie beschreibt den gesamten, zur Verfügung stehenden Porenraum.

$$\Phi = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_m}$$

$\rho_d$  [kg/ m<sup>3</sup>]    Trockenraumdichte  
 $\rho_m$  [kg/ m<sup>3</sup>]    Feststoffdichte  
 $\Phi$ [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]    Porosität

Tabelle 2.3: Trockenraumdichte und Porosität der Carrara Marmorproben.

Parameter	Symbol	Einheit	Mittel	StdAbw	Min	Max
Rohdichte	$\rho_d$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2613.6	17.5	2515.1	2643.6
Porosität	$\Phi_{por}$	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.014	0.007	0.002	0.051

Die vorliegenden Rohdichten der unverwitterten Marmorproben zeigen eine sehr hohe Dichte an. Folglich sind die Porosität und damit der dem Feuchtetransport zur Verfügung stehende Porenraum sehr gering.

#### Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmekapazität [Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>] repräsentiert das Wärmespeichervermögen eines Materials und zeigt an, wie viel Wärmeenergie pro kg Baustoff und Grad Kelvin gespeichert werden können.

Die Wärmeleitfähigkeit liefert die Energiemenge, die durch eine definierte Materialdicke bei einem definierten Temperaturgradienten transportiert werden kann [Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]. Zur Messung kommt die sogenannte Heat- Puls- Technologie zum Einsatz. Dazu wird ein definierter Wärmepuls über einen elektrischen Heizwiderstand in einer Sonde erzeugt und in den Probenkörper geleitet. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der volumetrischen

Wärmekapazität basiert auf periodischen Temperaturmessungen als Funktion der Zeit einer 20 mm mächtigen Materialprobe.

Tabelle 2.4: Spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Carrara Marmorproben.

Parameter	Symbol	Einheit	Mittel	StdAbw	Min	Max
Spezifische Wärmekapazität	c	[J/kgK]	728	18.8	688	767
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_{dry}$	[W/mK]	2.2720	0.1035	2.03	2.49

Der Carrara Marmor besitzt eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit. Die spezifische Wärmekapazität ist geringfügig niedriger als bei herkömmlichen mineralischen Baustoffen.

#### Wasseraufnahmekoeffizient und kapillarer Wassergehalt

Bei hohen Feuchtegehalten erfolgt der Feuchtetransport dominant in der Flüssigphase. Dieser Fall liegt vor, wenn der Marmor in Wasser getaucht oder auch Schlagregen stärker befeuchtet wird. Der Wasseraufnahmekoeffizient charakterisiert dabei die Eigenschaft eines weitgehend trockenen Marmors Wasser von der Oberfläche her aufzusaugen und flüssiges Wasser in tiefer liegenden Porenraum zu transportieren. Während der Messung durchläuft die Materialprobe unterschiedliche Feuchtezustände. Folglich ändern sich die Transportgradienten, was zu kontinuierlich abnehmenden Flüssen führt. Der Wasseraufnahmekoeffizient entspricht der Steigung der Wasseraufnahmekurve bezogen auf die Quadratwurzel der Zeit und wird üblicherweise in  $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-0.5}$ , bzw.  $\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-0.5}$  angegeben. Am Ende des Wasseraufnahmeexperimentes stellt sich in einer Probe ein typischer Feuchtegehalt ein, der als kapillarer Wassergehalt,  $\theta_{cap}$ , [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ], bezeichnet wird.

Bei dem verwendeten automatisierten Verfahren kann die kapillare Wasseraufnahme kontinuierlich über eine Waage gemessen werden. Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt die experimentelle Apparatur, bestehend aus:

- einer Klimakammer mit einer vertikal justierbaren Wasserwanne, wo die Temperatur konstant und die relative Luftfeuchte über 97% gehalten werden kann
- der Materialprobe mit einer speziellen Halterung zur präzisen Justierung and Platzierung des Probekörpers auf der Wasseroberfläche
- einer Digitalwaage (+- 0.01g) mit Halterung, die eine kontinuierliche Messung ermöglicht während die Materialprobe unter der Waage hängt
- einem Datenlogger und Computer zur automatischen Registrierung der Wägedaten sowie der Klimabedingung relative Luftfeuchte und Temperatur innerhalb der Kammer

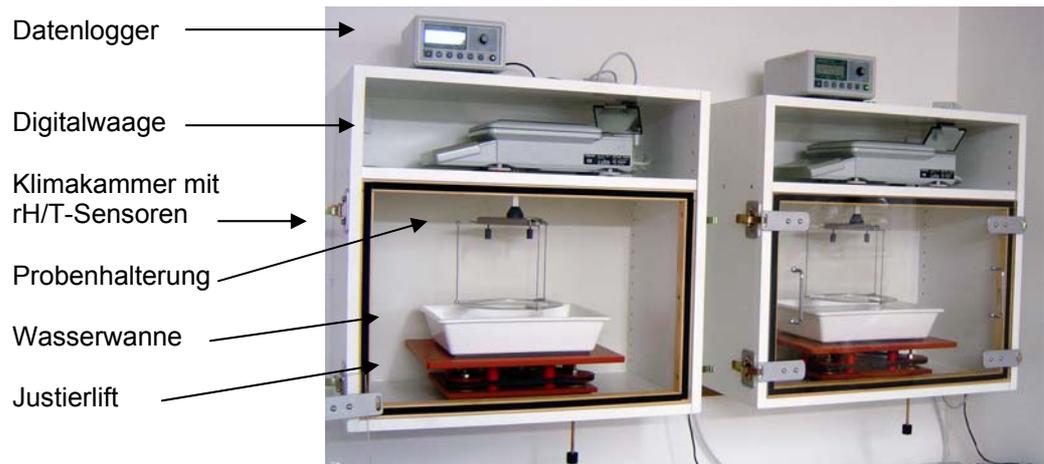


Abbildung 2.3: Experimentelle Apparatur zur automatischen Messung der kontinuierlichen Wasseraufnahme von Baustoffproben und zur Ableitung des kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten und des kapillaren Wassergehaltes.

Vor der Messung werden die Proben ausgemessen, getrocknet und deren Volumen sowie deren Masse bestimmt. Bei der Messung werden die 110 mm hohen Referenzprobekörper der Skulpturen verwendet. Zur Gewährleistung eines ein-dimensionalen, vertikalen Transportes sind die Proben lateral versiegelt. Anschließend werden die Proben 60 Tage in Exsikkatoren bei einer relativen Luftfeuchte von 33% gelagert.

Die zeitabhängige Wasseraufnahme der Materialprobe wird über die Probenhalterung an die Waage weitervermittelt und vom Logger aufgezeichnet. Die Ankopplung der Probe an die Wasseroberfläche erfolgt über einen Justierlift. Während sich Probe und Wasserwanne in der Klimakammer befinden, sind Waage und Datenlogger zum Feuchteschutz außerhalb platziert. Die Daten der Waage und der relative Luftfeuchte/Temperatursensor werden kontinuierlich abgefragt. Bei Messende wird der Wassergehalt der Probe gravimetrisch gemessen und zur Kalibrierung des Wasseraufnahmeexperimentes verwendet.

Tabelle 2.5: Kapillare Sättigung und Wasseraufnahmekoeffizient des Carrara Marmors aus den Skulpturenbeobachtungen.

Parameter	Symbol	Einheit	Mittel	StdAbw	Min	Max
Kapillare Sättigung	Ocap	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.0101	0.0023	0.0085	0.0117
Wasseraufnahmekoeffizient	Aw	[kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup> ]	0.0015	0.0003	0.0013	0.0017

Die Ergebnisse repräsentieren die bereits angewitterten Skulpturen. Im Vergleich mit dem unverwitterten Kernmaterial werden bei dem Wasseraufnahmeexperiment ca. 70% des Porenvolumens mit Wasser gefüllt. Etwa 30% der Poren bleiben luftgefüllt. Der Vergleich mit unverwittertem Carraramarmor  $A_w = 0.002 \text{ [kgm}^{-2}\text{h}^{-0.5}\text{]}$  zeigt eine schlechtere Wassertransportrate an, die sich durch den Einfluss der Steinkonservierungsmittel auf die Transporteigenschaften erklärt.

#### Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Bei geringen relativen Luftfeuchten erfolgt der Feuchtetransport dominant durch die Wasserdampfdiffusion. Mit Hilfe des sogenannten „Dry-Cup-Verfahrens“ kann diese Transportgröße gemessen werden. Bei höheren Luftfeuchten ab etwa 50 % relativer Feuchte treten gleichzeitig dampfförmige und flüssige Feuchteströme auf. Dieser zunehmende Flüssigwassertransport bewirkt einen exponentiellen Anstieg der Diffusion und kann über das „Wet-Cup-Verfahrens“ (als auch noch weiteren Zwischenstufen) unter isothermen Bedingungen gemessen werden. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand liefert ein Maß wie viel Wasserdampf bei Vorliegen eines Dampfdruckgefälles durch ein poröses Material transportiert wird. Der Koeffizient wird üblicherweise als  $\mu$ - Wert bezeichnet und kennzeichnet, wie viel Mal dampfdichter der Baustoff im Vergleich zu einer 1 m mächtigen und stehenden Luftschicht ist.

Die Messungen erfolgen unter isothermen Bedingungen. Dazu wird eine plattenförmige Probe des zu prüfenden Materials als oberer Abschluss auf ein Gefäß aufgesetzt und dampfdicht mit dem Gefäßrand verbunden. Im Gefäß wird durch ein Trocknungsmittel oder eine geeignete gesättigte Salzlösung eine konstante relative Luftfeuchtigkeit eingestellt. Zur Messung werden die Gefäße in einen Klimaraum mit konstanter Temperatur und Luftfeuchte gebracht. Unter dem Einfluss des Wasserdampfpartialdruckgefälles zwischen den an die Probenoberfläche angrenzenden Lufträumen wandert der Wasserdampf durch die Proben hindurch.

Tabelle 2.6: Verwendete Salz- in- Wasser Lösungen zur Realisierung konstanter Randbedingungen während der Messungen.

Gesättigte Salz-in-Wasser Lösungen	Relative Luftfeuchte von und Trocknungsmittel Salzlösung	Relative Luftfeuchte Klimakammer
	[%]	[%]
Silica Gel	5	35
Natium- Di- Hydrogenphosphat	96	80

Nach Einstellen eines stationären Gleichgewichtes ergibt sich eine pro Zeiteinheit konstante Gewichtsänderung des Messgefäßes, welche dem Diffusionsstrom bei dem angelegten Luftfeuchtegradienten entspricht. Während der Messung wird die gesamte Masse des Gefäßes periodisch gemessen. Nach dem Erreichen stationärer Bedingungen, die mit einer zeitkonstanten Gewichtsänderung einhergehen, kann der Wasserdampfdiffusionswiderstand,  $\mu$ , nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\mu = \frac{1}{s} \left( p_a * A * \frac{p_1 - p_2}{j} - s_a \right)$$

- s [m]            Dicke des Probekörpers
- $p_a$  [kg/m<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>Pa<sup>-1</sup>]    Wasserdampfpermeabilität von Luft
- A [m<sup>2</sup>]            Fließquerschnitt der Probe
- $s_a$  [m]            Mittlere Schichtdicke der Luftschicht zwischen Probekörper und Salz-in-Wasser Lösung, bzw. Trockenmittel
- $p_1$  [Pa]            Wasserdampfpartialdruck an der Probenoberseite
- $p_2$  [Pa]            Wasserdampfpartialdruck an der Probenunterseite

Zur Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstands der Carrara Marmorproben ist die Kenntnis der Wasserdampfpermeabilität von Luft erforderlich, die über die nachfolgende Gleichung berechnet werden kann.

$$p_a = \frac{0.083}{R_D T} \frac{p_0}{p} \left( \frac{T}{273} \right)^{1.81}$$

mit:

- $R_D$  [Nmkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]    Gaskonstante von Wasserdampf mit 462 [Nmkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]
- T [°K]            absolute Temperatur
- $P_0$  [hPa]            atmosphärischer Druck bei Standardbedingungen von 1013.25 [hPa].

Tabelle 2.7: Wasserdampfdiffusionswiderstände, Dry-cup und Wet-cap Experimente der Carrara Marmorproben.

Parameter	Symbol	Einheit	Mittel	StdAbw	Min	Max
“Dry cup” Wert	$\mu_{dry}$	[---]	353.5	242.6	75.0	737.2
“Wet cup” Wert	$\mu_{wet}$	[---]	95.1	59.0	40.9	227.1

Der Dry-cup Wert liefert den reinen Dampftransport in den Luftgefüllten Porenräumen. Aufgrund des geringen Porenvolumens von lediglich 1.4% des Gesamtvolumens, ist der Wasserdampfdiffusionswiderstand sehr hoch. Mit zunehmender Wasserfüllung sinkt dieser Widerstand deutlich. Die Ergebnisse zeigen eine große Streuung, die sich nur zum Teil einen richtungsabhängigen Dampftransport erklären lässt. Aufgrund der geringen Transportraten steigt u.a. der Fehler der Messung.

#### Kapillare Wasserleitfähigkeit

Die kapillare Wasserleitfähigkeit ist ein direktes Maß für die Fähigkeit eines Porenraumes, wie schnell Wasser im jeweiligen Porensystem transportiert werden kann. Sie verknüpft der Kapillardruck, als antreibende Kraft, mit der Menge Wasser, die in dem betrachteten Zeitintervall durch die Poren fließt. Während der Messungen weist die Materialprobe einen definierten Feuchtegehalt auf. Bei vollständiger Sättigung nehmen sämtliche Poren am Feuchtetransport teil, womit die Flüssigwasserleitfähigkeit maximal ist. In diesem Fall spricht man von der gesättigten Wasserleitfähigkeit,  $k_s$ .

Bei abnehmenden Sättigungsgraden werden die jeweils größeren Poren zuerst entwässern und sind mit Luft gefüllt. Folglich sinkt mit abnehmendem Sättigungsgrad die Wasserleitfähigkeit und wird je nach Bezug mit  $k_\theta$ , (Bezug zum Wassergehalt),  $k_\psi$ , (Bezug zum Kapillardruck) oder  $k_\phi$ , (Bezug zur relativen Luftfeuchte) bezeichnet. Die Einheit der Wasserleitfähigkeit ist eine Geschwindigkeit und wird in  $[cm\ s^{-1}]$ ,  $[m\ d^{-1}]$ , bzw. nach dividieren durch die Gravitation in  $[s]$  angegeben.

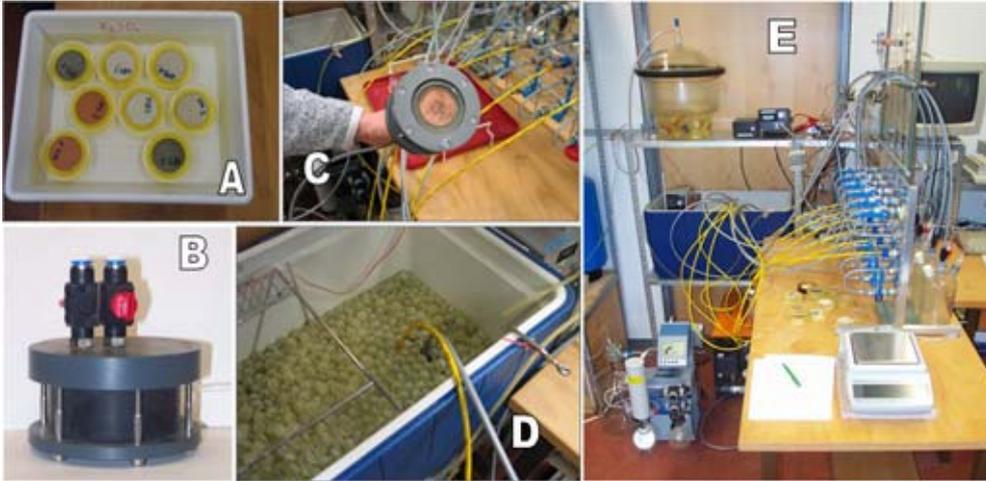


Abbildung 2.4: Lateral versiegelte Materialproben (A), Haubenpermeameter mit eingebauter Probe (B und C), Temperatur kontrolliertes Wasserbad mit Verdunstungsschutz (D) und Messsystem zur Bestimmung der Wasserleitfähigkeit bei beliebigen Unterdrücken (E) mit einem Doppelregel Unterdrucksystem und einer Waage zur Messung der Flussrate.

Zur Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit,  $k_{eff}$ , kommt ein Haubenpermeameter zum Einsatz. Zum Erhalt eindimensionaler Fließbedingungen sind die Probekörper lateral versiegelt und werden zur Messung vorab in einem Wasserbad aufgesättigt (A). Nach der Konditionierung wird die Probe in einer Permeameterhaube (B) eingespannt (C) und danach in einem Temperatur kontrollierten Wasserbad bei 23 °C gelagert (D). Insgesamt können 6 Probenköpfe parallel gemessen werden. Jede Permeameterhaube ist über einen PTFE Schlauch mit einer Wulfschen Flasche verbunden, an der ein Doppelregel Vakuumsystem den gewünschten Unterdruck kontrolliert. Dieser Saugdruck bewirkt einen Wasserfluss durch die Materialprobe in der Permeameterhaube und via PTFE Schlauch in die Wulfsche Flasche. Nach dem Erhalt konstanter stationärer Fließbedingungen wird die Flussrate über sequenzielles Wägen der Flasche ermittelt. Die Prüfung der linearen Fließbedingungen erfolgt über die Einstellung unterschiedlicher hydraulischer Gradienten in verschiedenen Messläufen.

Die Bestimmung der Wasserleitfähigkeit erfolgt über die nachfolgende Gleichung:

$$k_{\theta} = \frac{1}{A} \frac{q}{\Delta t} \left/ \left( \frac{\Delta h}{s} + 1 \right) \right.$$

Mit:

$k_{\theta}$  [ $\text{ms}^{-1}$ ]      Wasserleitfähigkeit

A [m <sup>2</sup> ]	Fliessquerschnitt der Materialprobe
q [m <sup>3</sup> ]	Wasserfluss im betrachteten Zeitintervall
Δt [s]	Zeitintervall in dem der Wasserfluss gemessen wird
Δh/s	[-] Potentialgradient im Meter Wassersäule entsprechend der Wasserspannungsdifferenz über die Probenhöhe
s [m]	Probenhöhe

Die effektive Wassersättigung bei der Messung liefert:

$$\theta = \frac{m_w - m_d}{\rho_w V}$$

m <sub>w</sub>	[kg] Masse der feuchten Materialprobe
m <sub>d</sub>	[kg] Masse der trockenen Materialprobe
V [m <sup>3</sup> ]	Volumen der Probe
ρ <sub>w</sub> [kg/ m <sup>3</sup> ]	Dichte von Wasser

Tabelle 2.8: Wasserleitfähigkeit bei Wassersättigung der Carrara Marmorproben.

Parameter	Symbol	Einheit	Mittel
Gesättigte Leitfähigkeit	K <sub>c</sub>	[s]	1.0E-12
Wassergehalt bei Messung	O <sub>I</sub>	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	0.1046

Der Carrara Marmor ist durch eine sehr geringe kapillare Leitfähigkeit charakterisiert. Mit einer Geschwindigkeit von 8.64 E-5 cm/d dauert es bei einem Einheitsgradienten nahezu 3 Jahre bis eine 1 cm dünnmächtige Marmorprobe durchflossen ist. Die geringen Transportraten zeigen auf den Einfluss der Steinkonservierungsmittel an.

Aufgrund der geringen Transportgeschwindigkeit ist ein erheblicher Zeitbedarf erforderlich bis die notwendigen stationären, bzw. statischen Bedingungen bei den Experimenten erreicht sind. Der Zeitbedarf zum Erhalt sämtlicher Materialdaten und Materialkennwerte beträgt >1 Jahr.

#### Wasserretention

Die Wasserretention beschreibt das Feuchtespeichervermögen des untersuchten Carrara Marmors Materials und ist unerlässlich zur Bestimmung der kapillaren Eigenschaften. Bei der Bestimmung der Speichereigenschaften muss zwischen dem Sorptionsfeuchtebereich und dem Kapillarwasserbereich differenziert werden.

Bestimmung der überhygroskopischen Feuchtespeicherung. Nach der kapillaren Wassersättigung der Materialproben werden diese auf keramischen Platten platziert und über angelegte Kapillardrücke entwässert. Abhängig vom angelegten Kapillarpotential unterscheidet man die Messverfahren in Hängende Wassersäule (0-30 hPa), Unterdruckapparatur (30-750 hPa) und Druckplattenapparatur (30-15000 hPa). Zur Messung der Wasserretention werden die zuvor gesättigten Proben stufenweise über steigende Kapillarpotentiale entwässert.

Nach dem Erhalt eines kapillaren Gleichgewichtes bei einer Druckstufe wird der Feuchtegehalt der Materialproben gravimetrisch bestimmt. Die Proben werden anschließend wieder auf der Keramik platziert und eine nächst höhere Druckstufe angelegt. Zunehmende Kapillarpotentiale führen zu abnehmenden Wassergehalten und liefern die Desorptionscharakteristik der Feuchtespeicherung, steigende Feuchtegehalte liefern die Adsorptionscharakteristik.



Abbildung 2.5: Druckplattenapparatur zur Bestimmung der Feuchtespeicherung im überhygroskopischen Bereich zwischen 3 to 1500 kPa.

Bestimmung der hygroskopischen Feuchtespeicherung. Nach dem Abschluss der Entwässerung bei einer Druckstufe von 15 bar werden die Proben in einem Exsikkator mit  $K_2SO_4$  bei 96.7% relativer Feuchte gelagert. Nach dem Erhalt statischer Gleichgewichtsbedingungen wird der korrespondierende Wassergehalt gravimetrisch bestimmt und die Proben werden in einer weiteren Luftfeuchtestufe konditioniert. Durch eine stufenweise Konditionierung (in Exsikkatoren mit gesättigten Salz- in- Wasser- Lösungen oder Klimakammern) mit jeweils niedrigeren relativen Luftfeuchten werden die Proben sukzessive entwässert. Abnehmende Luftfeuchten mit immer trockener werdenden Proben und liefern die Desorptionscharakteristik, steigende Luftfeuchten mit wachsenden Feuchtegehalten liefern eine Adsorptionscharakteristik.

Die und die Wasserretention zusammen liefern die gesamte Feuchtespeicherfunktion, auch oder Retentionscharakteristik genannt. Die Verknüpfung zwischen Sorptionsisotherme und Kapillardruckdaten erfolgt über die Kelvingleichung unter Verwendung nach:

$$\varphi = e^{-\frac{2\sigma}{r\rho_w R_v T}}$$

$\varphi$ [-]	relative Luftfeuchte
$R_v$ [Wskg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	allgemeine Gaskonstante
$T$ [K]	Temperatur
$\sigma$ [Pam <sup>-1</sup> ]	Oberflächenspannung
$\rho_w$ [kg/ m <sup>3</sup> ]	Dichte von Wasser
$r$ [m]	Porenradius

Wobei die Konvertierung von relativer Luftfeuchte in Kapillardruck und umgekehrt über den Porenradius erfolgt mit:

$$\varphi = \frac{c}{r} \quad \text{wobei} \quad c = 2\sigma \cos \omega / g \rho_w$$

$\psi$ [Pa]	Kapillardruck
$g$ [ms <sup>-2</sup> ]	Gravitation
$\omega$ [-]	Kontaktwinkel an der Grenzfläche zwischen Wasser und Festphase

Der Parameter c ist Äquivalent der kapillaren Steighöhe. r multipliziert mit der Konstanten  $\sim 9.81 \cdot 10^{-3}$  repräsentiert einen Äquivalentporenradius [cm].

Tabelle 2.9: Wasserretention (Desorptionscharakteristik) der Carrara Marmorskulpturenproben.

Argumente	Mittel	StdAbw	Min	Max
pc [hPa]	Ol [m3/m3]		Ol [m3/m3]	Ol [m3/m3]
T [°C]				
0.01	0.00734	0.00159	0.00409	0.01046
30	0.00353	0.00102	0.00212	0.00616
300	0.00357	0.00109	0.00238	0.00541
2000	0.00327	0.00100	0.00290	0.00565
4000	0.00334	0.00042	0.00252	0.00396
8000	0.00348	0.00085	0.00299	0.00584
12000	0.00326	0.00109	0.00339	0.00704

Die Wasserretention im überhygroskopischen, kapillaren Bereich zeigt lediglich im nahe gesättigten Bereich eine Feuchteänderung. Dies bedeutet, dass grobe Strukturporen in einer bestimmten Menge vorhanden sind. Der Mittelporenanteil ist absolut gesehen als sehr gering zu bezeichnen. Bezogen auf den zur Verfügung stehenden Porenraum ist diese Porengruppe jedoch dominant. Die groben Poren sind vermutlich strukturbedingte, planare Porensysteme, die sich durch Aggregatbildung ergeben haben. Die Ultraschalluntersuchungen vom GZG, die eine Strukturschädigung ergeben haben, stützen diese Annahmen.

Tabelle 2.10: Wasserretention (Desorptionscharakteristik) der Carrara- Marmor Skulpturenproben.

Argumente		Mittel	StdAbw	Min	Max
pc	T	OI		OI	OI
[hPa]	[°C]	[m3/m3]		[m3/m3]	[m3/m3]
0.01	17.4	0.01046	0.00159	0.00409	0.01059
12000	23.1	0.00526	0.00109	0.00339	0.00704

Der Vergleich zwischen dem unverwitterten, neu beprobten Marmor (Tabelle 2.11 und 2.12) sowie den verwitterten Marmorproben aus den Skulpturen (Tabelle 2.9 und 2.10) macht die Unterschiede deutlich. Der Marmor, entnommen aus den äußeren Schichten der Skulpturen weist einen höheren Porenanteil aus. So ist dieser nahe Sättigung um 0.26 Vol% und im trockenen Bereich um 0.2 Vol% angestiegen. Dies deutet auf eine Verwitterung hin, wobei z.B.  $\text{CaCO}_3$  -Verluste die Änderung in der Porosität erklären. Insgesamt ist damit die Porosität um 25% angestiegen.

Tabelle 2.11: Hygrische Sorptionsisotherme (Desorptionscharakteristik) der Carrara Marmorproben gemessen bei einer Referenztemperatur.

Argumente		Mittel	StdAbw	Min	Max
$\varphi$	T	OI		OI	OI
[%]	[°C]	[m3/m3]		[m3/m3]	[m3/m3]
97.4	21.5	0.00078	0.00014	0.00056	0.00102
84.7	21.5	0.00069	0.00011	0.00052	0.00085
75.4	21.5	0.00028	0.00019	0.00012	0.00075
58.2	21.0	0.00015	0.00017	0.00001	0.00057
43.2	22.3	0.00012	0.00007	0.00001	0.00020
32.9	21.5	0.00005	0.00006	0.00001	0.00016

Tabelle 2.12: Hygrische Sorptionsisotherme (Adsorptionscharakteristik) der Carrara Marmorproben gemessen bei einer Referenztemperatur.

Argumente		Mittel	StdAbw	Min	Max
$\varphi$ [%]	T [°C]	OI [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]		OI [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	OI [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
32.8	20.60	0.00001	0.00002	0.00000	0.00003
43.2	22.10	0.00003	0.00002	0.00001	0.00005
57.6	21.30	0.00003	0.00003	0.00001	0.00006
75.2	22.10	0.00006	0.00003	0.00003	0.00009
84.3	21.30	0.00016	0.00005	0.00009	0.00018
90.0	22.10	0.00017	0.00004	0.00011	0.00018
96.0	21.30	0.00018	0.00004	0.00014	0.00022
96.9	22.10	0.00018	0.00003	0.00015	0.00021

Die hygrische Feuchtespeicherung (Tabellen 2.9 und 2.11) kann ebenfalls als sehr gering bezeichnet werden. Die spezifische, erschließbare innere Oberfläche des Marmors ist faktisch kaum vorhanden. Das Material ist kompakt. Die Unterschiede zwischen der Ad- und Desorptionscharakteristik zeigen, dass eine ausgeprägte Hysterese in der Feuchtespeicherung besteht (vergl. Tabelle 2.11 und 2.12). Die Unterschiede sind signifikant und erreichen 60 – 80% des jeweiligen Sättigungsgrades.

### 2.1.3 Zusammenfassung der Messergebnisse

Der untersuchte Carraramarmor ist ein kompaktes Material mit einer sehr geringen Porosität. Infolgedessen werden extrem hohe Anforderungen an die Messmethodik gestellt, um die sehr geringen Unterschiede noch erfassen zu können. Auch ist der Zeitbedarf zum Erhalt statischer und stationärer Bedingungen erheblich. Dadurch ergeben sich wesentliche Änderungen im Messablauf. Auch mussten die Messtechnologien verfeinert werden, um messbare Differenzen zwischen den jeweiligen Messläufen zu erhalten. Sämtliche Transport- und Speicherexperimente zeigen um ein bis drei Größenordnungen geringere Werte an, als herkömmliche Baustoffe.

Der Vergleich zwischen dem Carraramarmor der Skulpturen und des frisch entnommenen Marmors (unverwitterte Kernbereiche) zeigt, dass bereits Verwitterungsprozesse an den Skulpturen stattgefunden haben. Hier liegt ein um ca. 0.0025 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> höherer Porenanteil vor, was bezogen auf den Porenraum einem prozentualen Anstieg von 25% entspricht. Die Wasserretention zeigt auch einen Anstieg der planaren Porensysteme infolge Aggregatbildung an. Die Feuchtespeicherung ist stark durch eine Hysterese geprägt.

Der Feuchtetransport in der flüssigen, wie auch dampfförmigen Phase ist extrem gering. Austauschprozesse sind also sehr langsame Prozesse.

## 2.2 Erstellung von Materialfunktionen

Die hygrothermische Simulation bzw. Feuchte- und Wärmetransportberechnungen basieren auf der numerischen Lösung von gekoppelten Differentialgleichungen mit feuchte- und temperaturabhängigen Transport- und Speicherkoeffizienten. Die Laborexperimente hingegen liefern Basiskennwerte (oder -parameter), die einer Interpretation bedürfen, um als Parameter der Transport- und Speicherkoeffizienten in Simulationswerkzeugen verwendet werden zu können. Die Interpretation der Laborkennwerte zur Generierung von Materialfunktionen, welche die Materialeigenschaften adäquat beschreibenden, ist die wesentliche Aufgabe der Materialmodellierung. Das Materialmodell umfasst ein Set von Materialfunktionen einschließlich der Material- und Modellparameter. Die Anwendung des Materialmodells erfolgt hier notwendigerweise in zwei Stufen, der Modellierung und der Kalibrierung.

- Modellierung - Anwendung geeigneter Materialfunktion an den im Labor gemessenen Materialdaten
- Kalibrierung - Bestimmung von Funktionsparametern durch Simulation von Laborexperimenten und deren Optimierung

Im Rahmen des vorliegenden DBU Projektes wird ein am IBK entwickeltes Materialmodell verwendet. Dieses „Ingenieurmodell zur hygrothermischen Materialcharakterisierung“ ermöglicht die Verknüpfung komplexer, aus den thermodynamischen Grundlagen abgeleiteten Funktionen mit einfachen, aus der Ingenieurpraxis bekannten Kennwerten. Im Ergebnis steht ein im gesamten Feuchtebereich kalibriertes Transportmodell für den gekoppelten Flüssigwasser-, Wasserdampf- und Wärmetransport.

### 2.2.1 Physikalisch basierte Materialfunktionen und deren Anpassung

Die Feuchtespeicherfunktion setzt sich aus der im hygrokopischen Feuchtebereich bestimmten Sorptionsisotherme und der im überhygrokopischen Bereich gemessenen Saugspannungskurve zusammen und lässt sich als eine durchgängige Funktion angeben. Für den Verlauf der Feuchtespeicherfunktion wird ein multimodaler Funktionsansatz verwendet, der sich aus der Summe gewichteter Einzelfunktionen mit einer entsprechenden Anzahl freier Parameter zusammensetzt. Diesem Ansatz liegt eine logarithmisch Gaussnormalverteilte Porenradienverteilung zu Grunde, deren Integral der Feuchtespeicherfunktion entspricht.

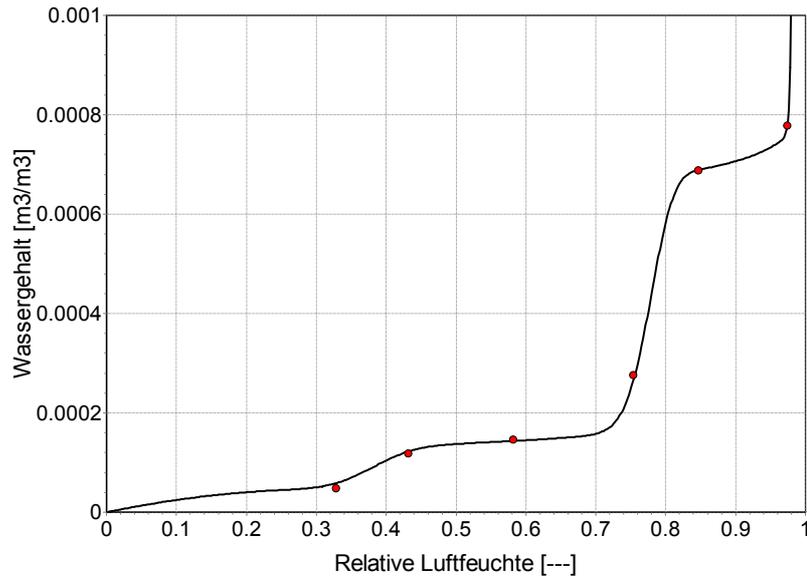


Abbildung 2.2.1: Hygrische Sorptionsisotherme von Carrara Marmor.

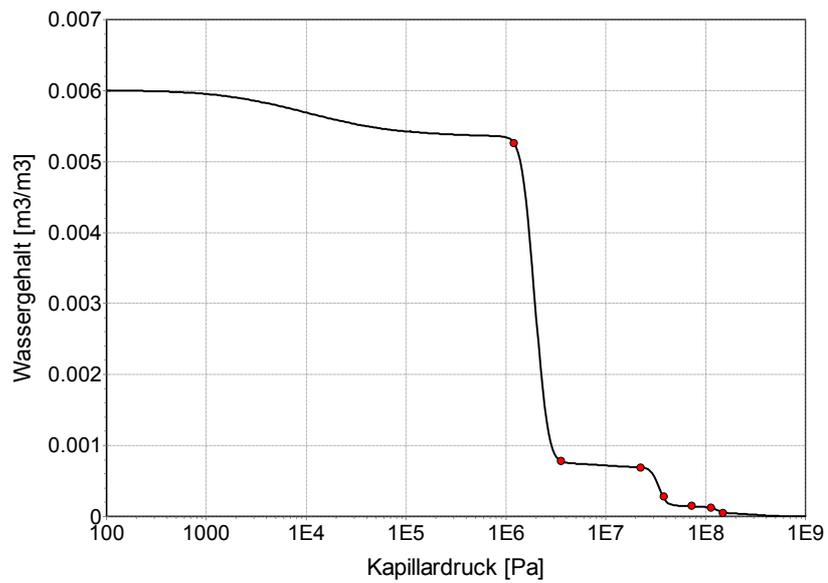


Abbildung 2.2.2: Saugspannungskurve von Carrara Marmor.

Die Anpassung erfolgt an die Messwerte der Feuchtespeicherung im hygrokopischen und überhygrokopischen Feuchtebereich, wobei die Modalität und die daran gekoppelte Anzahl freier Parameter anzugeben sind.

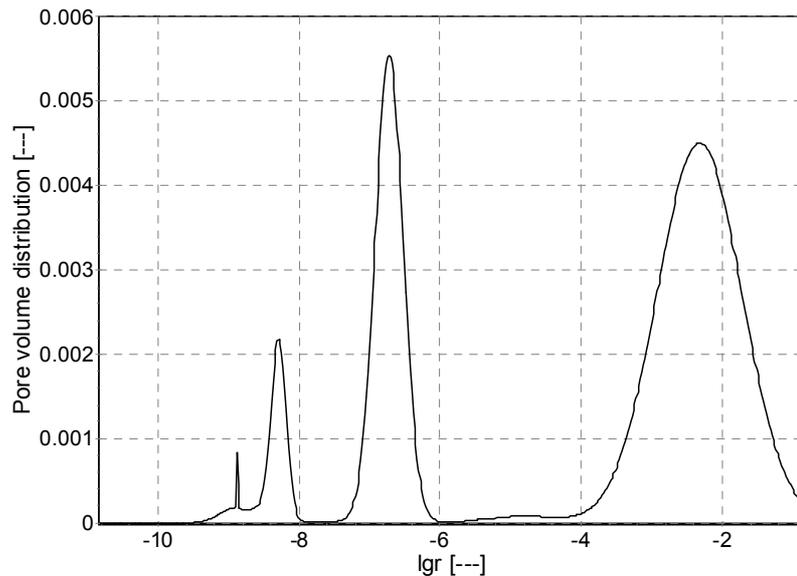


Abbildung 2.2.3: Porenvolumenverteilung von Carrara Marmor. Die Peaks liefern die Porenradialmaxima und deren Verteilungen identifizieren die korrespondierenden Porenvolumina.

Die Porenvolumenverteilung in Abbildung 2.2.3 macht deutlich, dass der Carrara Marmor eine ausgesprochen diskontinuierliche Porenverteilung besitzt. Je höher der Peak, desto dominanter der Porenanteil, je größer das Integral unter der Kurve, desto größer mehr Poren dieser Porenklassen sind vorhanden. Bei einem Porenradius von  $\log^{-7}$  kann eine Domäne festgestellt werden. Diese repräsentiert den Mittelporenbereich. Bei dem Porenradius von etwa  $\log^{-2}$  dominieren die groben planaren Poren. Die diskret identifizierbaren Peaks lassen den Schluss zu, dass eine geringe Porenkontinuität besteht. Dies lässt sich auch aus den stufenförmigen Speicherkurven ablesen.

Modellansatz für Flüssigwasserleitfähigkeit. Zur Ableitung der Transportfunktionen für Flüssigwasser und Wasserdampf aus der Porenstruktur werden zwei Modelle miteinander kombiniert. Die Flüssigwasserleitfähigkeit wird, basierend auf dem Porenmodell von Haagen Poseuille die Feuchteleitfähigkeit über das Porenmodell nach Burdine aus der Porenstruktur abgeleitet. Die Summation über alle Poren liefert die Fußdichte des flüssigen Wassers in Abhängigkeit vom größten Wasser gefüllten Kapillarradius. Die Leitfunktion knüpft im überhygroskopischen Bereich an die Dampfdiffusionsmessungen bei höheren Luftfeuchten (wet-cup) an und wird im Bereich der kapillaren Sättigung durch weitere Feuchteleitfähigkeitsmesswerte (Darcy- Leitfähigkeit) ergänzt und über eine inverse Modellierung skaliert.

Die Genauigkeit einer Funktionalisierung steigt mit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Leitfähigkeitswerte. Da Flüssig- und Dampftransport gemeinsam zu betrachten sind, findet eine Kopplung zu einem Modell in Form eines seriellen und parallelen Flüssigwasser- und Dampftransportes statt, welches die Einflüsse der über die Gasphase und den Oberflächenfilm kommunizierenden Flüssigkeitsinseln beschreibt. Es erlaubt die Modellierung der Feuchteabhängigkeit des Dampftransportes und liefert zusätzlich eine

Skalierungsfunktion für die Flüssigwasserleitfähigkeit im hygrokopischen und angrenzenden überhygrokopischen Bereich, deren physikalische Ursache in der Unterbrechung des kapillaren Flüssigwassertransportes von Flüssigkeitsinseln besteht.

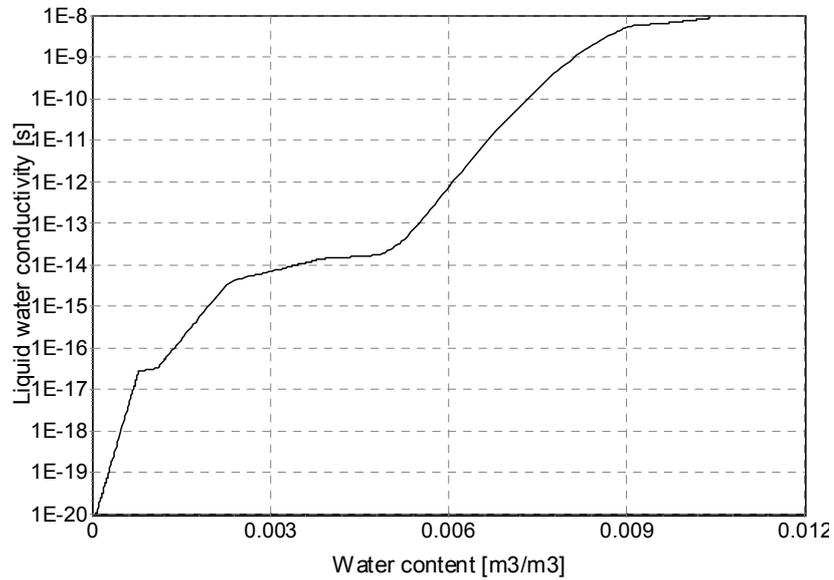


Abbildung 2.2.4: Feuchteabhängige Flüssigwasserleitfähigkeit von Carrara Marmor.

Die Funktion der Flüssigwasserleitfähigkeit variiert über 9 Größenordnungen und sinkt im hygrokopischen Bereich auf unter 1E-17. Dort wird der Flüssigwassertransport durch den Dampftransport dominiert. Bilden sich jedoch zusammenhängende Wasserfilme steigt der Feuchtetransport an und gewinnt zunehmend an Bedeutung.

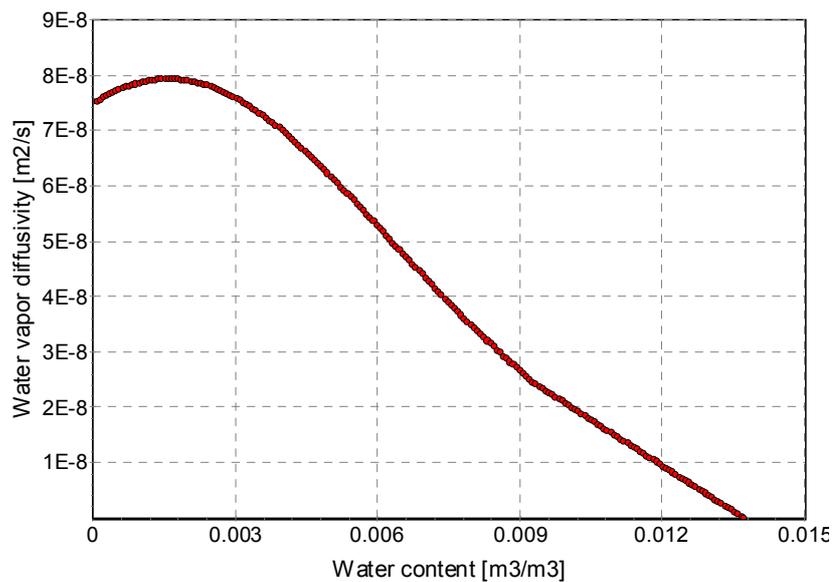


Abbildung 2.2.5: Feuchteabhängige Wasserdampfdiffusion von Carrara Marmor.

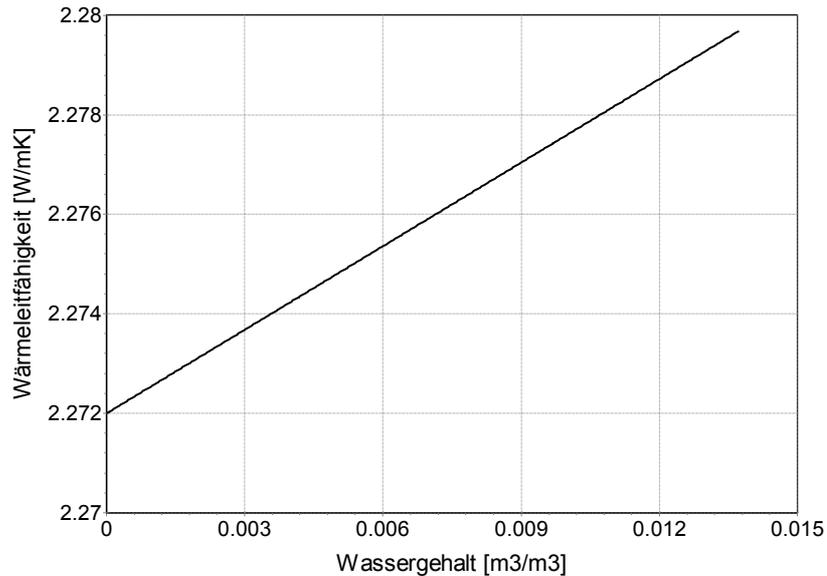


Abbildung 2.2.6: Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit von Carrara Marmor.

### 2.2.2 Kalibrierung des Materialmodells und der Materialfunktionen

Aus den oben beschriebenen physikalischen Modellansätzen ergeben sich feuchteabhängige Transportfunktionen. Bei der Kalibrierung werden die Funktionsparameter variiert und die Experimente nachsimuliert bis eine hinreichende Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung erzielt wird. Nachfolgend ist die Kalibrierung des Materialmodells für den Carraramarmor dargestellt.

Zur Kalibrierung wird in einem Schritt die kontinuierliche Messung der Wasseraufnahme verwendet (siehe Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten, Abbildung 2.3). Das Experiment beschreibt dabei die Wasseraufnahme bei direktem Kontakt mit Wasser, wie sie z.B. bei einem Regen vorkommt.

Bei dem Experiment werden die Beprobungen von den Carraramarmor Skulpturen verwendet. Wie bereits erwähnt besitzen diese eine um 25% höhere Porosität, als die unverwitterten Marmorblöcke, wodurch diese mehr Wasser aufnehmen. Dadurch zeigen die Messwerte einen höhere Feuchteaufnahme. Relevant für die Kalibrierung ist der Anstieg der Wasseraufnahmekurve. In diesen Bereichen sollte eine gute Übereinstimmung gegeben sein, wie die obere Kurve für das Kernmaterial deutlich macht.

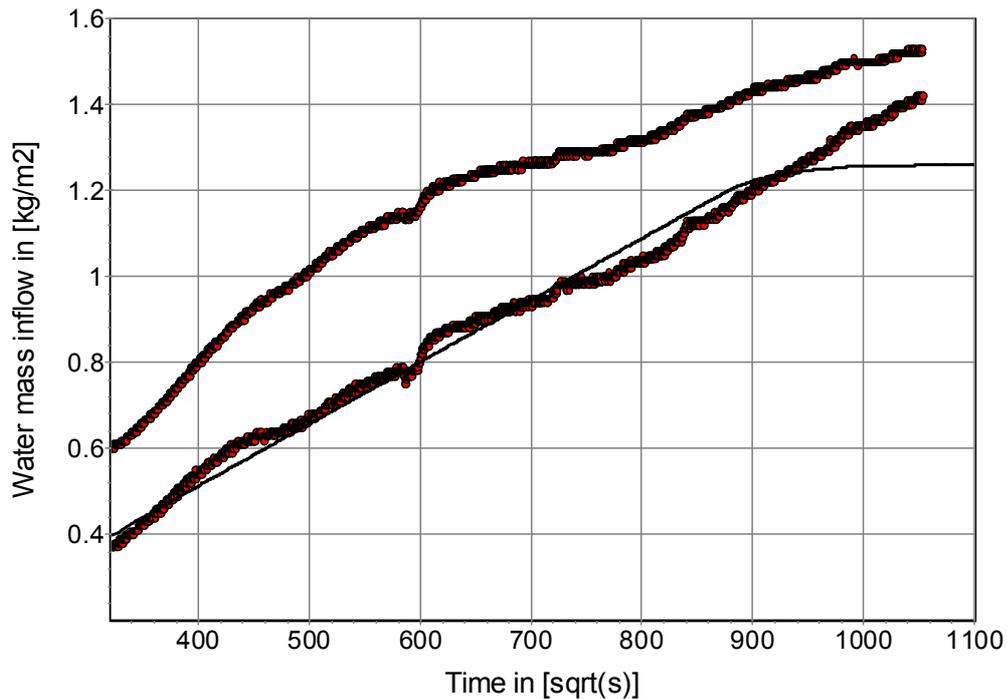


Abbildung 2.2.7: Vergleich zwischen gemessenem (rot markierte Messpunkte) und simuliertem Aufsaugverhalten (schwarze Aufsaugkurve) zweier Carraramarmorproben, entnommen an den Skulpturen. Die unteren Punkte repräsentieren die Wasseraufnahme durch den unbehandelten Marmor aus den Kernbereichen, die oberen Punkte reflektieren den mit Steinkonservierungsmitteln behandelten Marmor. Die Aufnahmeraten sind in der Abbildung bezogen auf den  $q_m$ .

### Trocknungsverlauf

Das Trocknungsverhalten eines Materials gibt Aufschluss über dessen kapillare Wasserleitfähigkeit in einem weiten Feuchtebereich. Dazu werden in einem Windkanal unter kontrollierten Randbedingungen Austrocknungsversuche durchgeführt. Die Messapparatur besteht aus einem mit Plexiglasplatten bedeckten Metallrahmen, Ventilatoren an jedem Kanalende und Einschubleisten für vier Laden, in denen sich die Probekörper befinden. Während der Austrocknung wird die Oberflächentemperatur jeder Probe gemessen. Zusätzlich sind kombinierte Temperatur- und Luftfeuchtesensoren und Stömungssensoren installiert mit denen die Verdunstungsbedingungen ermittelt werden können. Abbildung 2.2.8 zeigt eine schematische Darstellung sowie eine photographische Ansicht der Apparatur. Die Ergebnisse der Trocknungsexperimente dienen der Kalibrierung der Materialfunktionen.

## Schema der Trocknungsapparatur

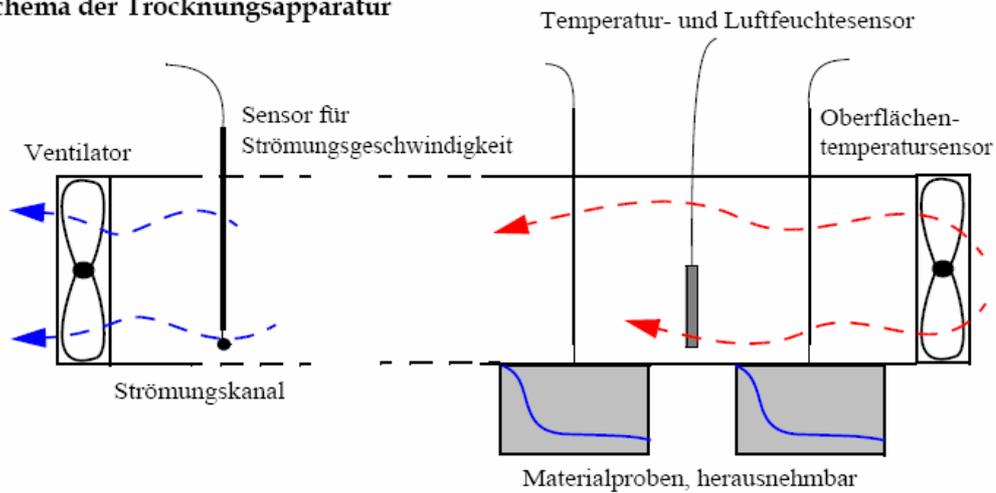


Abbildung 2.2.8: Messapparatur, entwickelt um unter definierten Randbedingungen den Trocknungsverlauf zu ermitteln. Oben: Schemadiagramm der Messeinrichtung, unten links: photographische Ansicht der Messeinrichtung, unten rechts: photographische Ansicht der installierten Sensoren.

Der Übergangsbereich zwischen dem überhygroskopischen und hygroskopischen Feuchtebereich wird durch die Simulation des Trocknungsverhaltens kalibriert. In Kenntnis der Umgebungsbedingungen und der Möglichkeit der radialsymmetrisch- dreidimensionalen Simulation mit Delphin 5 kann neben den Anfangs- und Übergangsbedingungen auch der Temperatureinfluss auf das Trocknungsverhalten berücksichtigt werden.

Der Vergleich zwischen gemessenen Daten und den Simulationen zeigen eine gute Übereinstimmung. Folglich können die abgeleiteten Materialfunktionen (siehe Abbildungen 2.2.1 bis 2.2.6) die Prozesse hinreichend genau beschreiben. Mit den vorliegenden Materialfunktionen werden sämtliche Simulationsrechnungen durchgeführt.

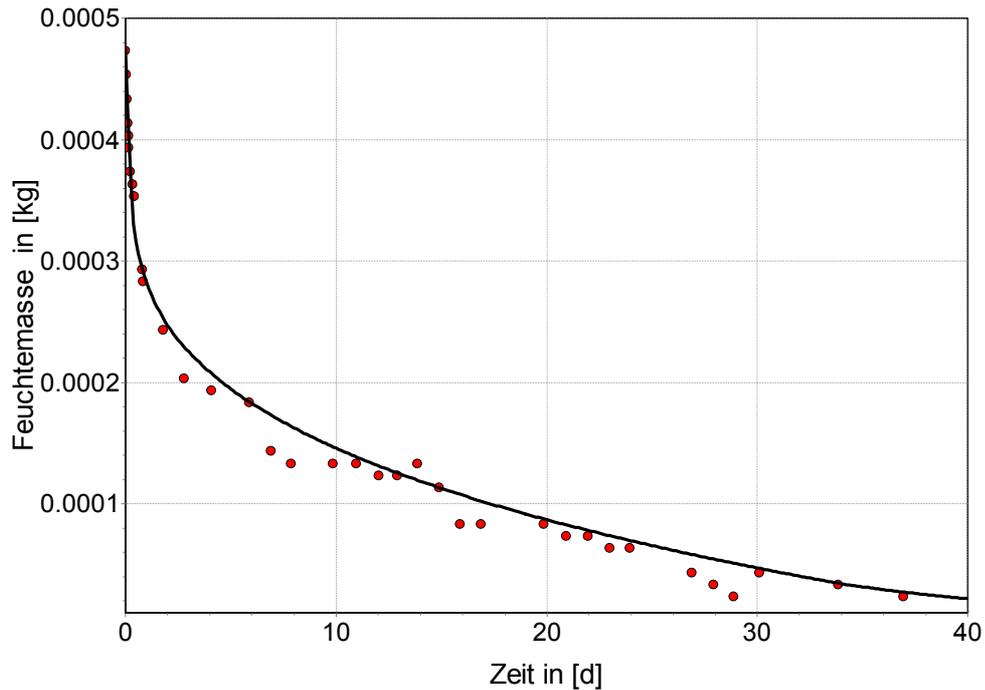


Abbildung 2.2.9: Vergleich zwischen dem gemessenem und simuliertem Trocknungsverhalten für Carrara Marmor.

Die oben genauer beschriebenen Materialfunktionen repräsentieren die Eigenschaften des im Labor konditionierten Carraramarmors. Aus früheren Untersuchungen am originalen Carrara Marmor der Skulpturen ist bekannt, dass unterschiedliche Steinerhaltungsmittel zu verschiedenen Zeiten angewendet wurden. Dieser Cocktail hat dabei die ursprünglichen Eigenschaften des Carrara Marmors überprägt.

In den nachfolgenden Abbildungen werden der Skulpturenmarmor und die Marmorproben vergleichend dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die Proben der Schlossbrückenskulptur eine höhere Porosität aufweisen. Dies deutet auf eine Verwitterung hin, wobei z.B.  $\text{CaCO}_3$  -Verluste die Änderung in der Porosität erklären. Die geringere kapillare Wasseraufnahme trotz der höheren wassergesättigten Porosität deutet eine schlechtere Transportleistung der vorliegenden Poren an. Dies reflektiert den Einfluss der Steinkonservierungsmittel auf die Transporteigenschaften.

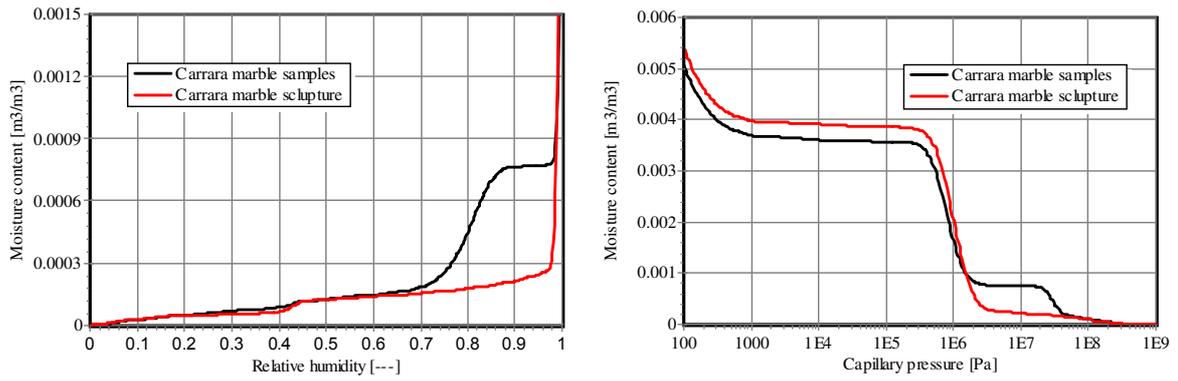


Abbildung 2.2.10: Vergleichende Darstellung der hygrischen Sorptionsisotherme und Wasserretention von Carraramarmor Herstellproben (schwarz) und den Skulpturenproben (rot).

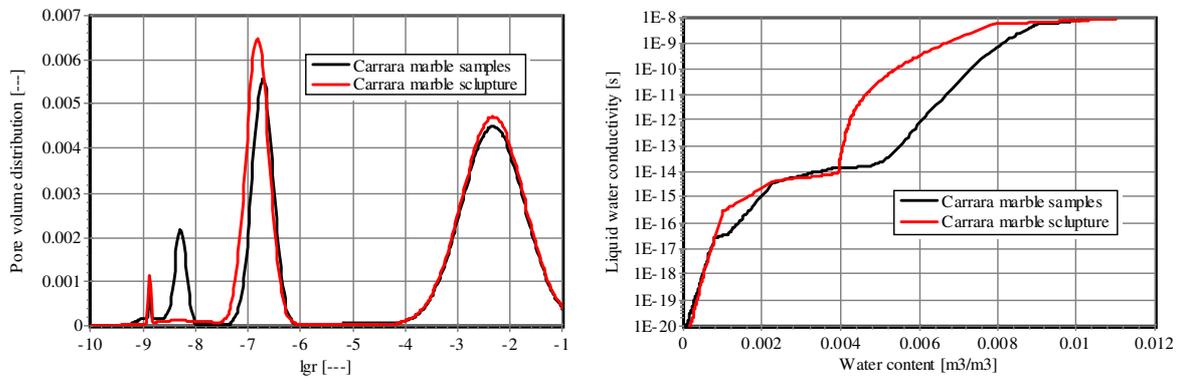


Abbildung 2.2.11: Vergleichende Darstellung der Porenvolumenverteilung und der Flüssigwasserleitfähigkeit von Carraramarmor Herstellproben (schwarz) und den Skulpturenproben (rot).

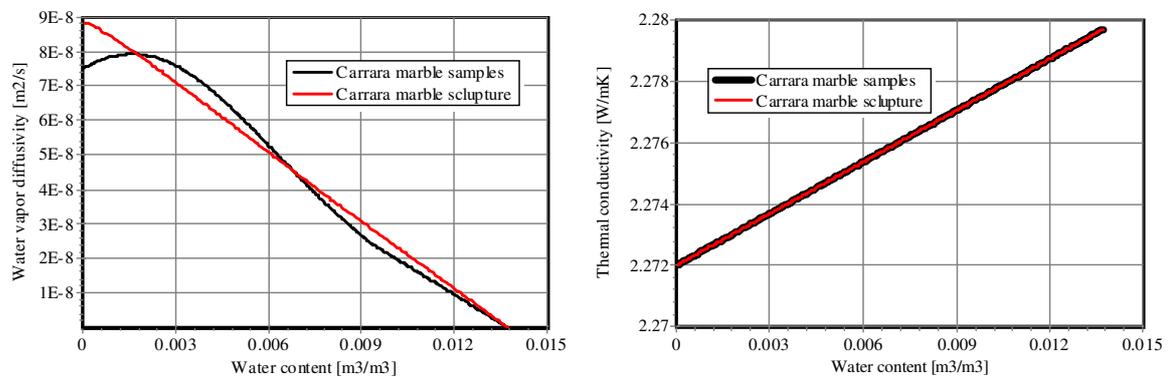


Abbildung 2.2.12: Vergleichende Darstellung der Wasserdampfdiffusivität und der Wärmeleitfähigkeit von Carraramarmor Herstellproben (schwarz) und den Skulpturenproben (rot).

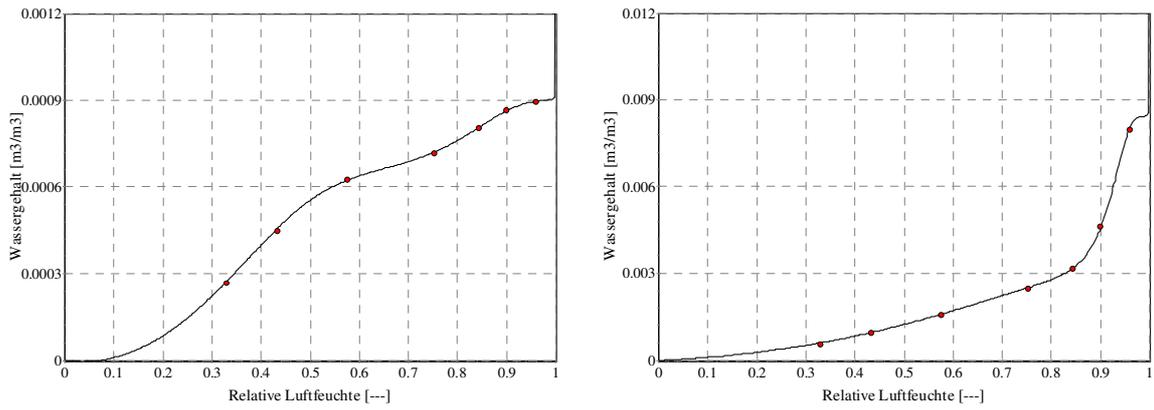


Abbildung 2.2.13: Vergleichende Darstellung der hygrischen Sorptionsisotherme der Einhausungsfolien Gore Tennera (links) und Light Tex HP6320 (rechts).

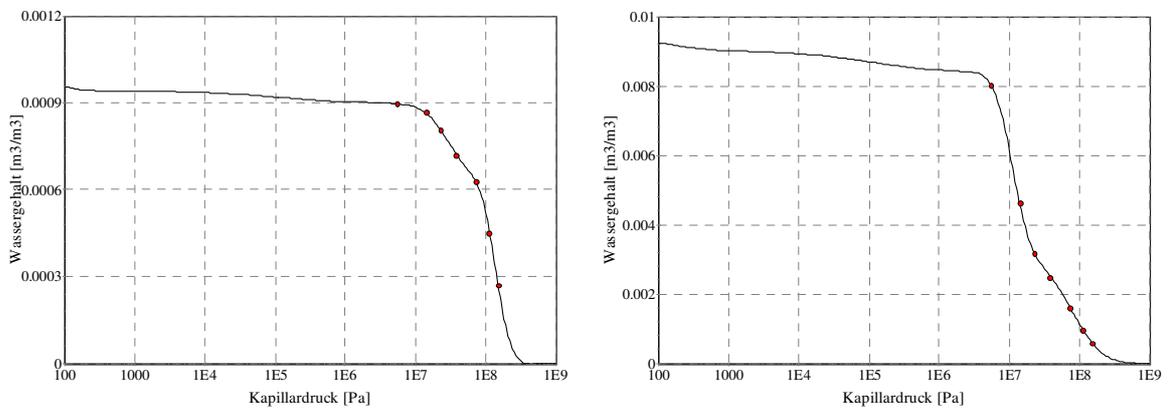


Abbildung 2.2.14: Vergleichende Darstellung der Wasserretention der Einhausungsfolien Gore Tennera (links) und Light Tex HP6320 (rechts).

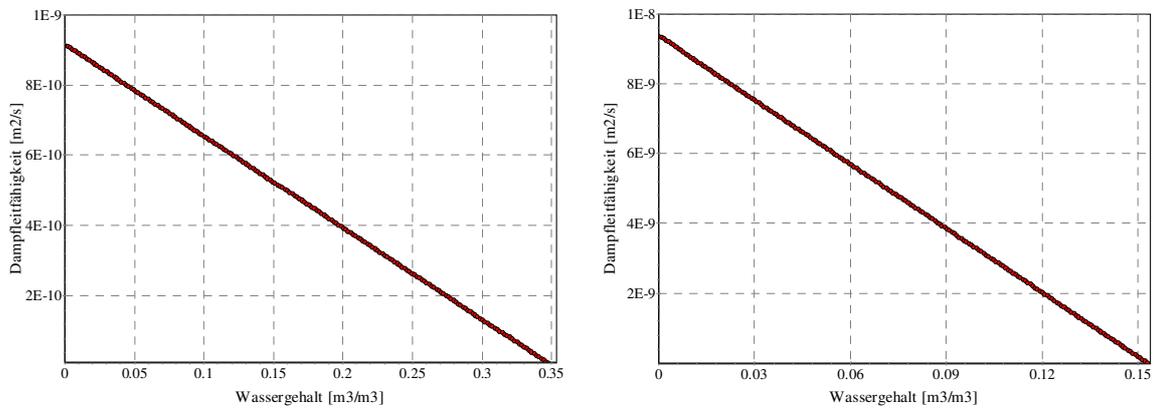


Abbildung 2.2.15: Vergleichende Darstellung der Wasserretention der Einhausungsfolien Gore Tennera (links) und Light Tex HP6320 (rechts).

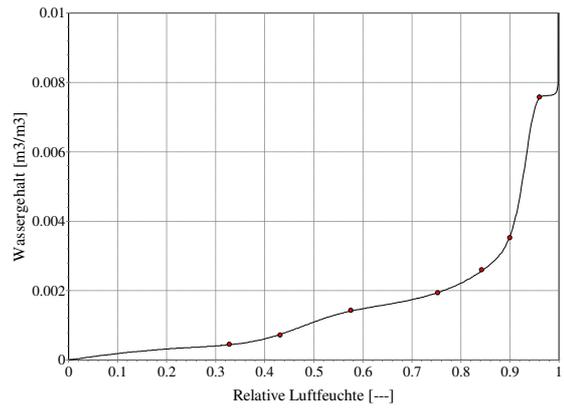
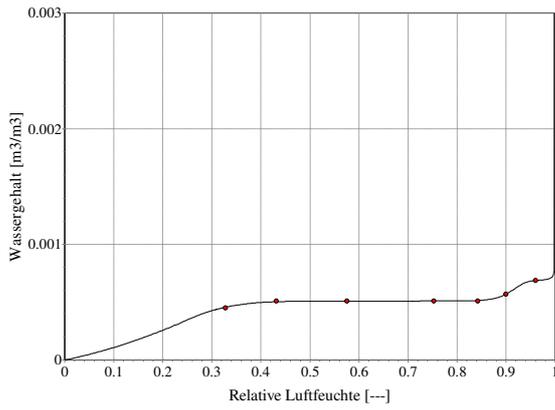


Abbildung 2.2.16: Vergleichende Darstellung der hygrischen Sorptionsisotherme der Einhausungsfolien DuPont Tyvek (links) und Lorenz Beplan (rechts).

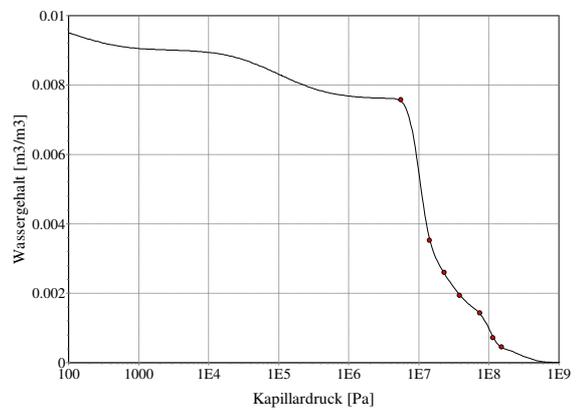
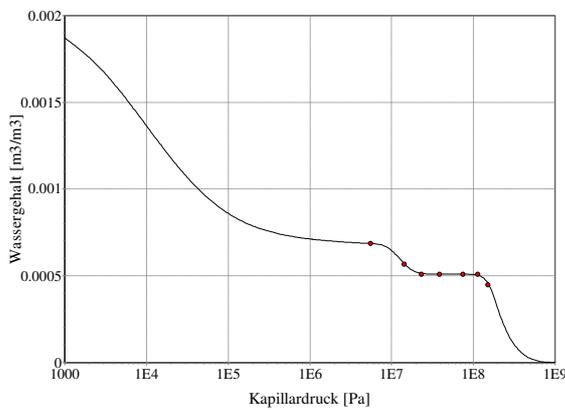


Abbildung 2.2.17: Vergleichende Darstellung der Wasserretention der Einhausungsfolien DuPont Tyvek (links) und Lorenz Beplan (rechts).

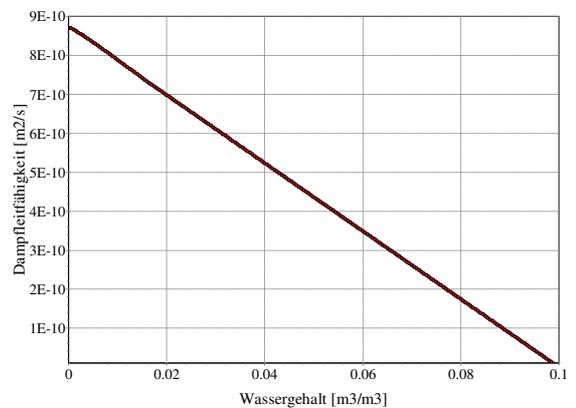
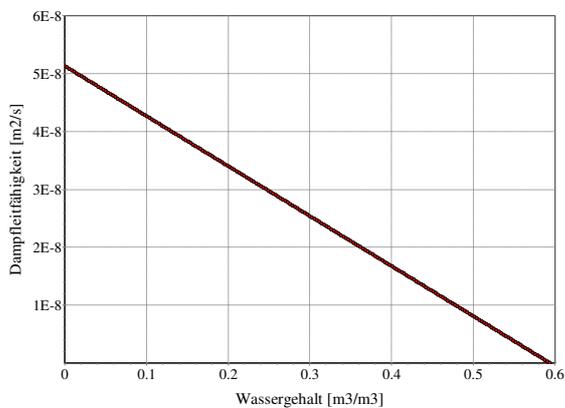


Abbildung 2.2.18: Vergleichende Darstellung der Wasserretention der Einhausungsfolien DuPont Tyvek (links) und Lorenz Beplan (rechts).

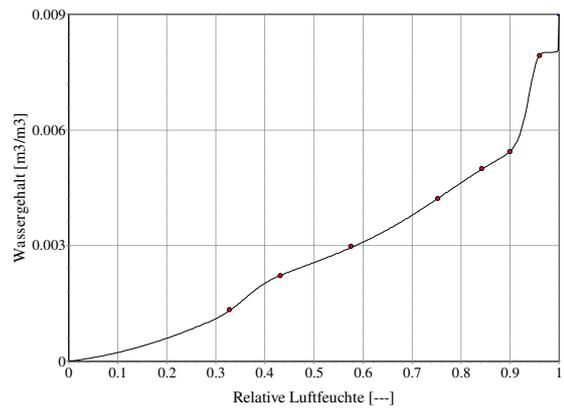
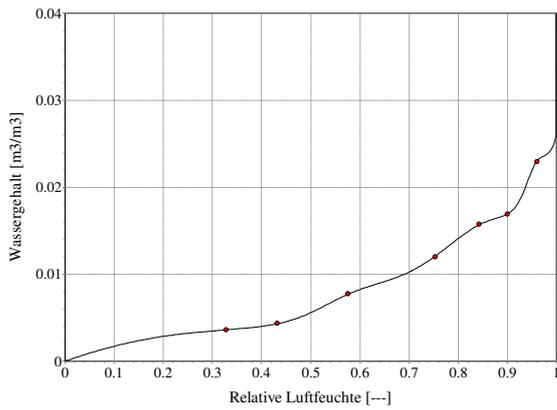


Abbildung 2.2.19: Vergleichende Darstellung der hygrischen Sorptionsisotherme der Einhausungsfolien Grünberg Kunststoffe Polyamid GR\_PA6\_05 (links) und LANXESS Europe Lustran ABS (rechts).

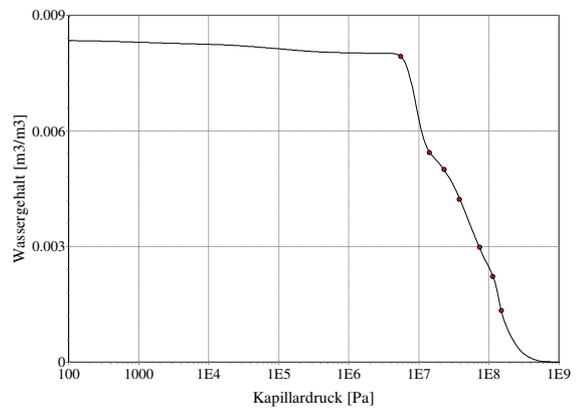
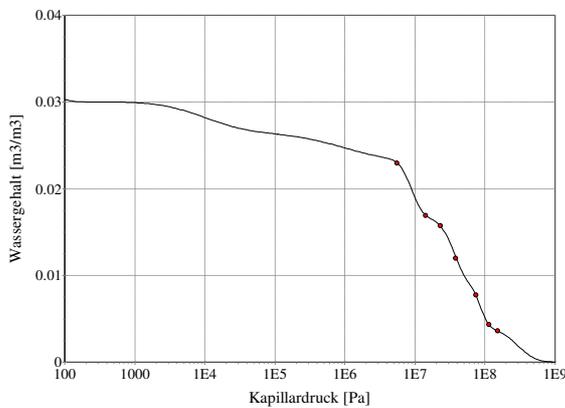


Abbildung 2.2.20: Vergleichende Darstellung der Wasserretention der Einhausungsfolien Grünberg Kunststoffe Polyamid GR\_PA6\_05 (links) und LANXESS Europe Lustran ABS (rechts).

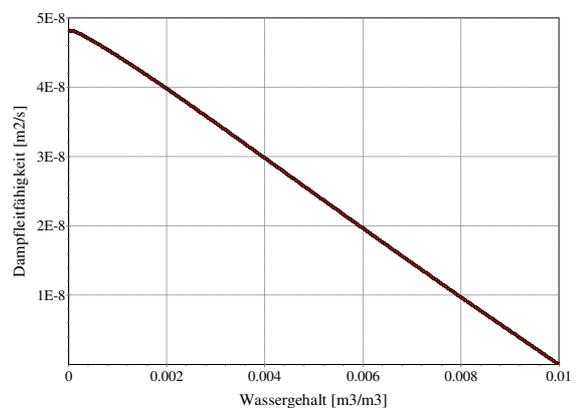
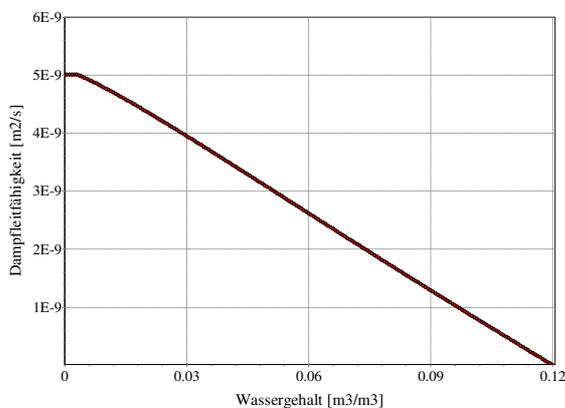


Abbildung 2.2.21: Vergleichende Darstellung der Wasserretention der Einhausungsfolien Grünberg Kunststoffe Polyamid GR\_PA6\_05 (links) und LANXESS Europe Lustran ABS (rechts).

Neben den experimentellen Untersuchungen an den Marmor Materialien wurden auch zahlreiche Folien geprüft. In den Abbildungen 2.2.13 bis 2.2.21 sind exemplarisch die Funktionsergebnisse der Folien Gore Tennera, Light Tex HP6320, DuPont Tyvek, Lorenz Beplan, Grünberg Kunststoffe Polyamid GR\_PA6\_05 und LANXESS Europe Lustran ABS dargestellt.

Mit der Lorenz Beplan wurde die Testeinhausung realisiert.

### 3. Numerische Simulation von Einhausungssystemen

Zur Analyse von Schädigungsmechanismen an den Marmorskulpturen sowie zur konstruktiven Bewertung von Einhausungen und dem resultierenden Einhausungsklima kommt die Methode der numerischen Simulation zum Einsatz. Dieses Verfahren ermöglicht eine Analyse der unterschiedlichen Varianten, ohne unmittelbare langandauernde Messungen an jeder Variante durchführen zu müssen.

Im Rahmen der Arbeiten kommt das wissenschaftliche Simulationswerkzeug DELPHIN 5 zum Einsatz. Damit wird es möglich den gekoppelten Feuchte- und Wärmetransport in der jeweiligen Einhausung und dem Marmor der Skulpturen zu beschreiben, wobei auch die relevanten Strahlungs- und Lüftungseffekte berücksichtigt werden können. Im Folgenden wird ein Teil der durchgeführten Untersuchungen dokumentiert. Die komplette Dokumentation aller Ergebnisse umfasst 85 GB und würde den Rahmen des Berichtes sprengen. Aus diesem Grunde werden exemplarische Ergebnisse in Form von Übersichtsgraphiken vergleichend dargestellt und so der Überblick gewahrt.

#### 3.1 Das Simulationsprogramm DELPHIN 5<sup>®</sup>

Mit den modernen numerischen Simulationswerkzeugen wird es möglich Umwelteinflüsse und resultierende Schädigungsprozesse an den Marmorskulpturen abzubilden. Die Güte und Verlässlichkeit der Aussagen ist jedoch an die Qualität der Eingangsdaten geknüpft. So bestehen u.a. sehr hohe Anforderungen an die benötigten Materialdaten. Im Folgenden wird das verwendete Simulationswerkzeug kurz vorgestellt.

Das Simulationsprogramm DELPHIN unterteilt sich in einen Numerikteil und ein Paket für Pre- und Postprocessing. Der Preprocessor dient der grafischen Generierung und Vernetzung des geometrischen Modells, sowie zur Spezifikation und Zuordnung der Randbedingungen und Materialeigenschaften. Angeschlossen ist eine Baustoffdatenbank, deren Materialkennwerte in Form von feuchte- und temperaturabhängigen Materialfunktionen hohen Ansprüchen der Modellierung genügen. In diese Materialdatenbank sind die relevanten Materialfunktionen des Carraramarmors, des Skulpturenmarmors „Unter den Linden“ und die Foliensysteme. Eine Klimadatenbank enthält die charakteristischen Wettersequenzen des Standortes und des relevanten Testreferenz (hier TRY 4) vor.

Der numerische Rechenkern (Solver) verarbeitet die Eingangsdaten nach dem vorgegebenen gekoppelten Modell zur Beschreibung des Stoff und Energietransportes und liefert Zustandsfelder, Flüsse, Quellen, Senken etc. als Output Dateien. Mit dem Postprocessing können die Ausgabedaten visualisiert werden, wobei unterschiedliche graphische Darstellungsmöglichkeiten auch für komplexe geometrische 2 dimensionale Details bestehen.

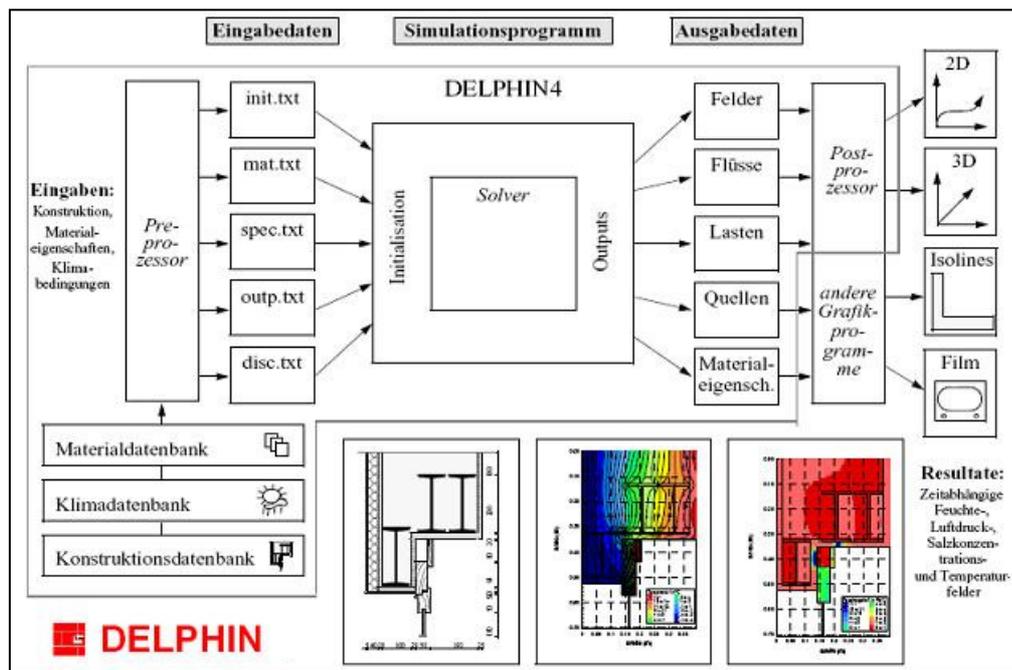


Abbildung 3.1: Überblick über die DELPHIN Struktur mit den jeweiligen Programmkomponenten.

Die dem numerischen Wärme-, Feuchte-, Luft- und Salztransportprogramm DELPHIN 5 zugrunde liegende Theorie ist von thermodynamischen Prinzipien abgeleitet, welche die Transportprozesse und die Übergänge zwischen der festen, der flüssigen und der gasförmigen Phase beschreiben. Die Simulation des Verhaltens von porösen Materialien basiert hier auf der Theorie von Transportprozessen in Multiphasensystemen. Dabei existieren in allen drei Phasen mehrere Komponenten. In der festen Phase ausgefälltes Salz sowie der poröse Baustoff selbst, in der flüssigen Phase Wasser und gelöstes Salz, in der gasförmigen Phase schließlich Luft und Wasserdampf.

Bei einer genauen Behandlung des Transports dieser Bestandteile ergibt sich eine große Zahl von Transportvorgängen und zugehörigen Diffusions- bzw. Advektionskoeffizienten. Diese Transportkoeffizienten werden als Materialeigenschaften abhängig vom Systemzustand beschrieben und sind in Form der Materialfunktionen bereits zur Verfügung gestellt.

Die hygrischen Materialeigenschaften durchwandern Skalen von mehreren Größenordnungen. Aus der Porenvolumenverteilung wird beispielsweise ersichtlich, dass sowohl Poren im Nano- Skalenbereich, als auch Makroporen die Speicher- und Transportprozesse bestimmen. Die Flüssigwasser-transportfunktion durchwandert dabei 9 Größenordnungen und stellt hohe Anforderungen an die Numerik.

### 3.2 Simulation unterschiedlicher Einhausungssysteme

Abbildung der Skulpturen in der Simulation. Die Komplexität der Marmorskulpturen auch nur annäherungsweise in einer hygrothermischen Simulationssoftware abzubilden ist nicht notwendig und wäre sehr zeitaufwändig. Für die Simulationen wurden die Skulpturen auf die hygrothermisch relevanten Skulpturenbereiche reduziert: einen dünnen, filigranen Bereich (z.B. anzutreffen an Arm, Flügelbereiche oder Speer, etc.), einem massiven Bereich (anzutreffen an größeren Körpern oder dem Torso der Skulptur) und einen im Volumen dazwischen liegenden Bereich (z.B. dem Bein). Mit diesen drei Bereichen lassen sich die wesentlichen Teile der Skulpturen abbilden. Die Rechenzeiten werden durch diese Maßnahme stark reduziert, ohne dass grundlegende Informationen verloren gehen.

Der Arm reagiert wegen der geringen Masse und des geringen Speichervolumens schneller auf äußere Klimaeinwirkungen als beispielsweise der Torso einer Skulptur. Auch wird ein von oben bestrahlter Körper andere Reaktionen zeigen, als ein beschatteter.

Unterschiede bestehen auch in der Orientierung der Skulpturenbereiche. So weisen südliche Expositionen einen höheren Strahlungsanteil auf, als z.B. nördlich orientierte und der Schlagregen am Standort Berlin ist in der weltlichen Exposition am größten. Um diese Unterschiede abzubilden werden für repräsentative Positionen der Simulationsskulpturen die thermodynamischen Zustandsgrößen ausgewiesen. Die jeweiligen Positionen können der Abbildung 3 entnommen werden. An diesen Positionen werden die unterschiedlichen Einhausungsvarianten miteinander verglichen.

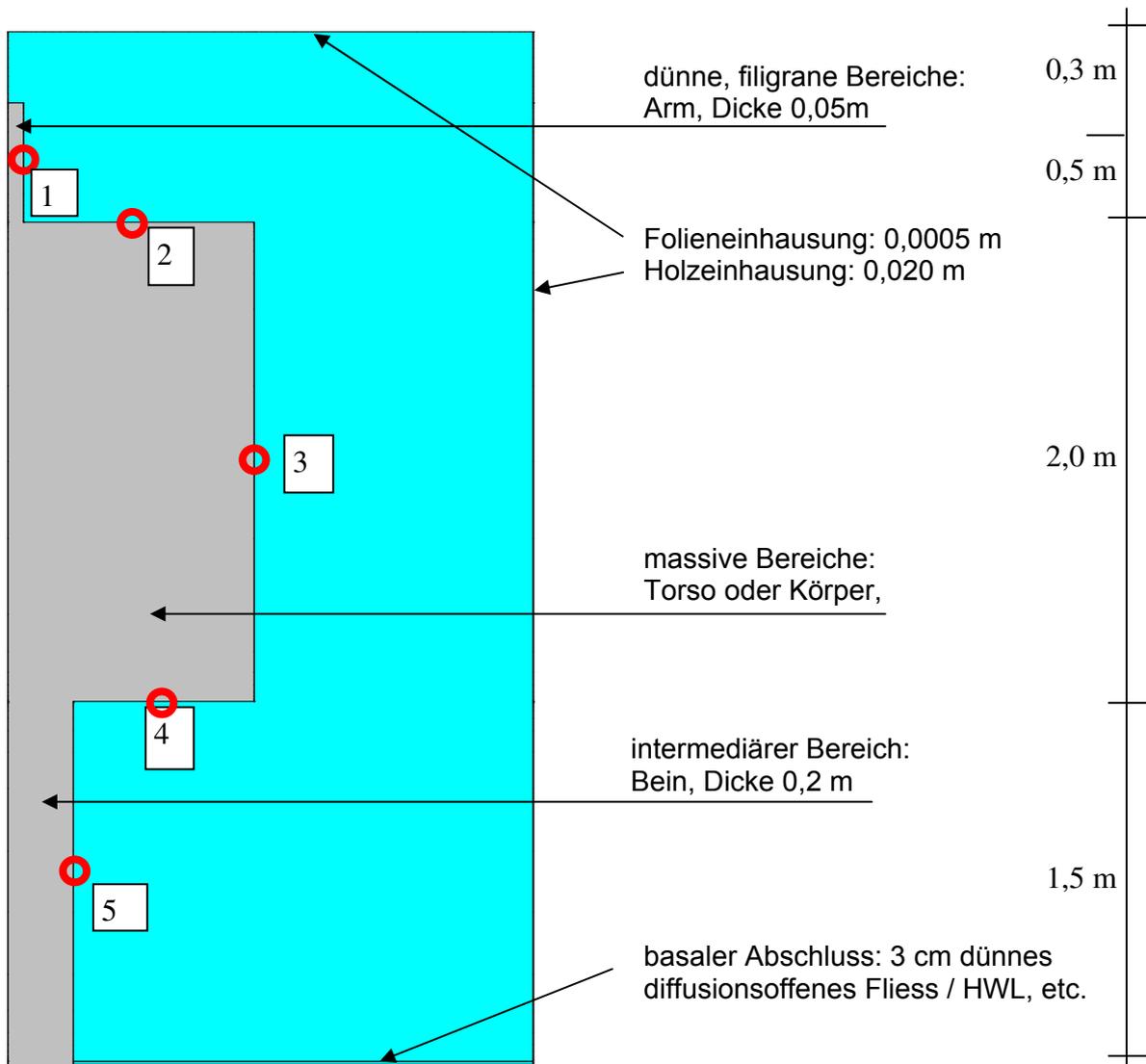


Abbildung 3.2: Schemaskizze der idealisierten Skulptur in symmetrischer Anordnung. Die Einhausung (hier: Folie) ist aufgrund der geringen Dicke der Folien hier nicht erkennbar. Die repräsentativen Ausgabepositionen sind rot markiert.

### Untersuchte Simulationsvarianten

Von den untersuchten Varianten werden die folgenden Studien in diesem Bericht ausgewertet:

- Luftwechsel: Für die Luft in der Folieneinhausung werden unterschiedliche Luftwechsel angenommen. Die Simulationen erfolgten mit Luftwechselraten von 0.1, 0.5 und 2.5 1/h. Ein Luftwechsel von 0.5 1/h bedeutet, dass das Luftvolumen in der Einhausung zu 50% pro Stunde mit Außenluft ausgetauscht wird. Folien- oder auch Holzeinhausungen umschließen die Skulpturen nicht hermetisch dicht ab. Folglich verbleibt eine gewisse Luftwechselrate. Hohe Luftwechsel repräsentieren einen hohen Luftaustausch zwischen dem Einhausungsinnenraum und der Außenluft.

- Orientierung: Die Oberflächen sind nach Norden, Süden und Westen orientiert. Westlich exponierte Bereiche sind besonders dem Schlagregen ausgesetzt, die südlichen Expositionen weisen eine höhere kurzweilige Strahlungslast auf, der Norden zeigt kühlere Bedingungen.
- Material: Bei den Einhausungsvarianten werden unterschiedliche Materialien verwendet. Bei der Holzeinhausung werden üblicherweise Fichtenholzplatten als Baumaterial verwendet. Bei den Folien kommen unterschiedliche Materialien zum Einsatz. Feuchteadaptive Dampfbremsen mit variablem  $s_d$ -Wert sind bei trockenen Bedingungen relativ dicht ( $s_d$ -Wert = 5) und lassen bei steigendem Feuchtegehalt einen zunehmenden Dampftransport zu ( $s_d$ -Wert = 0.7). Die Transparenten PE-Folien hier konstante Diffusionsraten auf mit einem  $s_d$ -Wert von 1.0 und 6.0 m auf.

Aus den gewählten Varianten ergeben sich unterschiedliche Simulationsrechnungen mit verschiedenen Kombinationen. Die korrespondierende Variantenmatrix listet die Tabelle 1 übersichtlich auf.

Tabelle 3.1: Variantenmatrix der abgebildeten Simulationsrechnungen

Ausrichtung	Material	Luftwechsel
Nord	feuchteadaptive Dampfbremse	0.1, 0.5 und 2.5
Nord	Holzeinhausung	0.1, 0.5 und 2.5
Nord	PE-Folie, $s_d$ = 1,0 m	0.1, 0.5 und 2.5
Nord	PE-Folie, $s_d$ = 6,0 m	0.1, 0.5 und 2.5
Nord	ohne Einhausung	Realklima
West	feuchteadaptive Dampfbremse	0.1, 0.5 und 2.5
West	Holzeinhausung	0.1, 0.5 und 2.5
West	PE-Folie, $s_d$ = 1,0 m	0.1, 0.5 und 2.5
West	PE-Folie, $s_d$ = 6,0 m	0.1, 0.5 und 2.5
West	ohne Einhausung	Realklima
Süd	feuchteadaptive Dampfbremse	0.1, 0.5 und 2.5
Süd	Holzeinhausung	0.1, 0.5 und 2.5
Süd	PE-Folie, $s_d$ = 1,0 m	0.1, 0.5 und 2.5
Süd	PE-Folie, $s_d$ = 6,0 m	0.1, 0.5 und 2.5
Süd	ohne Einhausung	Realklima

## Klimabedingungen

Zur Bewertung der unterschiedlichen Einhausungssysteme werden bei der numerischen Simulation reale Außenklimabedingungen angesetzt. Für das instationäre Außenklima werden die Stundenwerte eines so genannten Testreferenzjahres mit durchschnittlichen Witterungsverhältnissen verwendet. Testreferenzjahre sind aus realen Witterungsabschnitten eines Standortes zusammengesetzt. Die Zeitabschnitte werden so bestimmt, dass die Jahreszeitenmittelwerte der einzelnen Elemente aller Regionen möglichst gut mit den dreißigjährigen Mittelwerten übereinstimmen.

Die Testreferenzjahre werden für verschiedenste Aufgaben eingesetzt, z.B. für die Bewertung der klimatischen Belastung, die Bemessung von Wärmedämmmaßnahmen oder zur Dimensionierung gebäudetechnischer Anlagen.

Der Deutsche Wetterdienst, ansässig in Offenbach, hat Deutschland in 15 verschiedene Klimaregionen eingeteilt. Potsdam liegt in Testreferenzregion 4, Nordostdeutsches Tiefland, deren Referenzstandort zufällig Potsdam ist. Dieser Standort repräsentiert das Klima Berlins. Im Folgenden werden die bei der Simulation verwendeten Klimadaten dokumentiert.

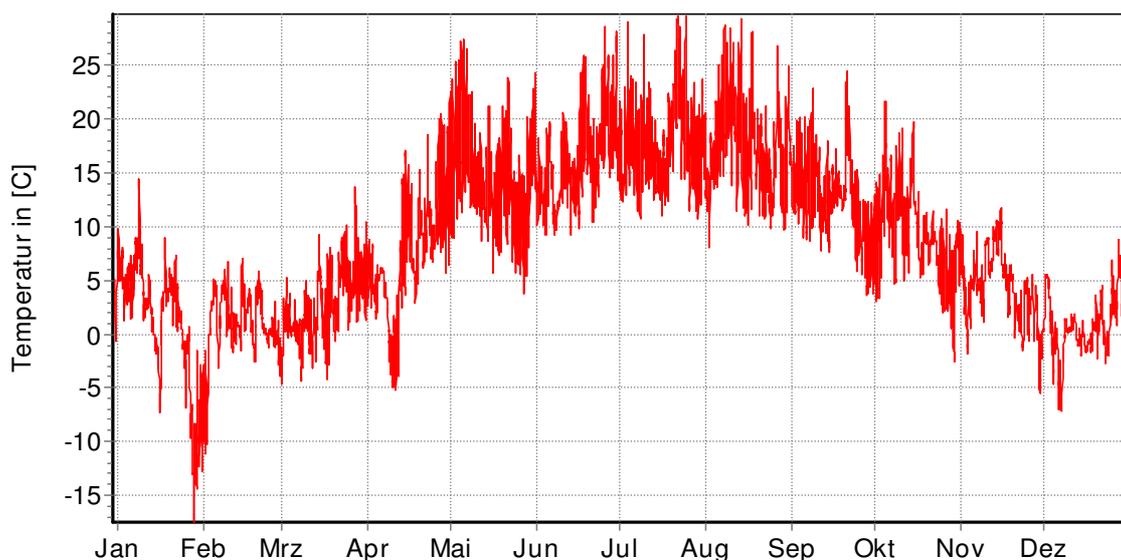


Abbildung 3.3: Jährlicher Verlauf der Temperatur für den Standort Potsdam (durchschnittliches Testreferenzjahr).

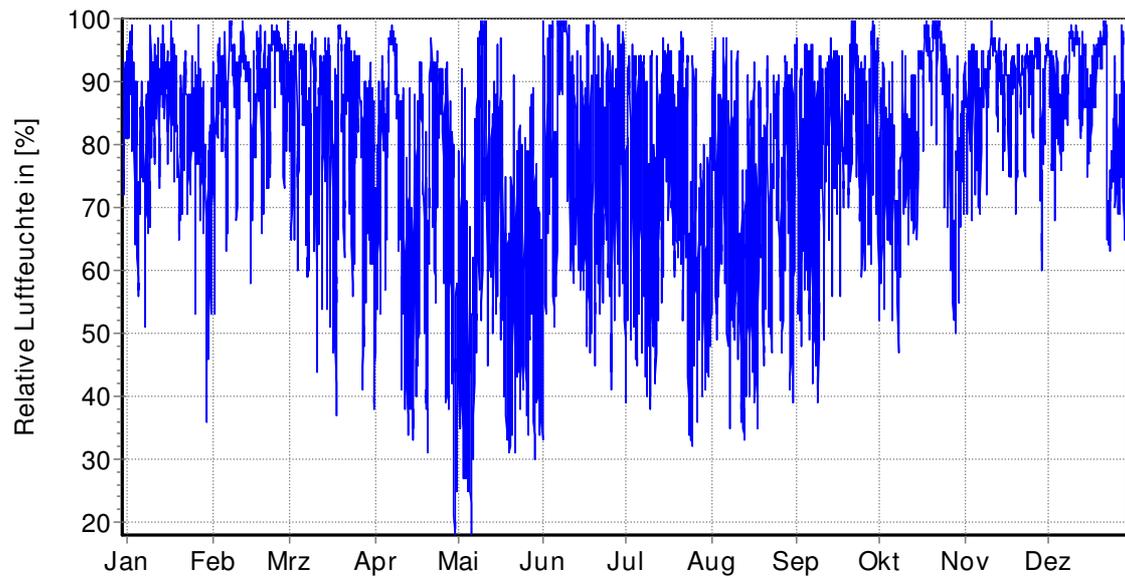


Abbildung 3.4: Jährlicher Verlauf der relativen Luftfeuchte für den Standort Potsdam (durchschnittliches Testreferenzjahr).

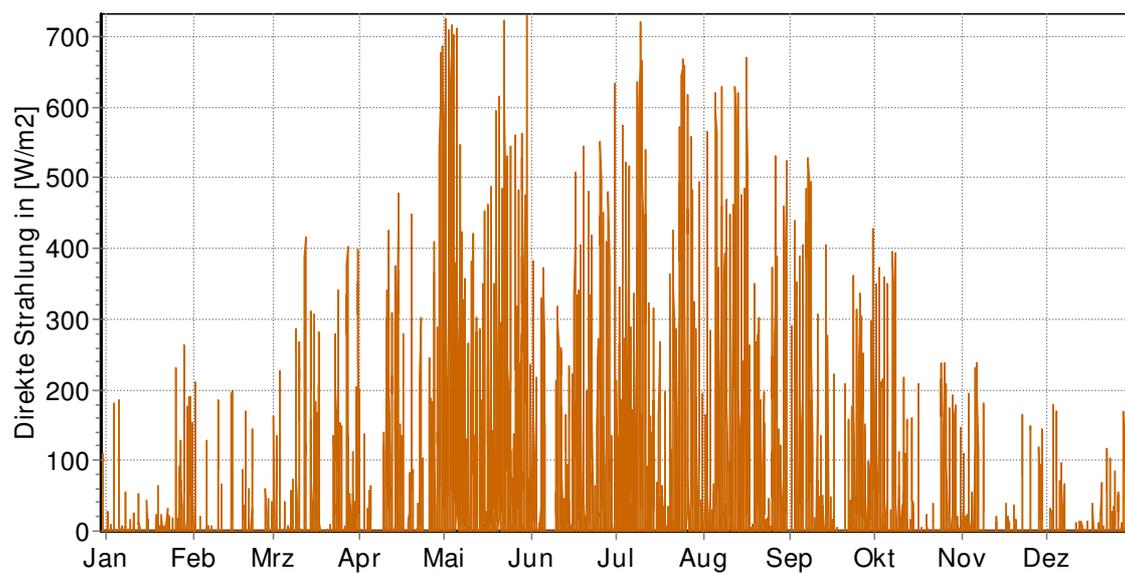


Abbildung 3.5: Jährlicher Verlauf der direkten Strahlung für den Standort Potsdam (durchschnittliches Testreferenzjahr).

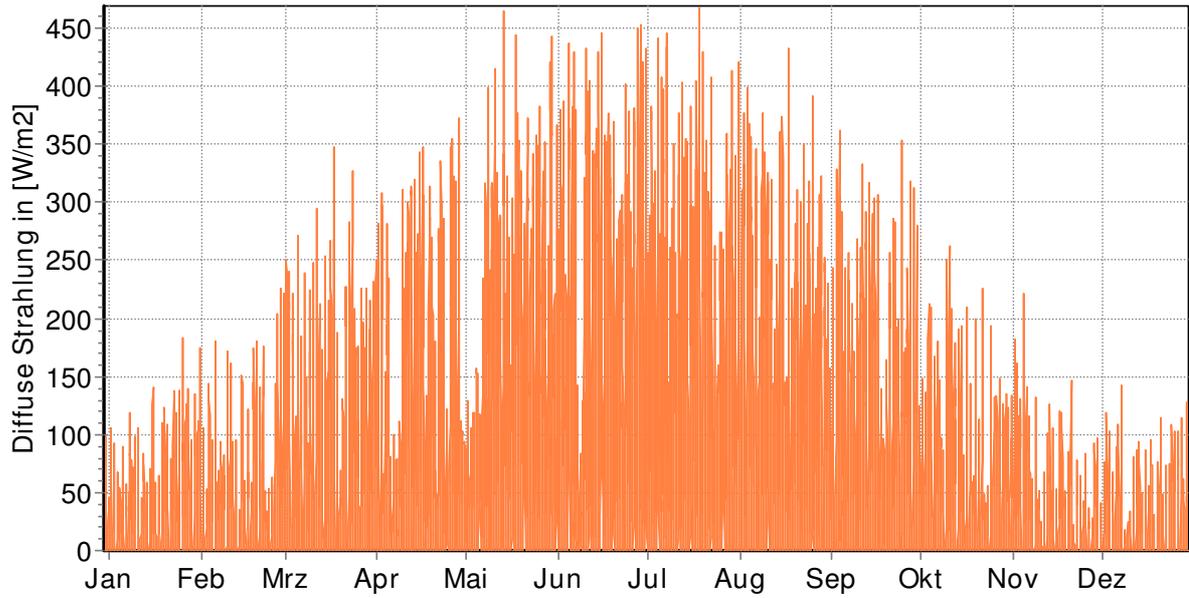


Abbildung 3.6: Jährlicher Verlauf der diffusen Strahlung für den Standort Potsdam (durchschnittliches Testreferenzjahr).

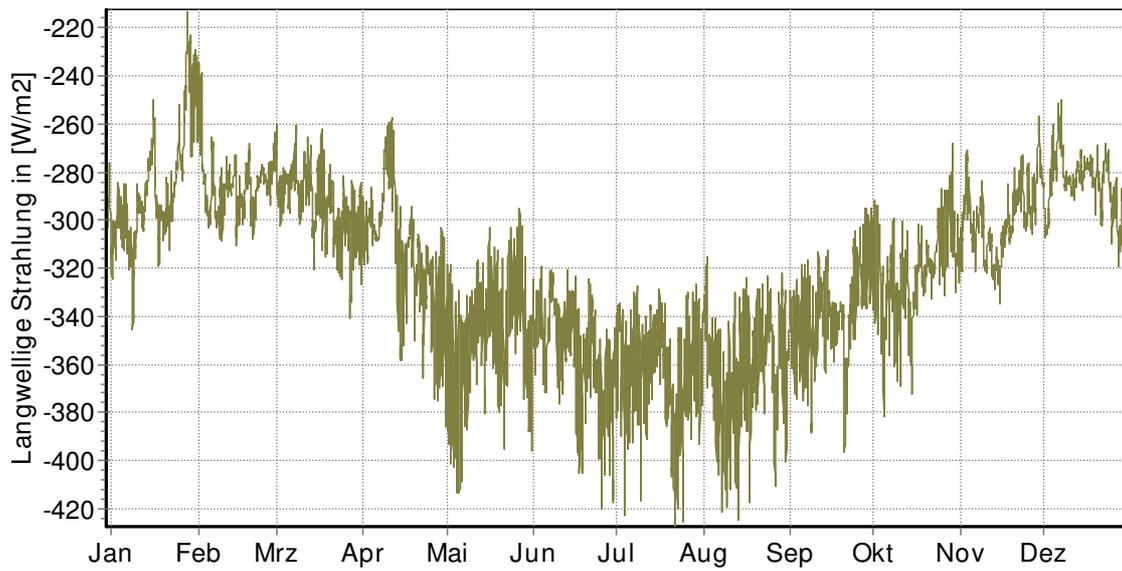


Abbildung 3.7: Jährlicher Verlauf der langwelligen Abstrahlung für den Standort Potsdam (durchschnittliches Testreferenzjahr).

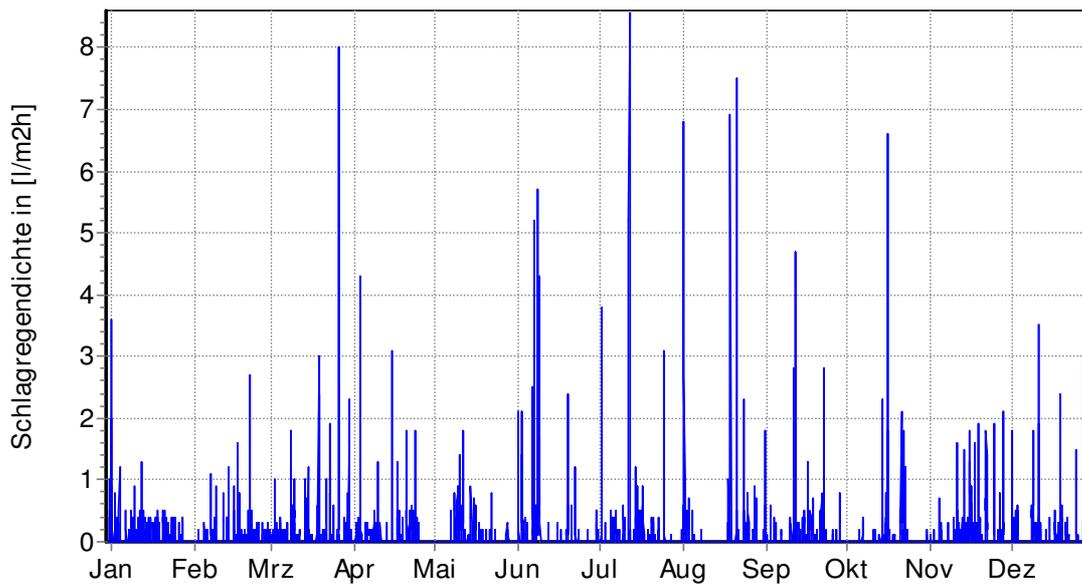


Abbildung 3.8: Jährlicher Verlauf der Schlagregendichte für den Standort Potsdam (durchschnittliches Testreferenzjahr).

Da in den Datenreihen des Deutschen Wetterdienstes keine Werte mehr für die stündliche Niederschlagsmenge enthalten sind, wurden diese mit Hilfe der detaillierten meteorologischen Informationen in Christoffer et al. 2004 sowie aus langjährigen Monatsmittelwerten des Testreferenzortes generiert. Die gesamte Schlagregenmenge auf eine horizontale Fläche der in den Simulationen verwendeten Regendaten summiert sich im Jahr für TRY-Region 4 auf 606,2 l/(m²a). Die auf die Skulpturen auftreffende Schlagregenmenge wird aus der Schlagregendichte, die Windrichtung und Windgeschwindigkeit berechnet. In den vorliegenden Simulationen wurde die Schlagregenmenge nur für die Berechnungen verwendet, in denen keine schützende Einhausung vorgesehen wurde.

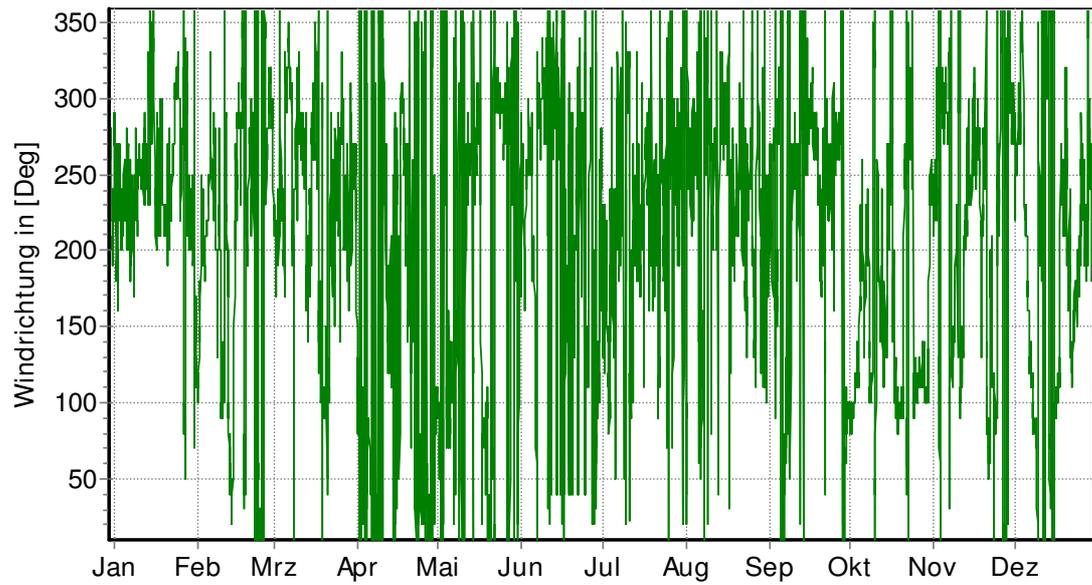


Abbildung 3.9: Jährlicher Verlauf der Windrichtung für den Standort Potsdam (durchschnittliches Testreferenzjahr).

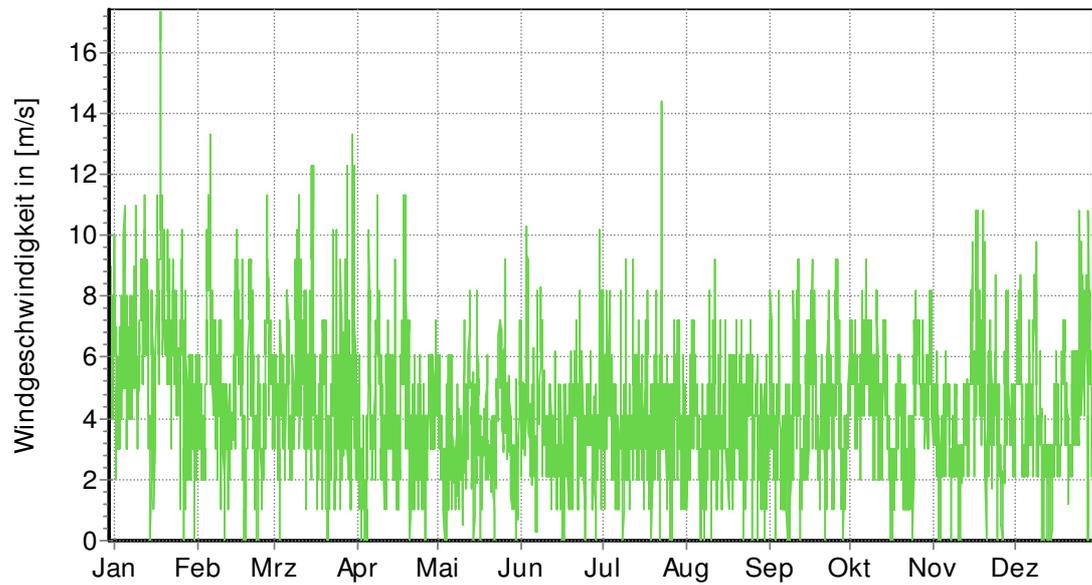


Abbildung 3.10: Jährlicher Verlauf der Windgeschwindigkeit für den Standort Potsdam (durchschnittliches Testreferenzjahr).

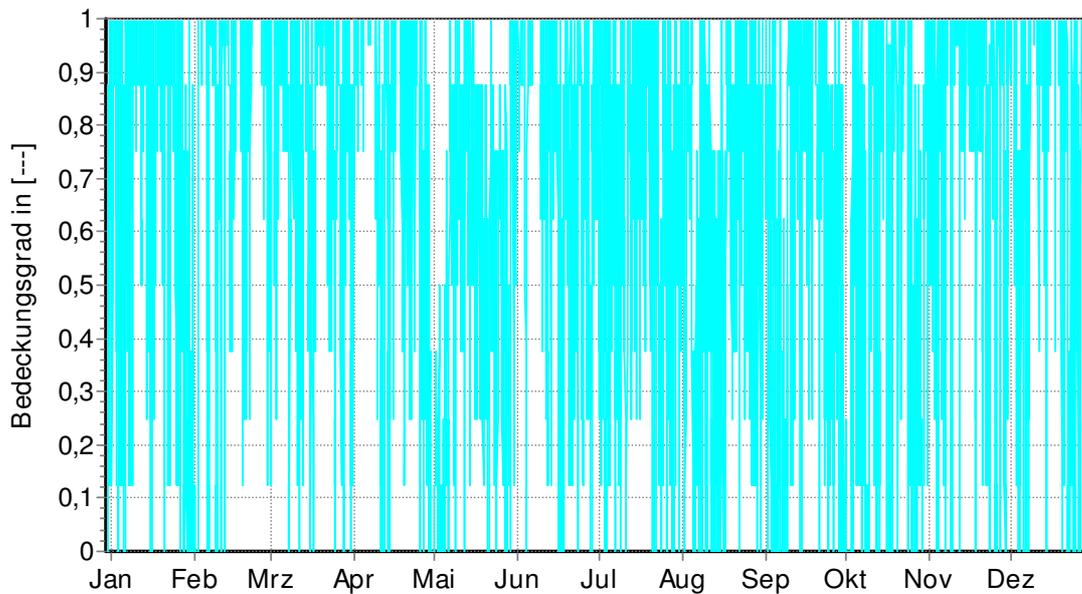


Abbildung 3.11: Jährlicher Verlauf des Bedeckungsgrads für den Standort Potsdam (durchschnittliches Testreferenzjahr).

Die üblichen Randbedingungen, welche bei Simulationen von Wand- und Dachkonstruktionen im Bauwesen zum Ansatz kommen, können nicht auf die Situation der Skulpturen mit Einhausung übertragen werden. Zum einen können die Folien der Einhausung sowohl transparent, semi-transparent wie auch opak sein. Zudem stehen auch die dünnen Folien im langwelligen Strahlungsaustausch mit der Oberfläche der Skulptur, unbeeinflusst ist von der Luftwechselrate oder hygrothermischen Zustand der Luftschicht dazwischen.

Demzufolge wurde bei den Folien ein hoher Absorptionskoeffizient von 0,9 gewählt, d.h., 90% der auftreffenden kurzwelligen Strahlungsenergie der Sonne werden von der Oberfläche absorbiert. Dies berücksichtigt, dass bei transparenten Folien ein Teil der kurzwelligen Strahlung durch die Folie hindurch auf die Oberfläche der Skulpturen trifft. Bei dunkleren, opaken Folien sind zwar kaum durchlässig für kurzwellige Strahlung, absorbieren allerdings aufgrund Ihrer Farbe einen höheren Anteil des Sonnenlichts. Bei der Holzeinhausung wurde dagegen nur ein Koeffizient von 0,7 angesetzt. Bei allen Einhausungsarten wurde der langwellige Strahlungsaustausch zwischen Skulpturoberfläche und Einhausung berücksichtigt.

## 4. Exemplarische Darstellung der Simulationsergebnisse

Aus der Variantenmatrix in Tabelle 1 geht hervor, dass insgesamt 45 Simulationsrechnungen durchzuführen waren. Aufgrund der Komplexität der Simulation war ein Rechenzeitbedarf von 4-5 Tagen pro Variante notwendig. Um die Aufgabe in einer akzeptablen Zeit zu realisieren, wurde der IBK Rechnerpool genutzt. Zur Auswertung wurden für jede Variante die Simulationsergebnisse graphisch dargestellt und auf dieser Basis bewertet. Im Rahmen der vorliegenden Studie werden einzelne Ergebnisse jedoch nur exemplarisch dargestellt.

### 4.1 Holzeinhausung, Nordorientierung, Luftwechselrate $n = 2.5$

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Variante „Holzeinhausung, Nordorientierung, Luftwechselrate  $n = 2.5$ “ vorgestellt. Sämtliche gesetzten Ausgaben werden hier für die Variante vorgestellt. Die Felddaten repräsentieren die thermodynamischen Zustandsgrößen und werden nachfolgend für ausgewählte Zeitpunkte wiedergegeben. Faktisch liegen 2D- Contourplot- Filme vor, die sich in einem Bericht nicht abbilden lassen.

#### Integrale Wassermassendichten

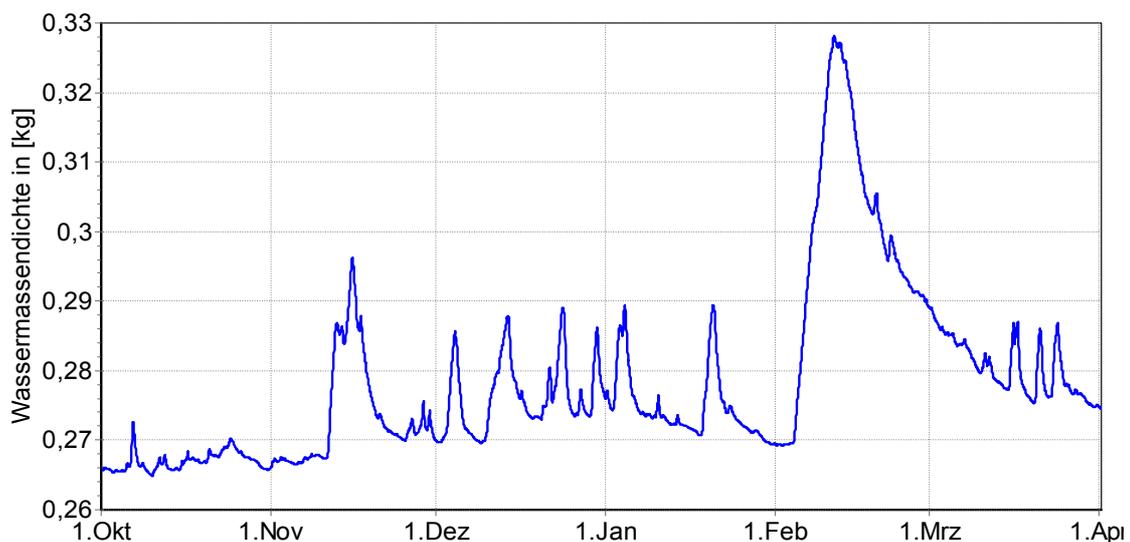


Abbildung 4.1: Integral der Wassermassendichte des Torsos im Zeitraum Oktober bis April.

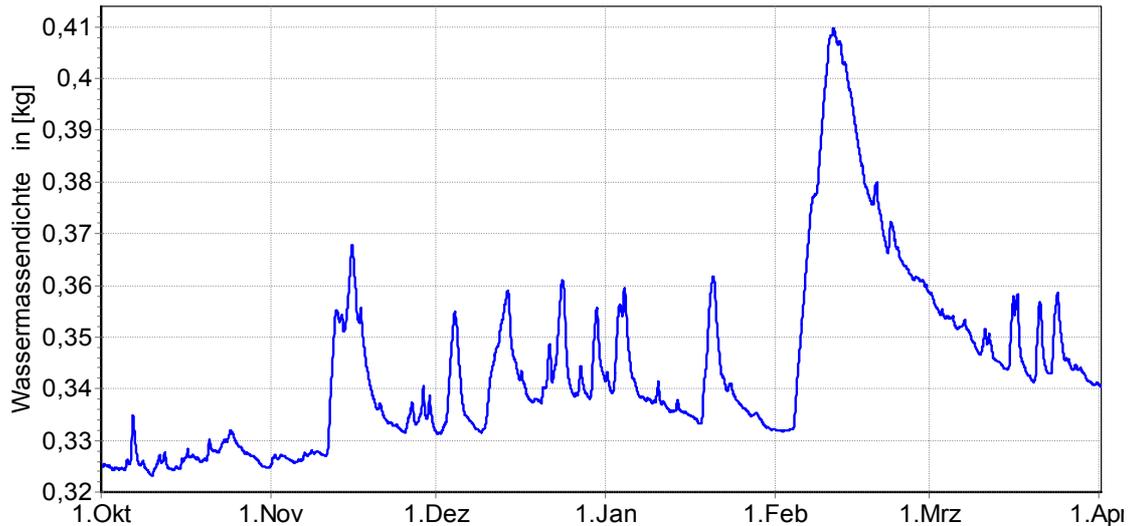


Abbildung 4.2: Integral der Wassermassendichte der gesamten Marmorskulptur im Zeitraum Oktober bis April.

Aus den integralen Wassermassendichten leitet sich die Feuchtegehalte der betrachteten Skulptur, bzw. der dargestellten Bereiche ab. Aus dem Kurvenverlauf kann die stärkste Feuchteanreicherung Anfang Februar identifiziert werden. Rund 65% der Feuchte liegt im Torso vor, der Rest fällt auf die anderen Bereiche der Skulptur.

#### Relative Luftfeuchte in der rechten oberen Ecke in der Einhausung

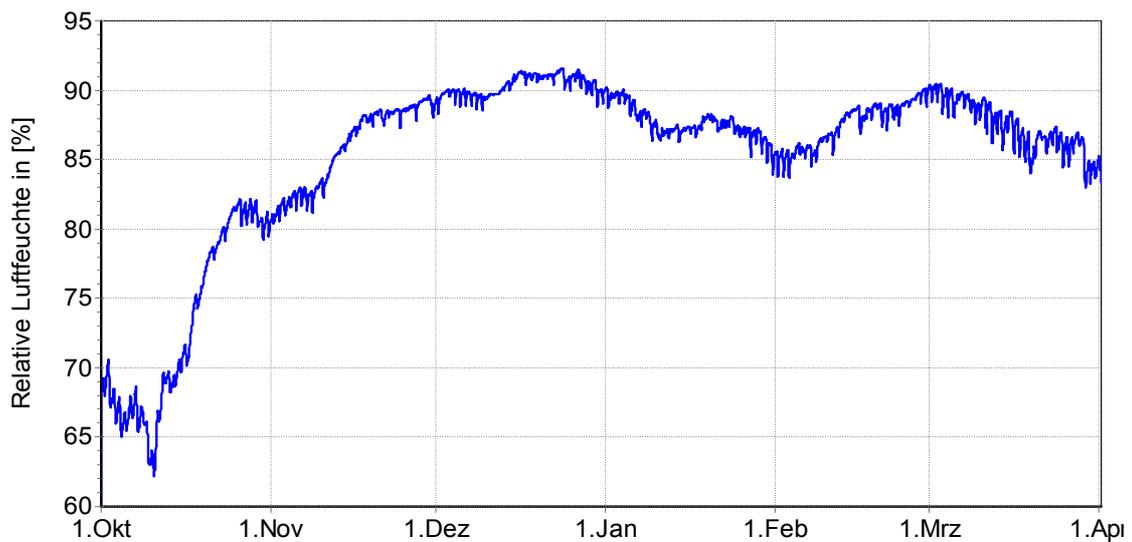


Abbildung 4.3: Relative Luftfeuchte der rechten oberen Ecke innerhalb der Einhausung im Zeitraum Oktober bis April

Unmittelbar nach dem Einhausen der Skulptur weist der Einhausungsraum eine relativ geringe Luftfeuchte von rund 65% auf. Mit zunehmender Dauer der Einhausung kommt es zu einem Ansteigen der Luftfeuchte auf ca. 90%.

Ausgabefelder der Temperatur und der relativen Luftfeuchte nach 128 Tagen

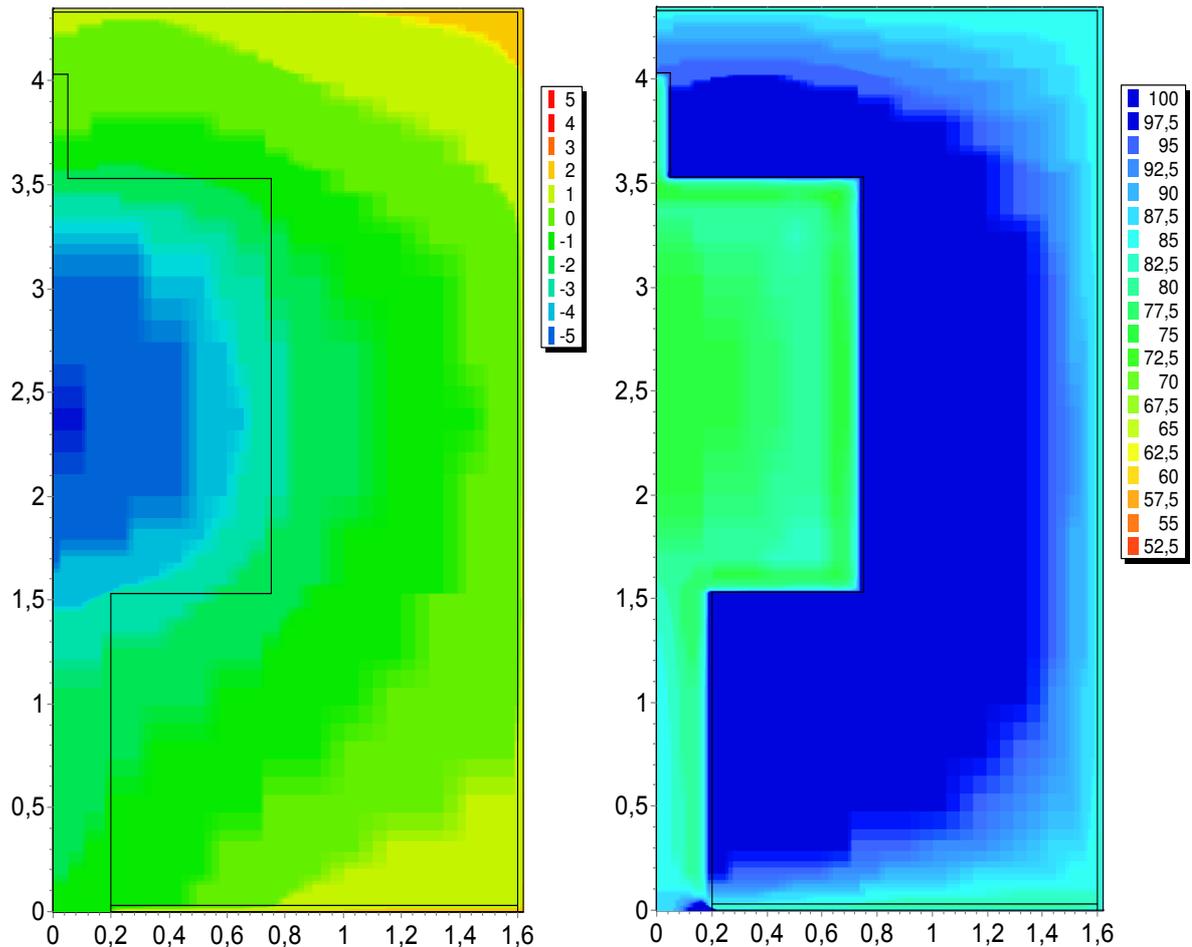


Abbildung 4.4: links - Feld der Temperatur innerhalb der Holzeinhausung zum Zeitpunkt  $t = 128$  Tage bei einer Temperaturskala von  $-5^{\circ}\text{C}$  bis  $+5^{\circ}\text{C}$ . rechts - Feld der relativen Luftfeuchte innerhalb der Holzeinhausung zum Zeitpunkt  $t = 128$  Tage bei einer Luftfeuchteskala von 50% bis 100% relative Feuchte

Aus dem Diagramm geht hervor, dass der Torso aufgrund seiner großen Masse noch sehr kalt ist, während die geringmächtigen Bereiche der Skulptur sich bereits erwärmt haben. Aufgrund des hohen Luftwechsels wird Luftfeuchte an die Skulptur herangetragen, wobei Feuchte an den kühlen Bereichen kondensieren kann.

## Ausgabefelder der Temperatur und der relativen Luftfeuchte nach 180 Tagen

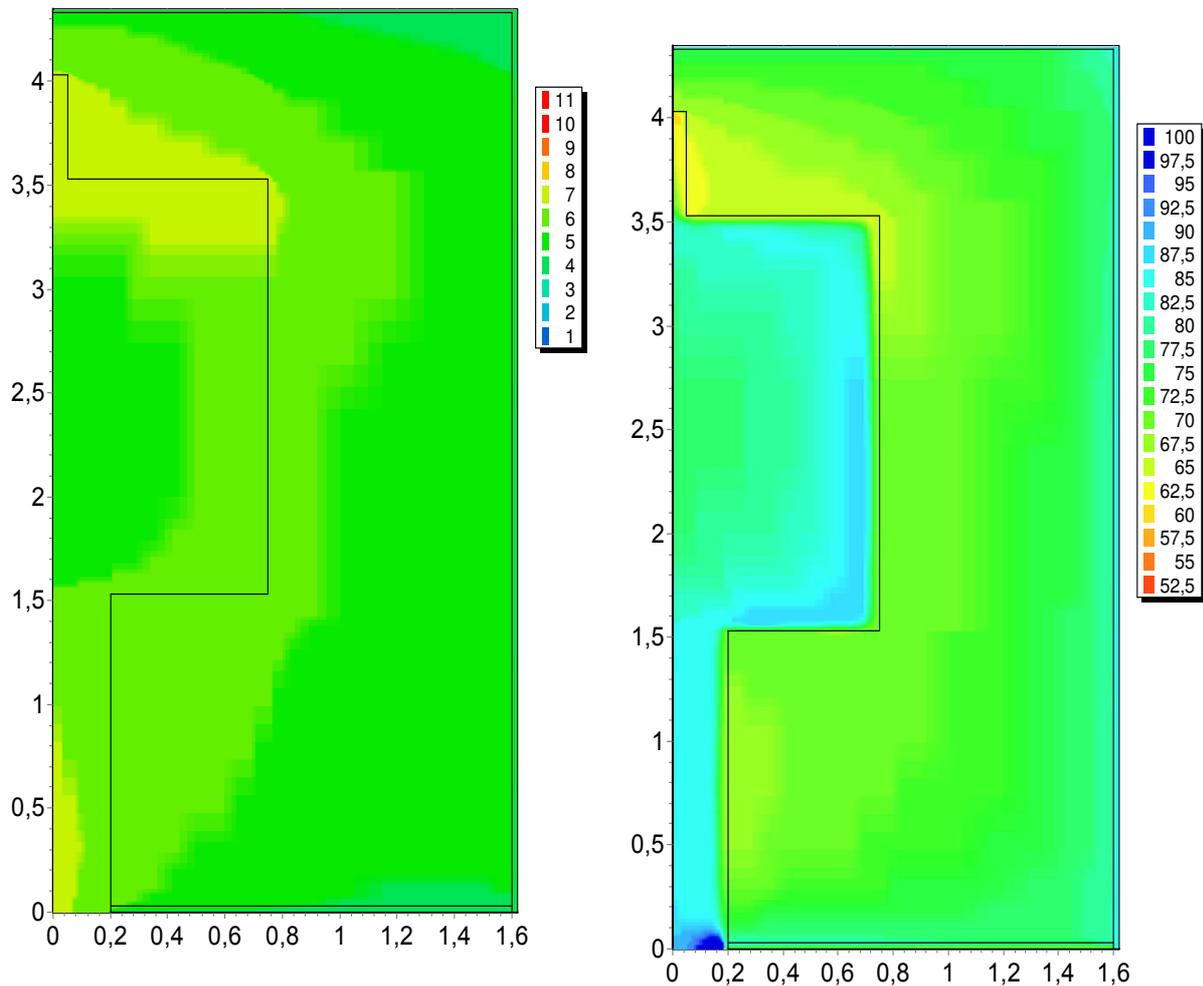


Abbildung 4.5: links - Feld der Temperatur innerhalb der Holzeinhausung zum Zeitpunkt  $t = 180$  Tage bei einer Temperaturskala von  $+1^{\circ}\text{C}$  bis  $+11^{\circ}\text{C}$ . rechts - Feld der relativen Luftfeuchte innerhalb der Holzeinhausung zum Zeitpunkt  $t = 180$  Tage bei einer Luftfeuchteskala von 50% bis 100% relative Feuchte.

Aus dem Diagramm geht hervor, dass die weniger massiven Bereiche geringfügig höhere Temperaturen aufweisen. Durch den Luftwechsel wird wärmere Luft im Beinbereich wirksam. Ein gewisser Strahlungsaustausch erfolgt auch über die Holzeinhausung, die die nach oben gerichteten Bereiche der Skulptur erwärmen. Aufgrund des hohen Luftwechsels, der von unten in die Einhausung eindringt, haben sich Bein und Torso von unten her stärker befeuchtet. Die filigranen Elemente der Skulptur im oberen Bereich der Einhausung sind infolge des Strahlungseinflusses stärker abgetrocknet.

### Profil der relativen Luftfeuchte Messpunkt 1

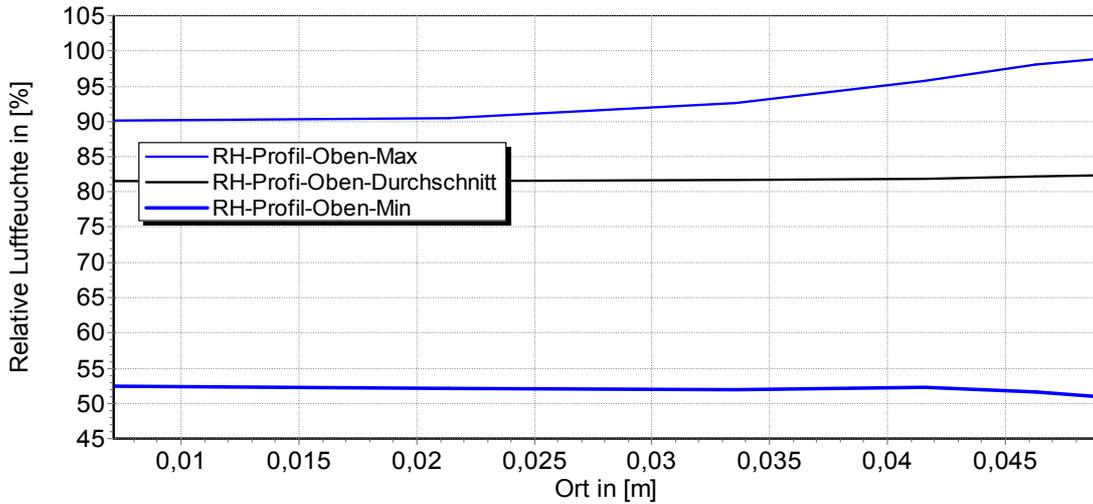


Abbildung 4.6: Profil der relativen Luftfeuchte an der Ausgabeposition 1 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der relativen Luftfeuchte (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf der relativen Luftfeuchte (untere blaue Linie) und der Mittelwert der relativen Luftfeuchte (schwarze Linie).

### Profil der relativen Luftfeuchte Messpunkt 3

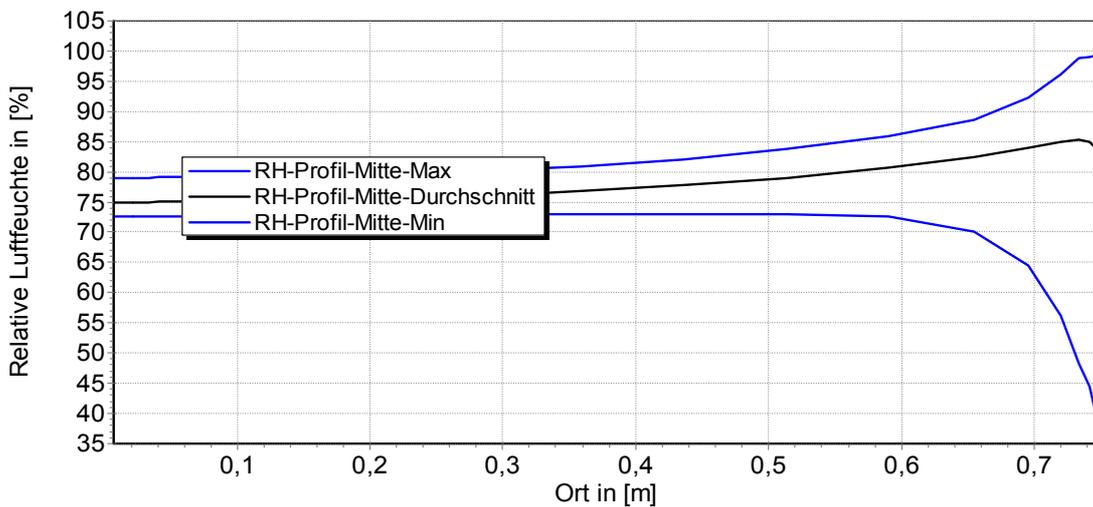


Abbildung 4.7: Profil der relativen Luftfeuchte an der Ausgabeposition 3 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der relativen Luftfeuchte (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf der relativen Luftfeuchte (untere blaue Linie) und der Mittelwert der relativen Luftfeuchte (schwarze Linie).

### Profil der relativen Luftfeuchte Messpunkt 5

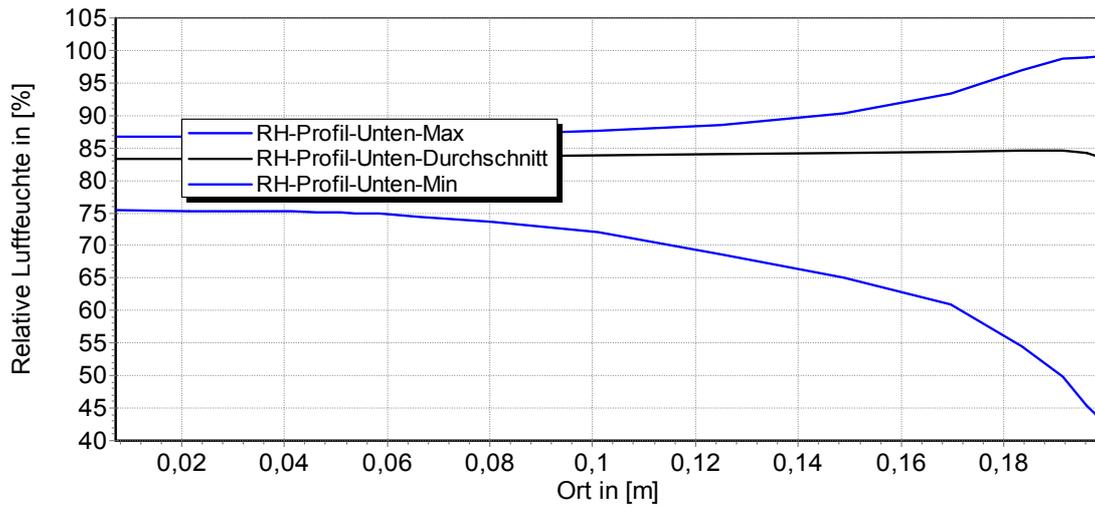


Abbildung 4.8: Profil der relativen Luftfeuchte an der Ausgabeposition 5 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der relativen Luftfeuchte (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf der relativen Luftfeuchte (untere blaue Linie) und der Mittelwert der relativen Luftfeuchte (schwarze Linie).

### Ausgabepunkte 1 - 3 - 5 relative Luftfeuchte an der Oberfläche

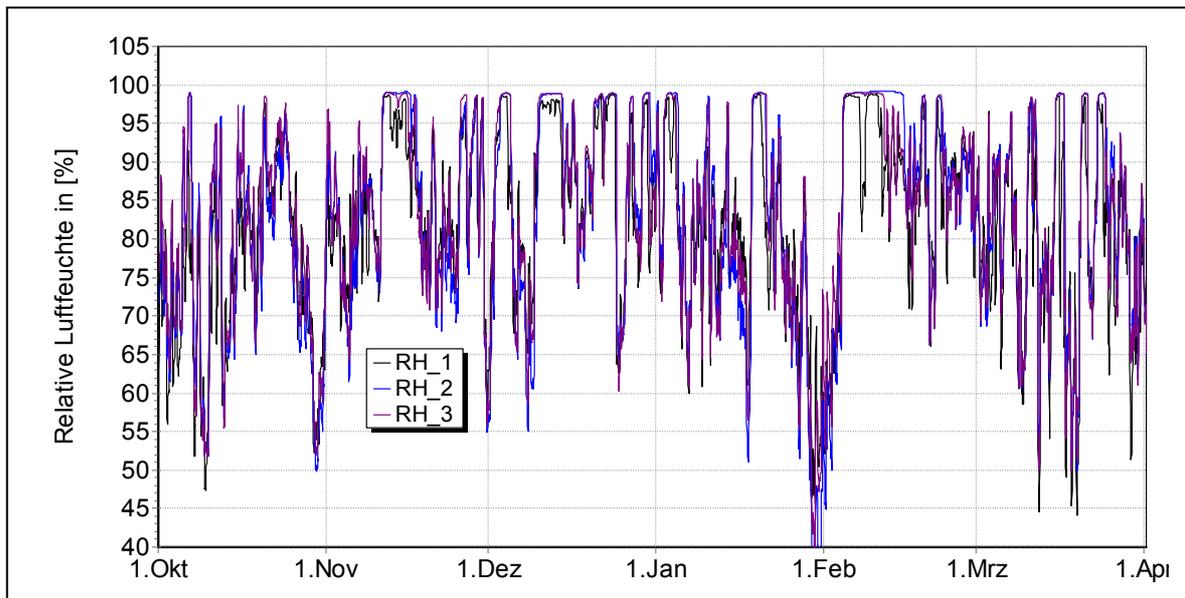


Abbildung 4.9: Verlauf der relativen Luftfeuchte an den drei Ausgabepunkten 1 (oben = RH1), 3 (mittig = RH2) und 5 (unten = RH3) im Zeitraum von Oktober bis April.

Ausgabepunkte am Torso der Skulptur (oben = 2) (unten = 4) relative Luftfeuchte an der Oberfläche

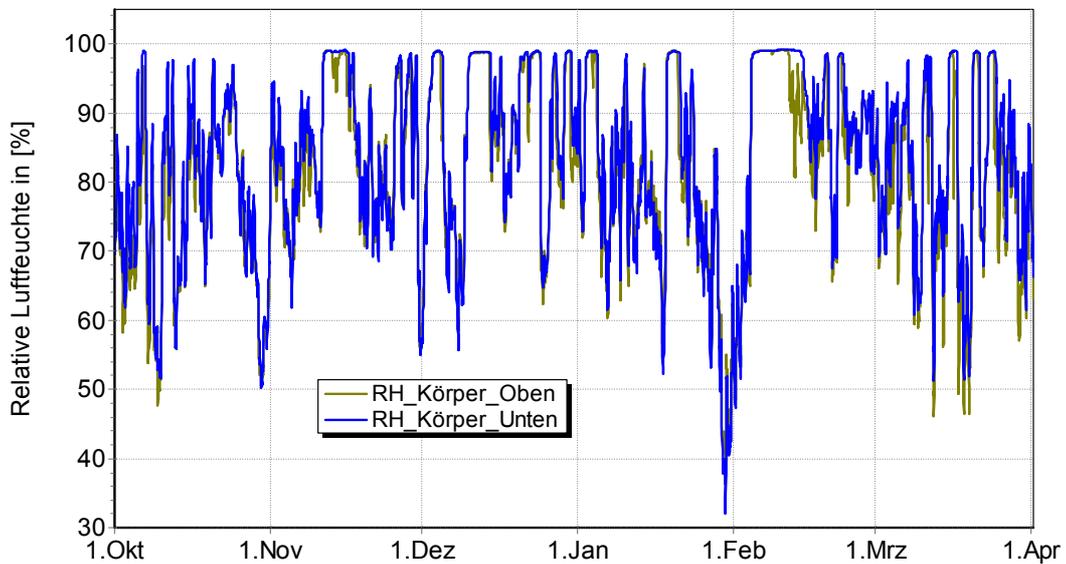


Abbildung 4.10: Verlauf der relativen Luftfeuchte an den zwei Ausgabepunkten 2 (oben) und 4 (unten) im Zeitraum von Oktober bis April.

Profil der Temperatur Messpunkt 1

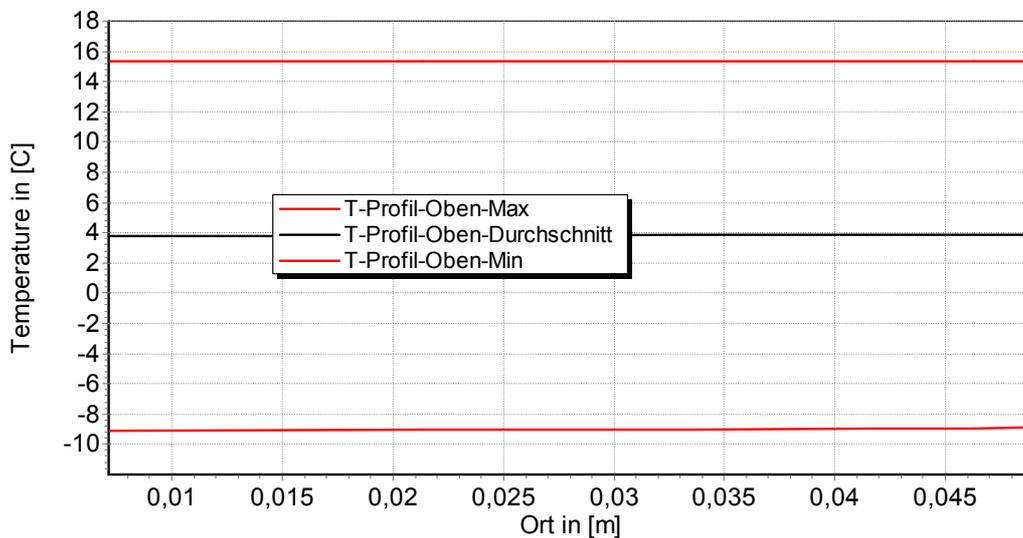


Abbildung 4.11: Profil der Temperatur an der Ausgabeposition 1 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der Temperatur (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf der Temperatur (untere blaue Linie) und der Mittelwert der Temperatur (schwarze Linie).

### Profil der Temperatur Messpunkt 3

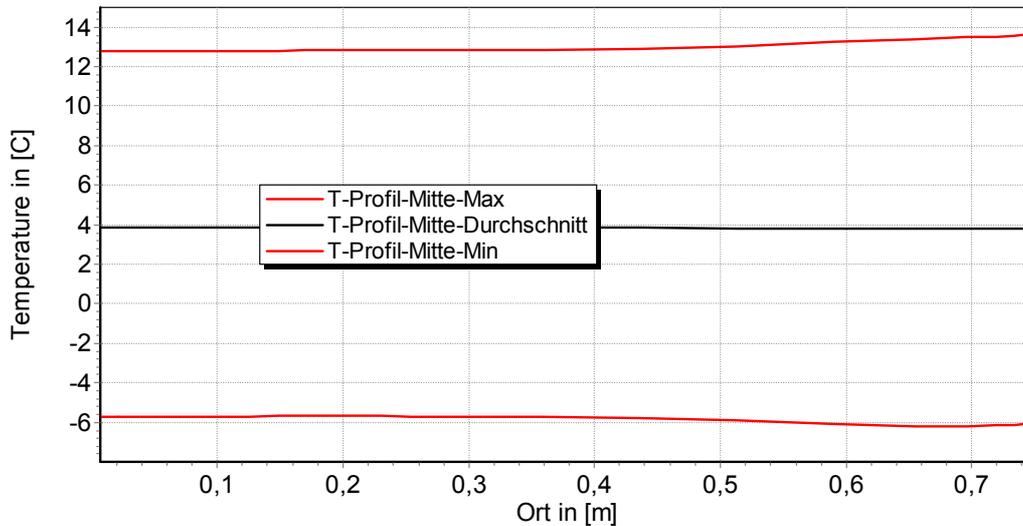


Abbildung 4.12: Profil der Temperatur an der Ausgabeposition 3 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der Temperatur (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf der Temperatur (untere blaue Linie) und der Mittelwert der Temperatur (schwarze Linie).

### Profil der Temperatur Messpunkt 5

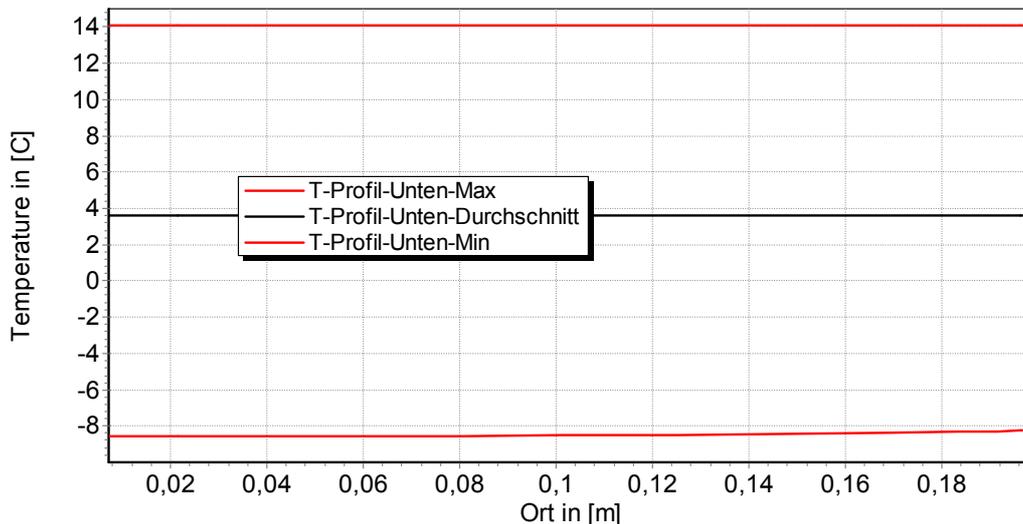


Abbildung 4.13: Profil der Temperatur an der Ausgabeposition 5 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der Temperatur (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf der Temperatur (untere blaue Linie) und der Mittelwert der Temperatur (schwarze Linie).

### Ausgabepunkte 1 - 3 - 5 Temperatur an der Oberfläche



Abbildung 4.14: Verlauf der Temperatur an den drei Ausgabepunkten 1 (oben = T1), 3 (mittig = T2) und 5 (unten = T3) im Zeitraum von Oktober bis April.

### Ausgabepunkte am Torso der Skulptur (oben = 2) (unten = 4) Temperatur an der Oberfläche

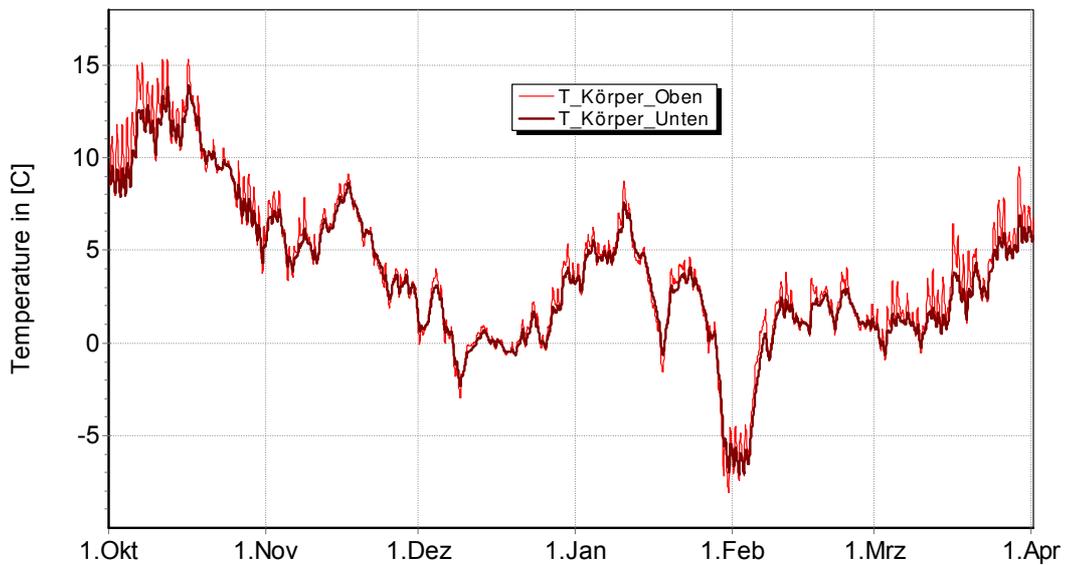


Abbildung 4.15: Verlauf der Temperatur an den zwei Ausgabepunkten 2 (oben) und 4 (unten) im Zeitraum von Oktober bis April.

### Profil der Wassergehalte Messpunkt 1

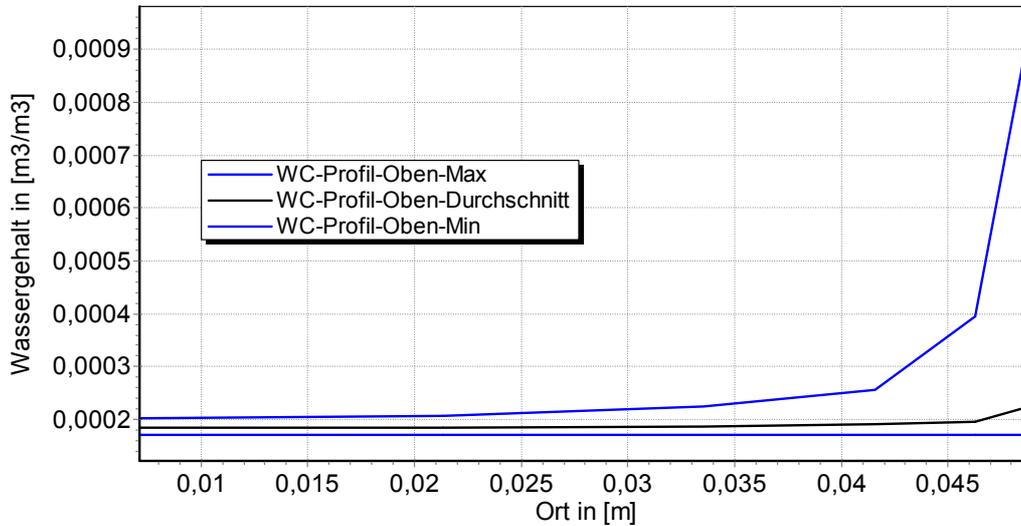


Abbildung 4.16: Profil des Wassergehaltes an der Ausgabebeziehung 1 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf des Wassergehaltes (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf des Wassergehaltes (untere blaue Linie) und der Mittelwert des Wassergehaltes.

### Profil der Wassergehalte Messpunkt 3

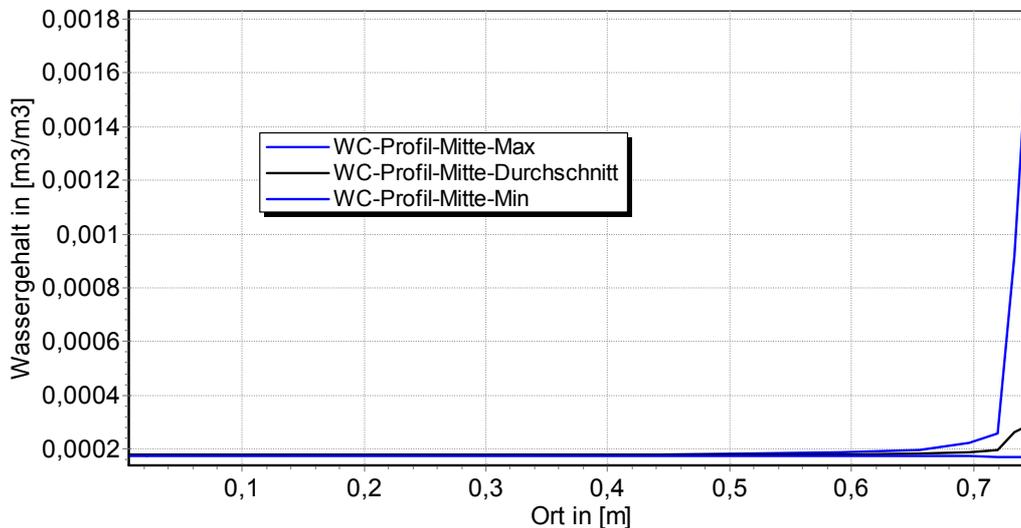


Abbildung 4.17: Profil des Wassergehaltes an der Ausgabebeziehung 3 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der des Wassergehaltes (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf des Wassergehaltes (untere blaue Linie) und der Mittelwert des Wassergehaltes.

### Profil der Wassergehalte Messpunkt 5

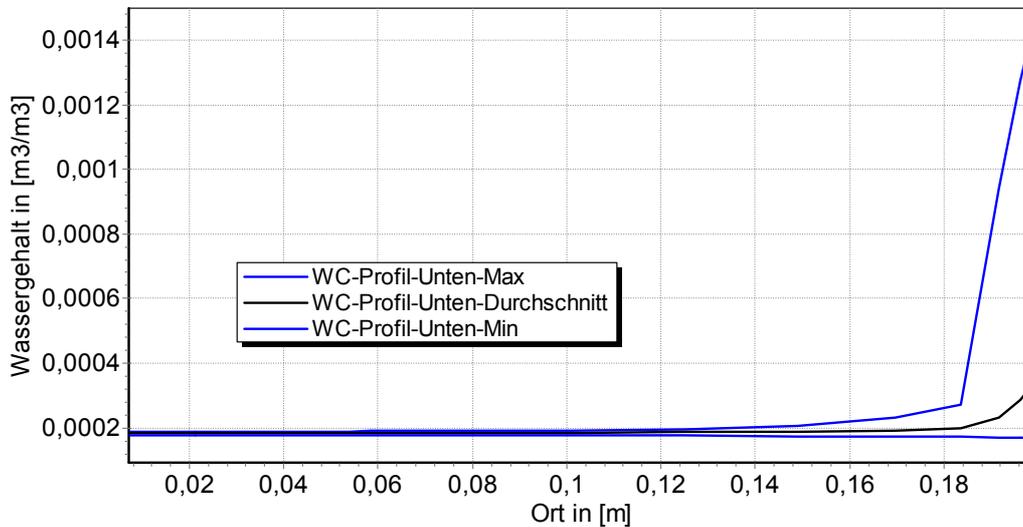


Abbildung 4.18: Profil des Wassergehaltes an der Ausgabeposition 5 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf des Wassergehaltes (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf des Wassergehaltes (untere blaue Linie) und der Mittelwert des Wassergehaltes.

### Messpunkte 1 - 3 - 5 Wassergehalt an der Oberfläche

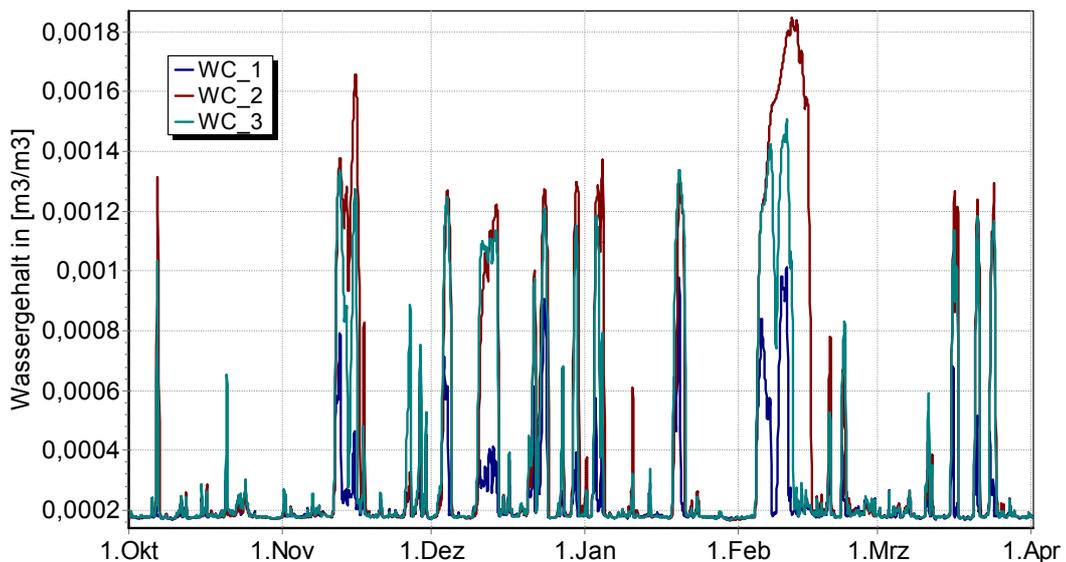


Abbildung 4.19: Verlauf der Wassergehalte an den drei Ausgabepunkten 1 (oben = WC1), 3 (mittig = WC2) und 5 (unten = WC3) im Zeitraum von Oktober bis April.

Ausgabepunkte am Torso der Skulptur (oben = 2) (unten = 4) Wassergehalt an der Oberfläche

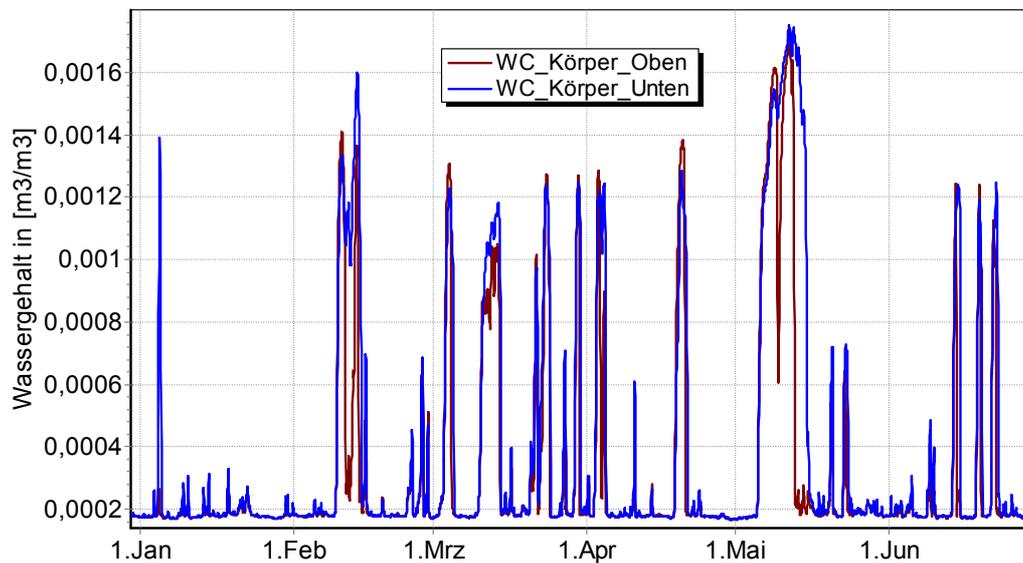


Abbildung 4.20: Verlauf der Wassergehalte an den zwei Ausgabepunkten 2 (oben) und 4 (unten) im Zeitraum von Oktober bis April.

#### 4.2 Holzeinhausung, Nordorientierung, Vergleich unterschiedlicher Luftwechselraten $n = 0.1$ , $n = 0.5$ und $n = 2.5$

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Varianten „Holzeinhausung, Nordorientierung bei unterschiedlichen Luftwechselraten vorgestellt. Aus dem Vergleich der Ausgabepositionen bei unterschiedlichen Luftwechselraten ergibt sich die Empfehlung einer bestimmten Rate. Zur Übersichtlichkeit wird teilweise auf die Darstellung der mittleren Luftwechselrate verzichtet

Integrale Wassermassendichten für die Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$

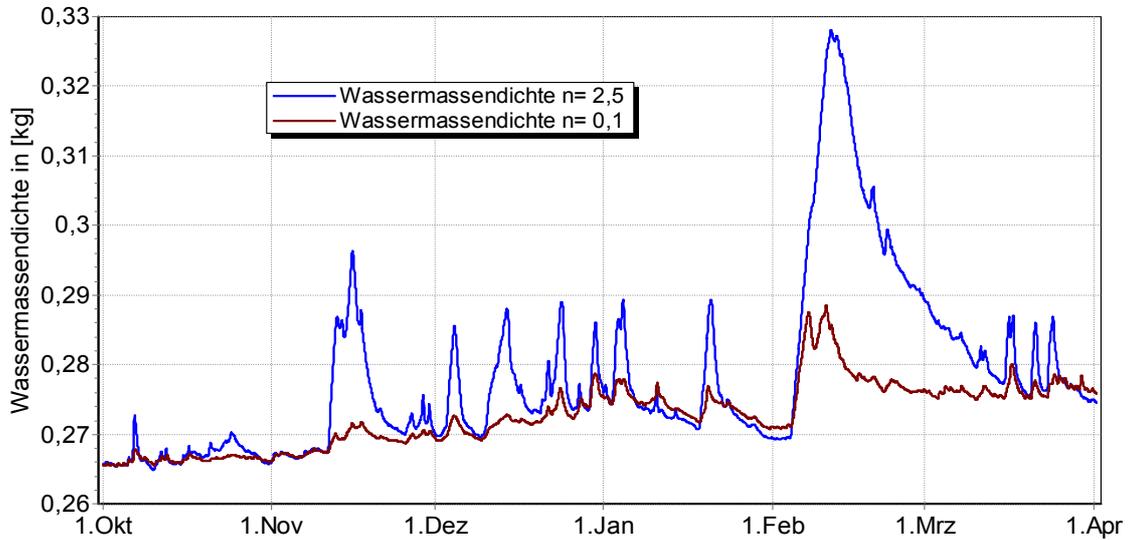


Abbildung 4.21: Integral der Wassermassendichte des Torsos bei einer Luftwechselrate von ( $n = 0.1$  und  $n = 2.5$ ) im Zeitraum Oktober bis April.

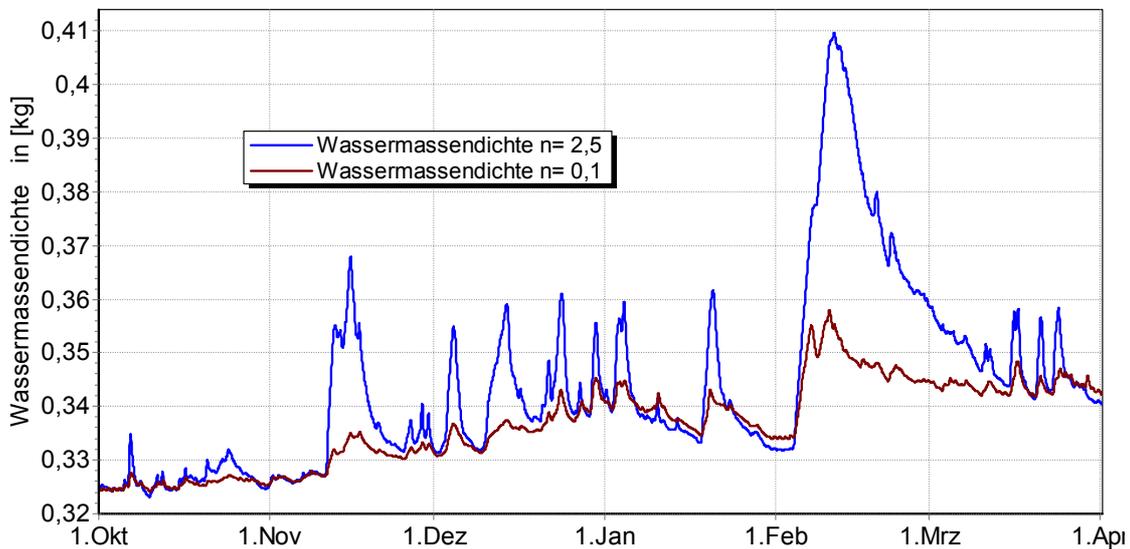


Abbildung 4.22: Integral der Wassermassendichte der gesamten Marmorskulptur Torsos bei einer Luftwechselrate von ( $n = 0.1$  und  $n = 2.5$ ) im Zeitraum Oktober bis April.

Relative Luftfeuchte in der rechten oberen Ecke in der Einhausung für die Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$

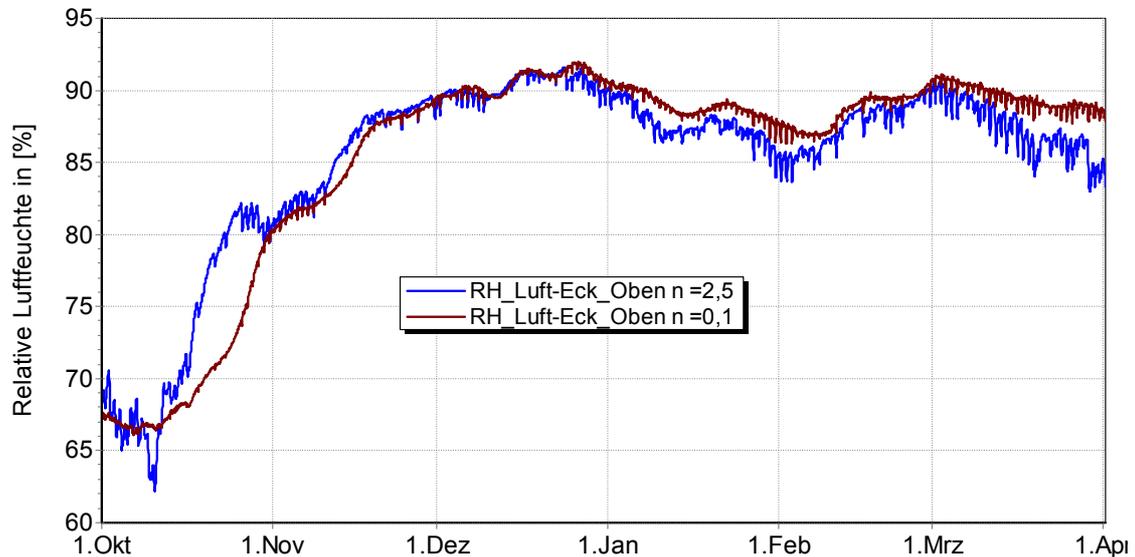


Abbildung 4.23: Relative Luftfeuchte der rechten oberen Ecke innerhalb der Einhausung bei einer Luftwechselrate von ( $n = 0.1$  und  $n = 2.5$ ) im Zeitraum Oktober bis April

Der Vergleich der beiden Luftwechselraten von  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$  untereinander zeigt, dass mit zunehmender Luftwechselrate die Marmorskulptur stärker auffeuchtet. Auch zeigen die Ergebnisse eine größere Fluktuation.

Ausgabefelder der Temperatur nach 128 Tagen für die Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$

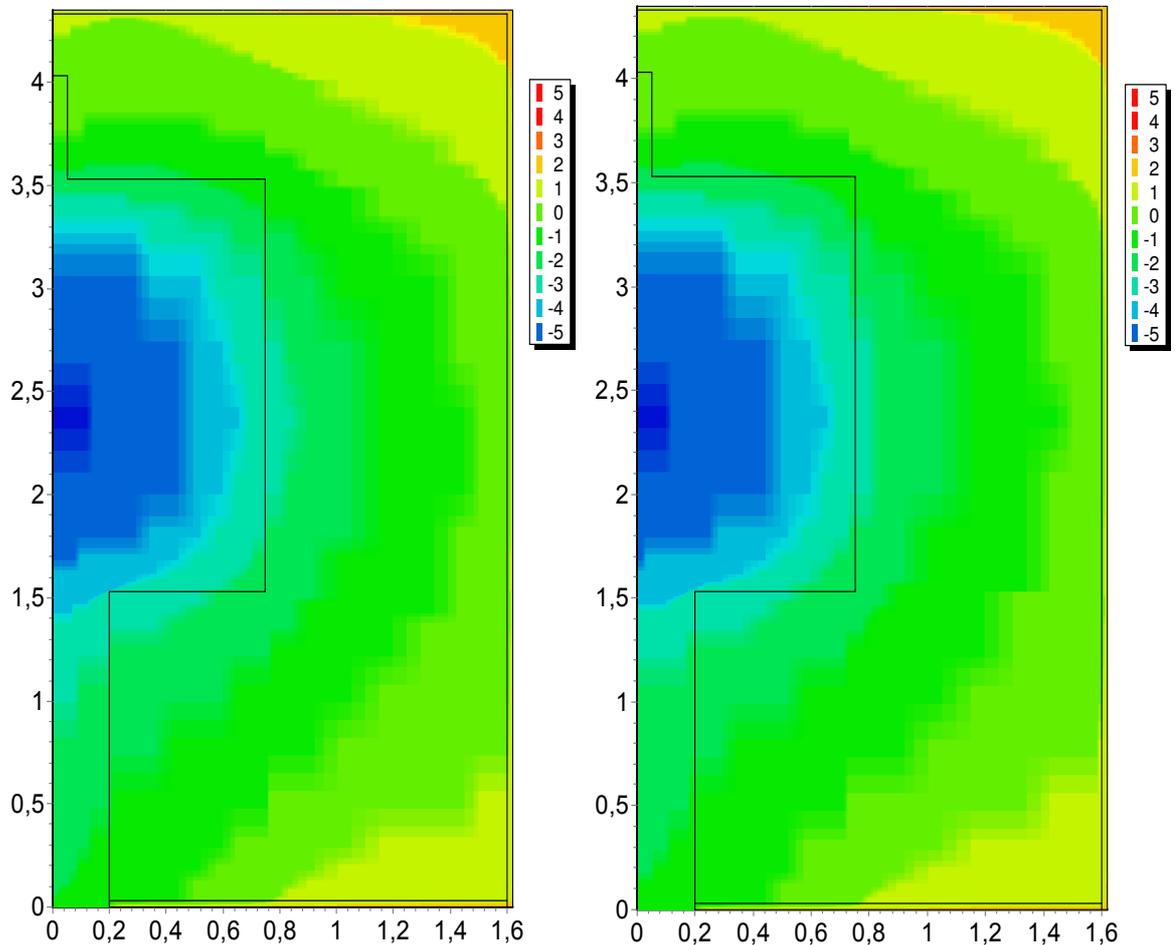


Abbildung 4.24: Feld der Temperatur innerhalb der Holzeinhausung zum Zeitpunkt  $t = 128$  Tage bei einer Temperaturskala von  $-5^{\circ}\text{C}$  bis  $+5^{\circ}\text{C}$ . links - Luftwechselrate  $n = 0.1$  und rechts - Luftwechselrate  $n = 2.5$

Thermisch zeigen sich bei dem betrachteten Zeitpunkt von  $t = 128$  Tagen kaum Unterschiede zwischen den beiden Luftwechseln.

Ausgabefelder der relativen Luftfeuchte nach 128 Tagen für die Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$

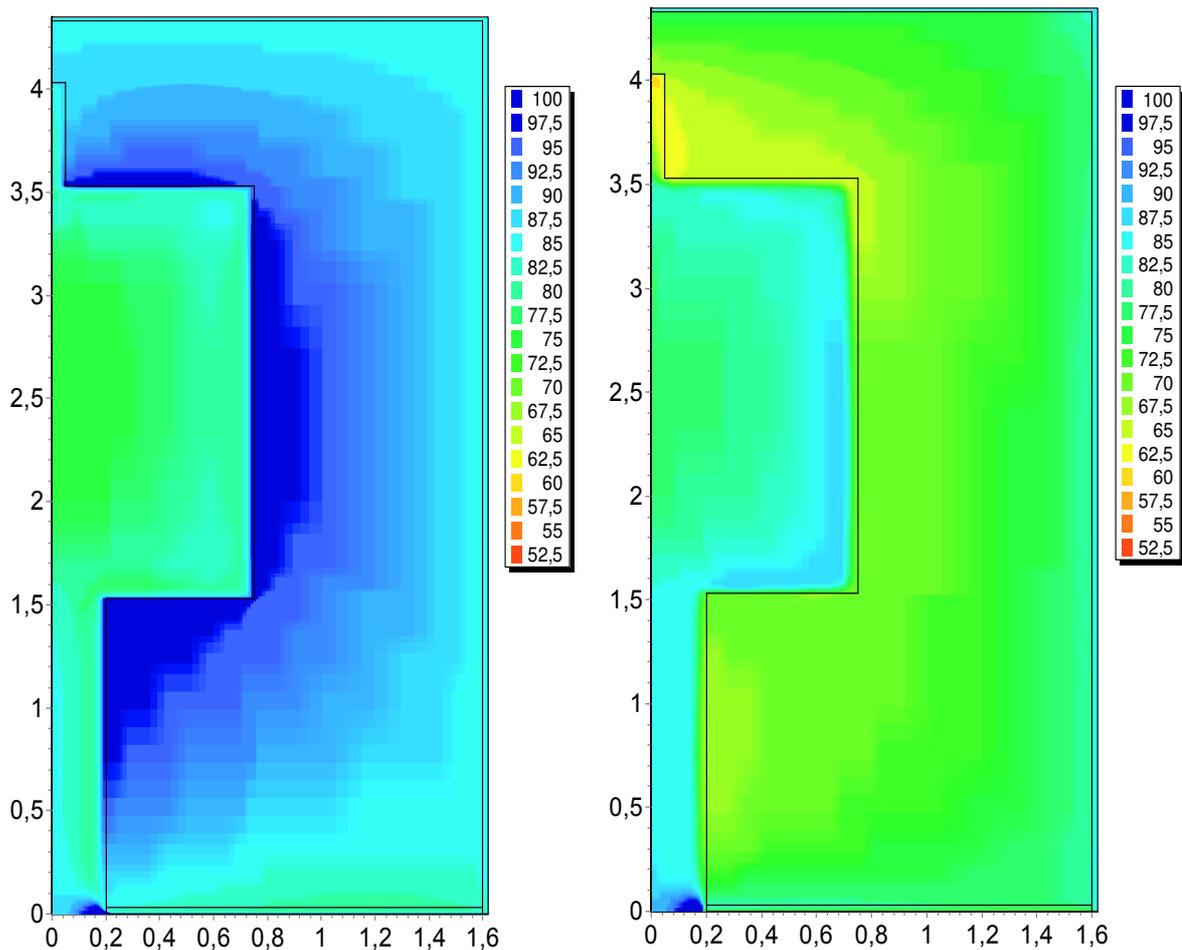


Abbildung 4.25: Feld der relativen Luftfeuchte innerhalb der Holzeinhausung zum Zeitpunkt  $t = 128$  Tage bei einer Luftfeuchteskala von 50% bis 100% relative Feuchte. links - Luftwechselrate  $n = 0.1$  und rechts - Luftwechselrate  $n = 2.5$

Aus den Diagrammen geht hervor, dass mit zunehmenden Luftwechselraten die kältere Marmorskulptur stärker aufwechtet. Mit zunehmendem Luftwechsels wird vermehrt Luftfeuchte an die Skulptur herangetragen, wobei Feuchte an den kühlen Bereichen kondensieren kann. Andererseits wird bei geringem Luftwechsel die Feuchtigkeit innerhalb der Raumluft der Einhausung weniger abtransportiert. In der Summe wirkt sich ein geringer Luftwechsel jedoch günstiger aus.

Ausgabefelder der Temperatur nach 180 Tagen für die Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$

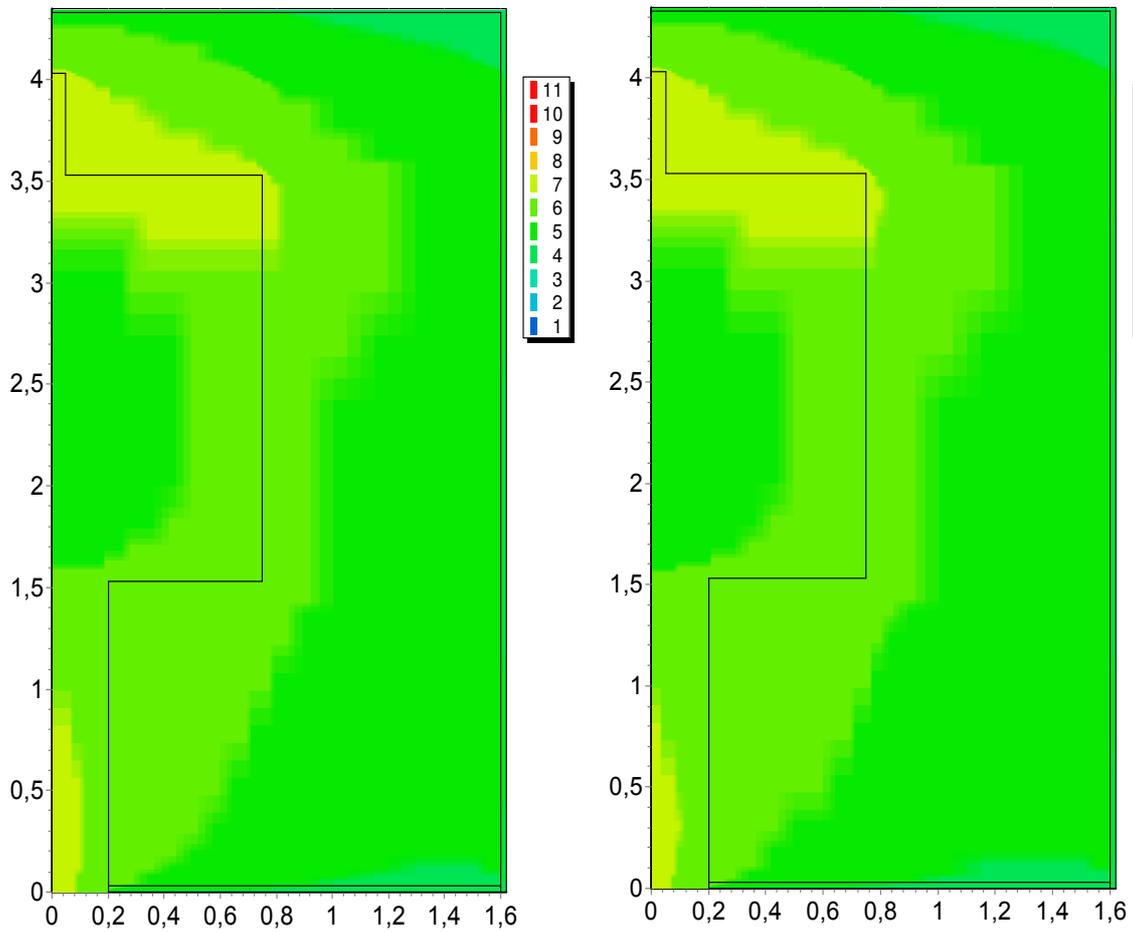


Abbildung 4.26: Feld der Temperatur innerhalb der Holzeinhausung zum Zeitpunkt  $t = 180$  Tage bei einer Temperaturskala von  $-5^{\circ}\text{C}$  bis  $+5^{\circ}\text{C}$ . links - Luftwechselrate  $n = 0.1$  und rechts - Luftwechselrate  $n = 2.5$

Thermisch zeigen sich bei dem betrachteten Zeitpunkt von  $t = 180$  Tagen kaum Unterschiede zwischen den beiden Luftwechseln.

Ausgabefelder der relativen Luftfeuchte nach 180 Tagen für die Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$

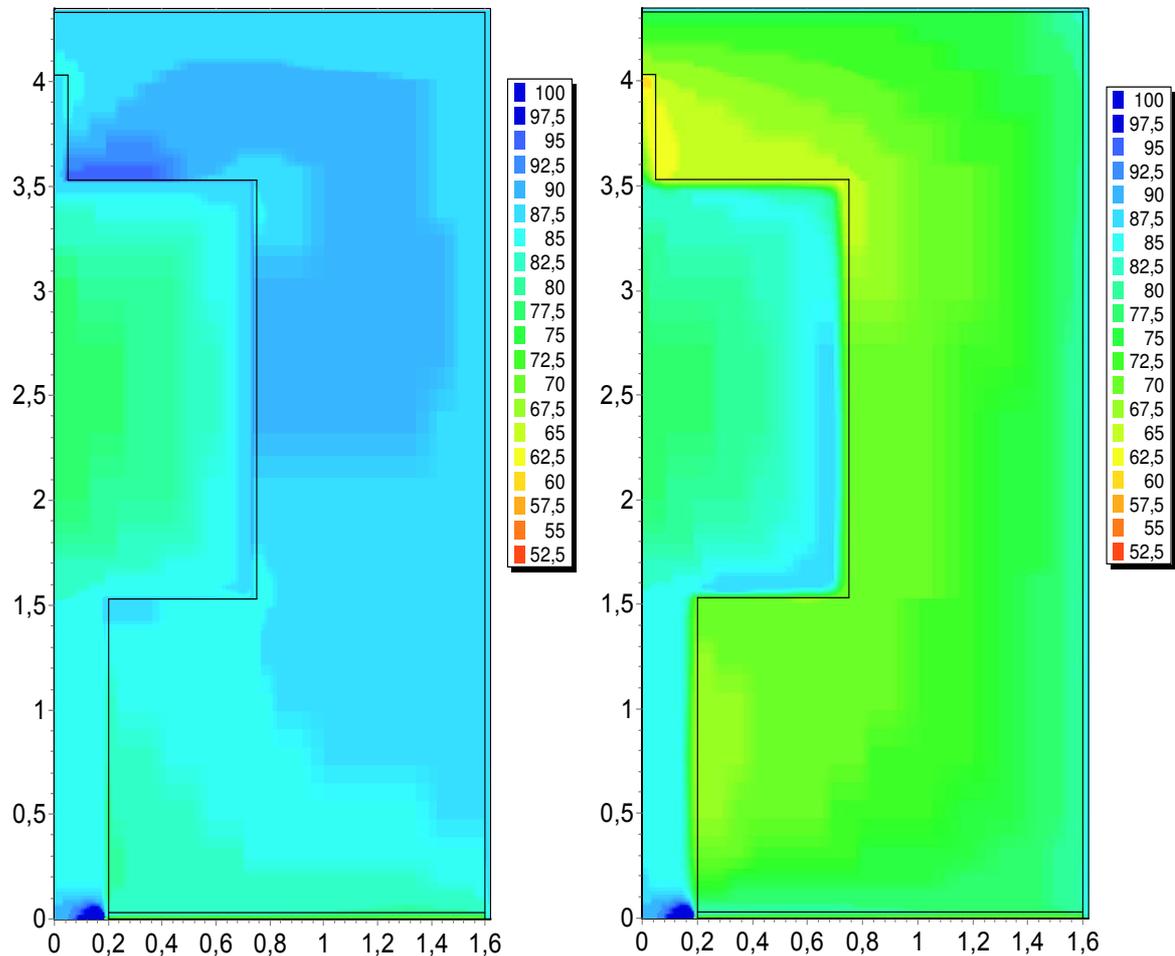


Abbildung 4.27: Feld der relativen Luftfeuchte innerhalb der Holzeinhausung zum Zeitpunkt  $t = 180$  Tage bei einer Luftfeuchteskala von 50% bis 100% relative Feuchte. links - Luftwechselrate  $n = 0.1$  und rechts - Luftwechselrate  $n = 2.5$

Als eine Folge der geringen Luftwechselraten wird der Luftraum der Holzeinhausung zum Ausgabezeitpunkt der Graphik weniger rasch entfeuchtet, was eine Befeuchtung der Marmorskulptur zur Folge hat. Stärkere Luftwechsel führen in den Bereichen der Außenluftanströmung zur verstärkten Befeuchtung.

Profil der relativen Luftfeuchte Messpunkt 1, Vergleich der Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$

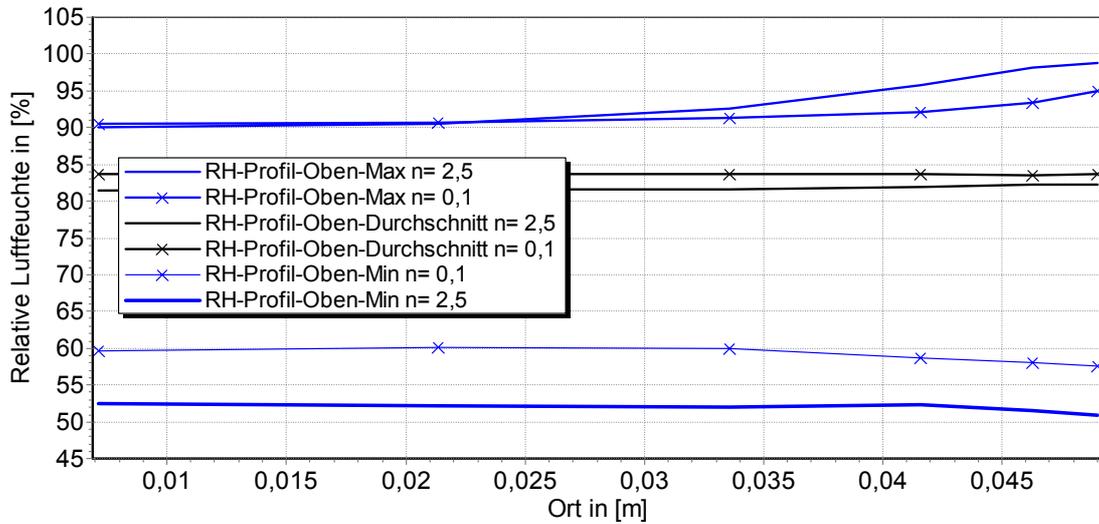


Abbildung 4.28: Profil der relativen Luftfeuchte an der Ausgabebeziehung 1 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der relativen Luftfeuchte (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf der relativen Luftfeuchte (untere blaue Linie) und der Mittelwert der relativen Luftfeuchte (schwarze Linie) für die Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$ .

Profil der relativen Luftfeuchte Messpunkt 3, Vergleich der Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$

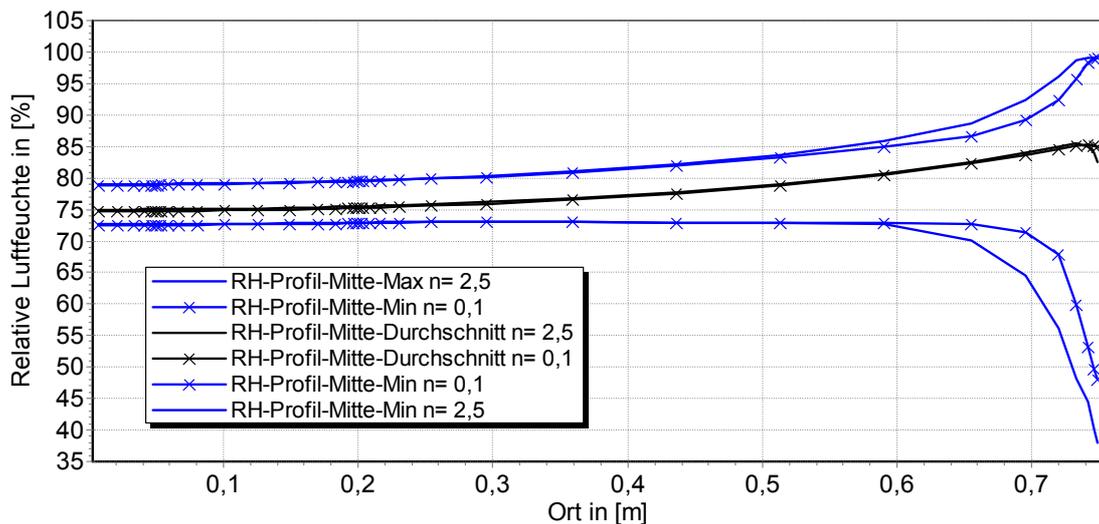


Abbildung 4.29: Profil der relativen Luftfeuchte an der Ausgabebeziehung 3 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der relativen Luftfeuchte (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf der relativen Luftfeuchte (untere blaue Linie) und der Mittelwert der relativen Luftfeuchte (schwarze Linie) für die Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$ .

Profil der relativen Luftfeuchte Messpunkt 5, Vergleich der Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$

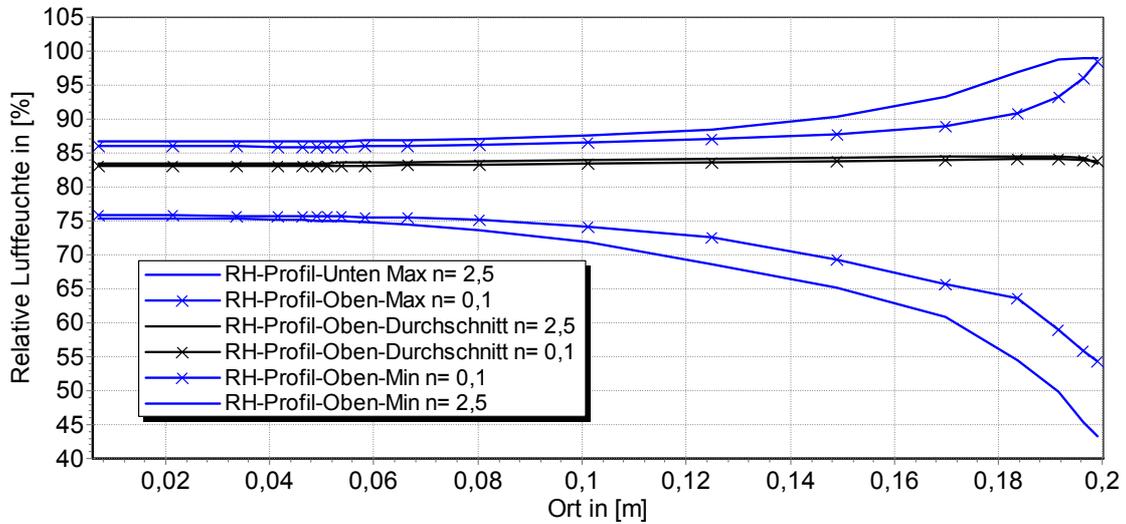


Abbildung 4.30: Profil der relativen Luftfeuchte an der Ausgabebeziehung 5 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der relativen Luftfeuchte (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf der relativen Luftfeuchte (untere blaue Linie) und der Mittelwert der relativen Luftfeuchte (schwarze Linie) für die Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$ .

Profil der Temperatur Messpunkt 2, Vergleich der Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$

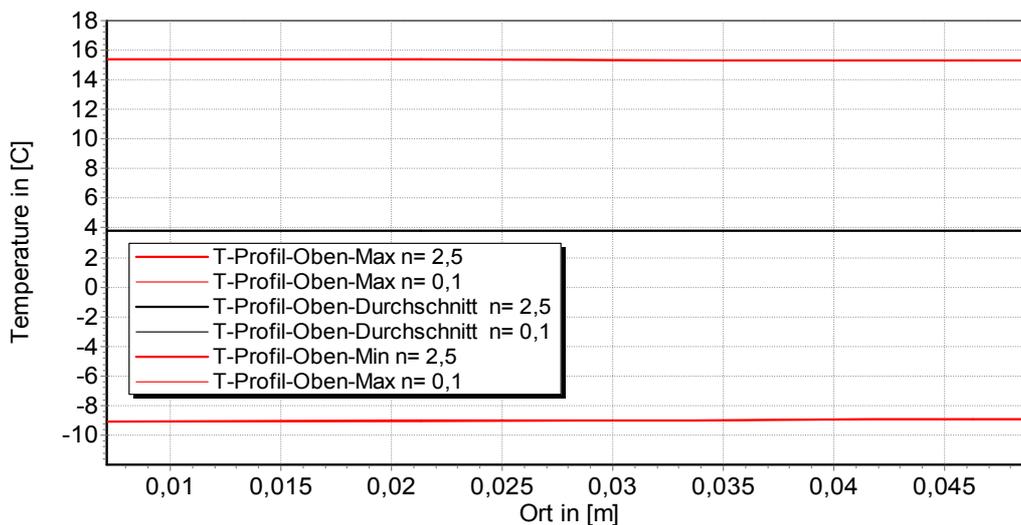


Abbildung 4.31: Profil der Temperatur an der Ausgabebeziehung 1 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der Temperatur (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf der Temperatur (untere blaue Linie) und der Mittelwert der Temperatur (schwarze Linie) für die Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$ .

Profil der Temperatur Messpunkt 3, Vergleich der Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$

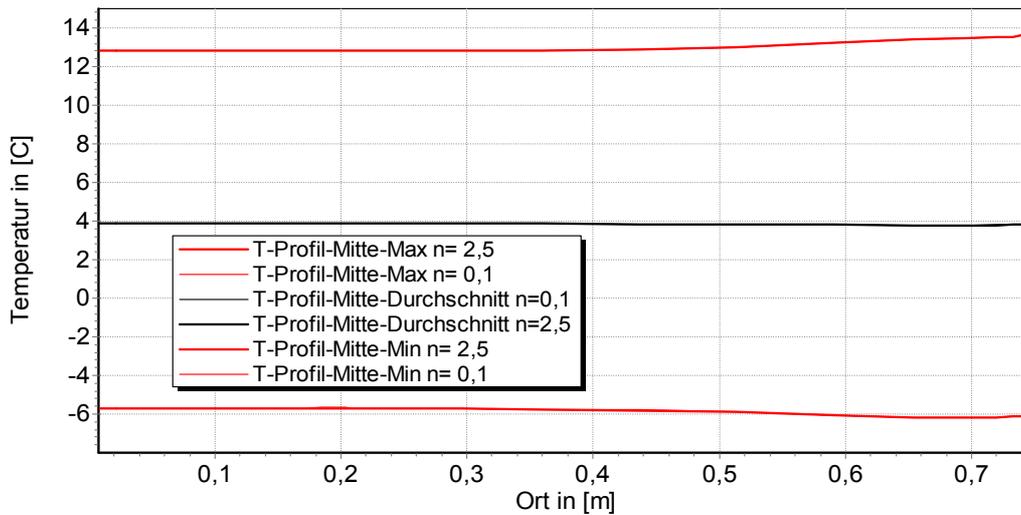


Abbildung 4.32: Profil der Temperatur an der Ausgabeposition 3 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der Temperatur (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf der Temperatur (untere blaue Linie) und der Mittelwert der Temperatur (schwarze Linie) für die Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$ .

Profil der Temperatur Messpunkt 5, Vergleich der Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$

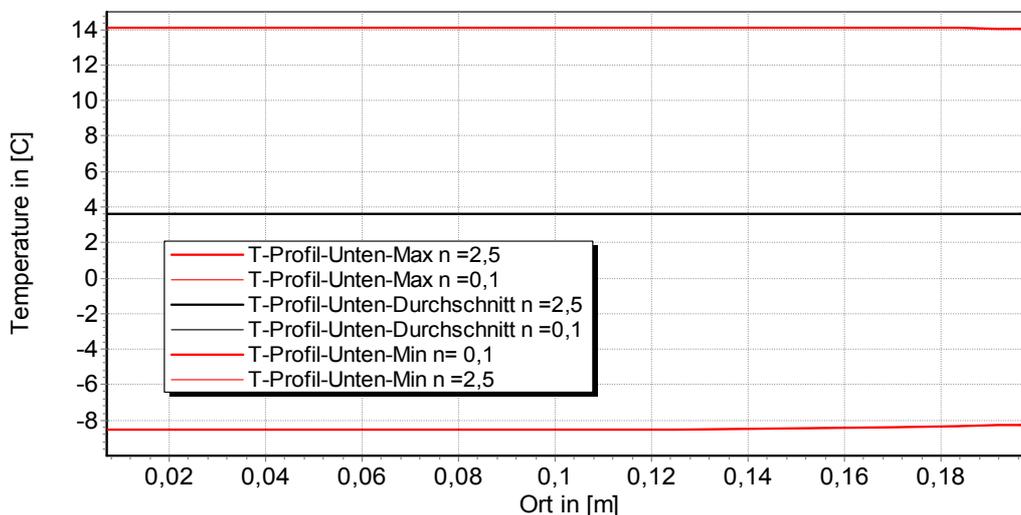


Abbildung 4.33: Profil der Temperatur an der Ausgabeposition 5 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der Temperatur (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf der Temperatur (untere blaue Linie) und der Mittelwert der Temperatur (schwarze Linie) für die Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$ .

Profil der Wassergehalt Messpunkt 1, Vergleich der Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$

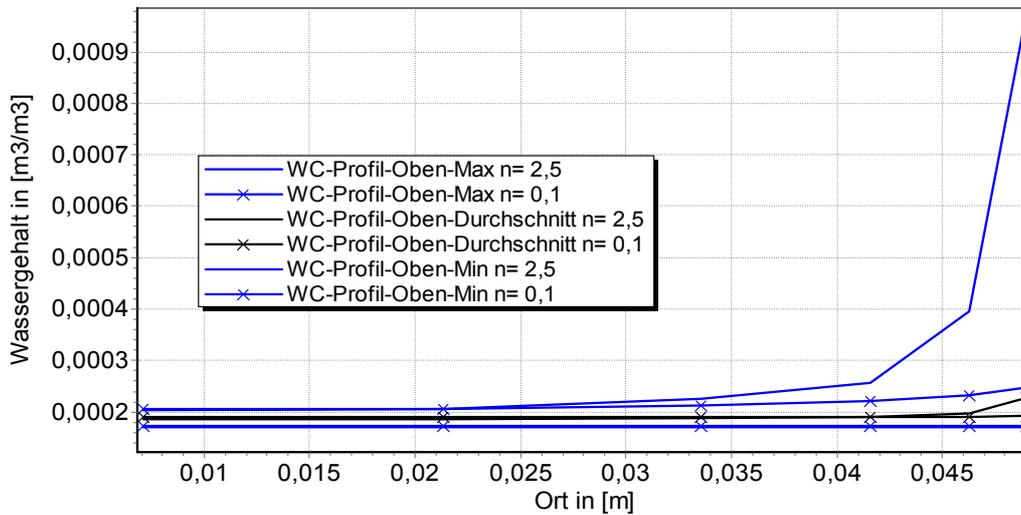


Abbildung 4.34: Profil der Wassergehalte an der Ausgabeposition 1 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der Wassergehalte (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf der Wassergehalte (untere blaue Linie) und der Mittelwert der Wassergehalte (schwarze Linie) für die Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$ .

Profil der Wassergehalt Messpunkt 3, Vergleich der Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$

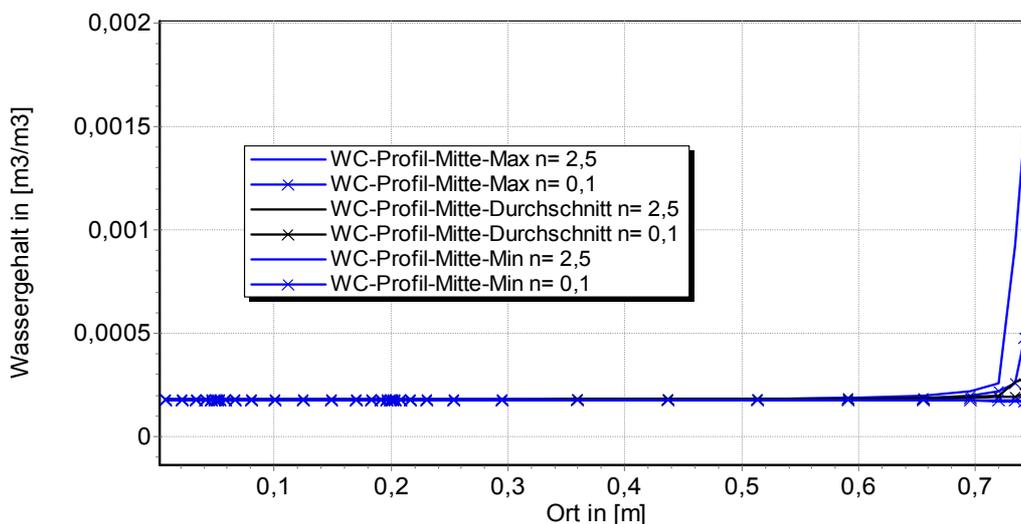


Abbildung 4.35: Profil der Wassergehalte an der Ausgabeposition 3 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der Wassergehalte (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf der Wassergehalte (untere blaue Linie) und der Mittelwert der Wassergehalte (schwarze Linie) für die Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$ .

Profil der Wassergehalt Messpunkt 5, Vergleich der Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$

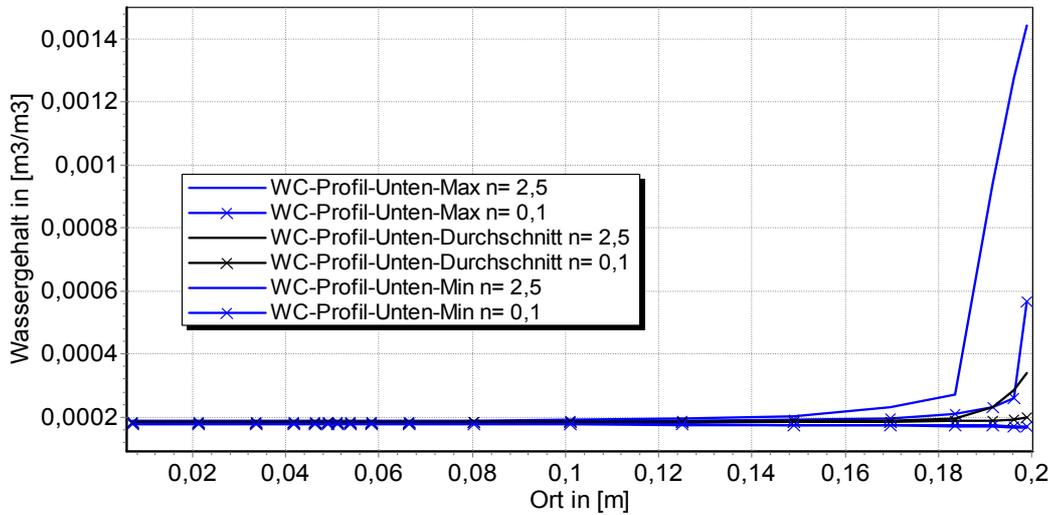


Abbildung 4.36: Profil der Wassergehalte an der Ausgabeposition 5 (horizontaler Schnitt durch die Marmorskulptur). Dargestellt werden im Zeitraum der Simulation von Oktober bis April der maximale Verlauf der Wassergehalte (oberer blaue Linie), der minimale Verlauf der Wassergehalte (untere blaue Linie) und der Mittelwert der Wassergehalte (schwarze Linie) für die Luftwechselraten  $n = 0.1$  und  $n = 2.5$ .

Ausgabepunkt 1, relative Luftfeuchte an der Oberfläche

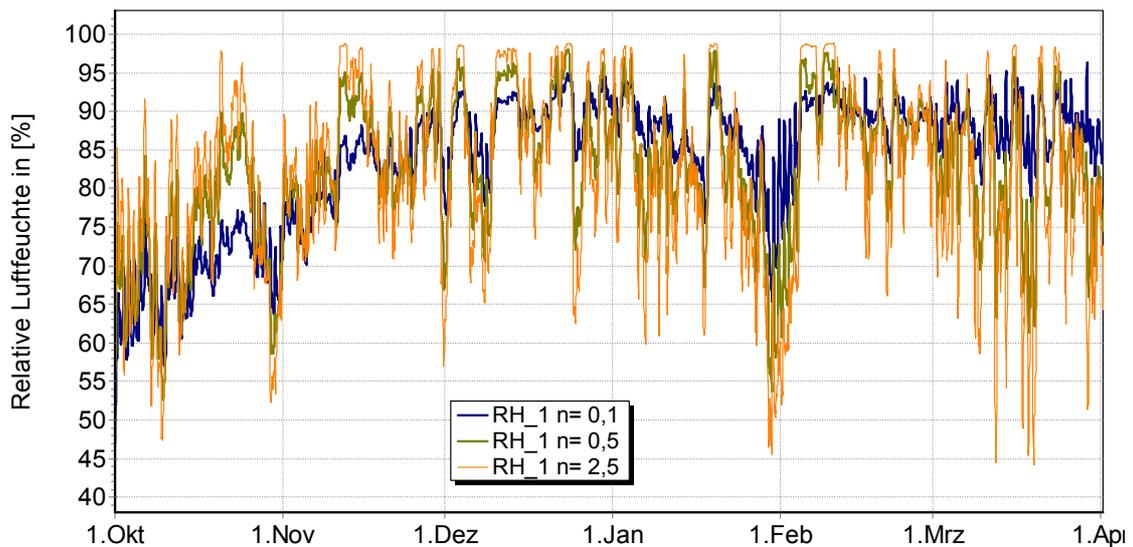


Abbildung 4.37: Verlauf der relativen Luftfeuchte an dem Ausgabepunkt 1 im Zeitraum von Oktober bis April.

### Ausgabepunkt 2, relative Luftfeuchte an der Oberfläche

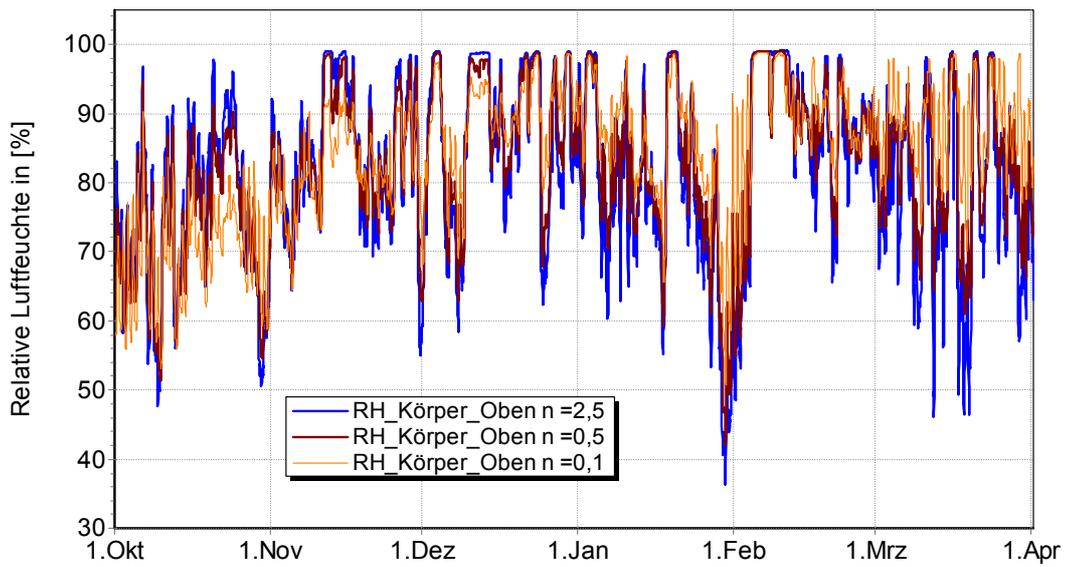


Abbildung 4.38: Verlauf der relativen Luftfeuchte an dem Ausgabepunkt 2 im Zeitraum von Oktober bis April.

### Ausgabepunkt 3, relative Luftfeuchte an der Oberfläche

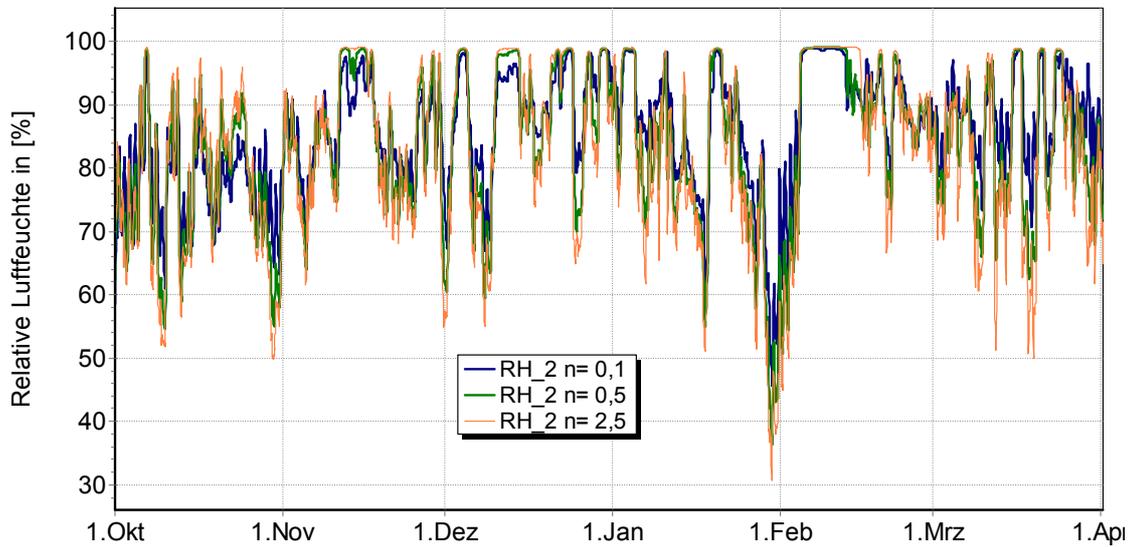


Abbildung 4.39: Verlauf der relativen Luftfeuchte an dem Ausgabepunkt 3 im Zeitraum von Oktober bis April.

#### Ausgabepunkt 4, relative Luftfeuchte an der Oberfläche

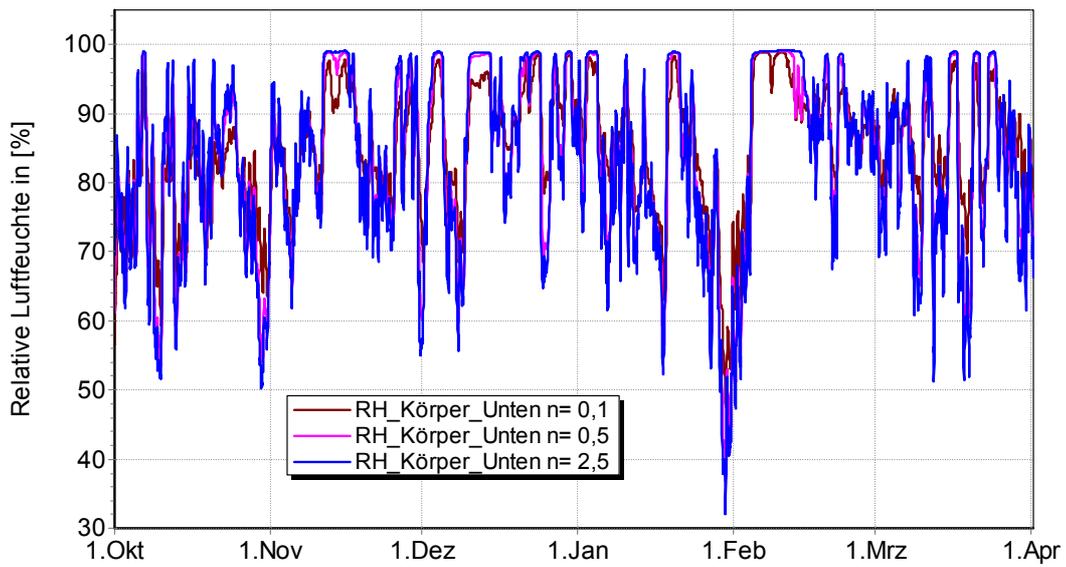


Abbildung 4.40: Verlauf der relativen Luftfeuchte an dem Ausgabepunkt 4 im Zeitraum von Oktober bis April.

#### Ausgabepunkt 5, relative Luftfeuchte an der Oberfläche

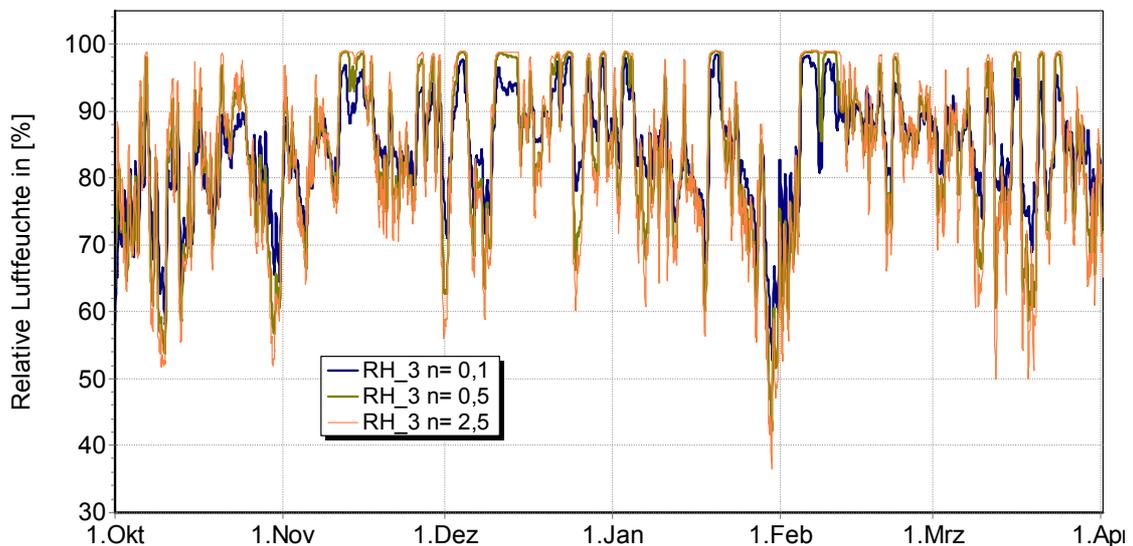


Abbildung 4.41: Verlauf der relativen Luftfeuchte an dem Ausgabepunkt 5 im Zeitraum von Oktober bis April.

### Ausgabepunkt 1, Temperatur an der Oberfläche

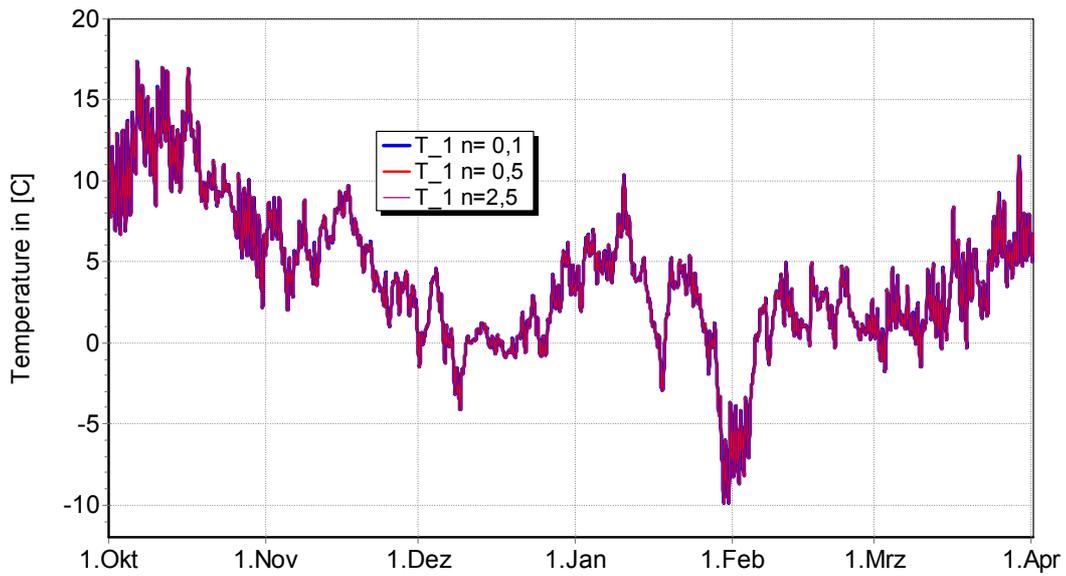


Abbildung 4.42: Verlauf der Temperatur an dem Ausgabepunkt 1 im Zeitraum von Oktober bis April.

### Ausgabepunkt 2, Temperatur an der Oberfläche

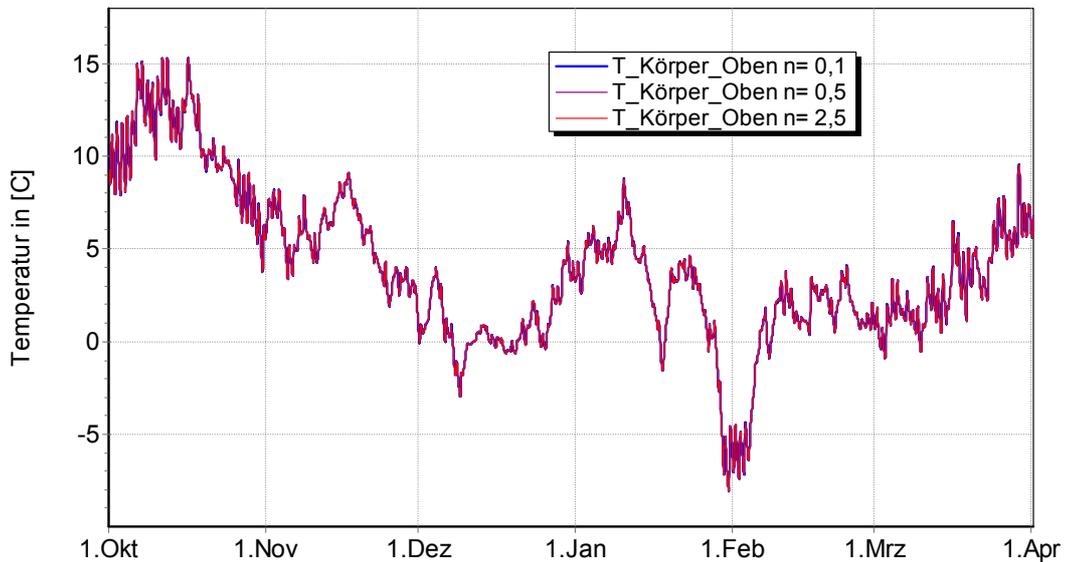


Abbildung 4.43: Verlauf der Temperatur an dem Ausgabepunkt 2 im Zeitraum von Oktober bis April.

### Ausgabepunkt 3, Temperatur an der Oberfläche



Abbildung 4.44: Verlauf der Temperatur an dem Ausgabepunkt 3 im Zeitraum von Oktober bis April.

### Ausgabepunkt 4, Temperatur an der Oberfläche



Abbildung 4.45: Verlauf der Temperatur an dem Ausgabepunkt 4 im Zeitraum von Oktober bis April.

### Ausgabepunkt 5, Temperatur an der Oberfläche



Abbildung 4.46: Verlauf der Temperatur an dem Ausgabepunkt 5 im Zeitraum von Oktober bis April.

### Ausgabepunkt 1, Wassergehalt an der Oberfläche

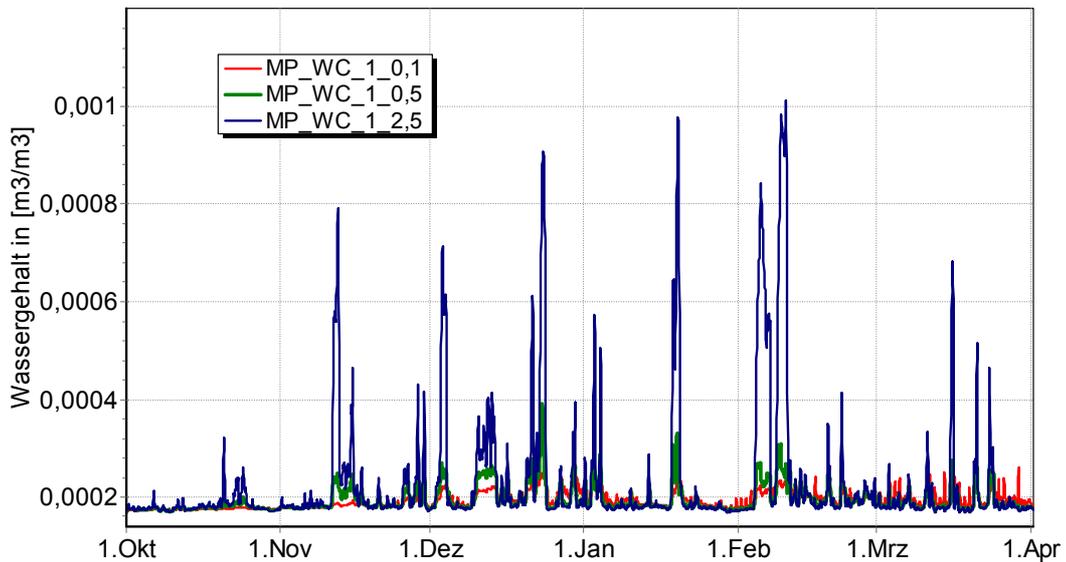


Abbildung 4.47: Verlauf der Wassergehalte an dem Ausgabepunkt 1 im Zeitraum von Oktober bis April.

### Ausgabepunkt 2, Wassergehalt an der Oberfläche

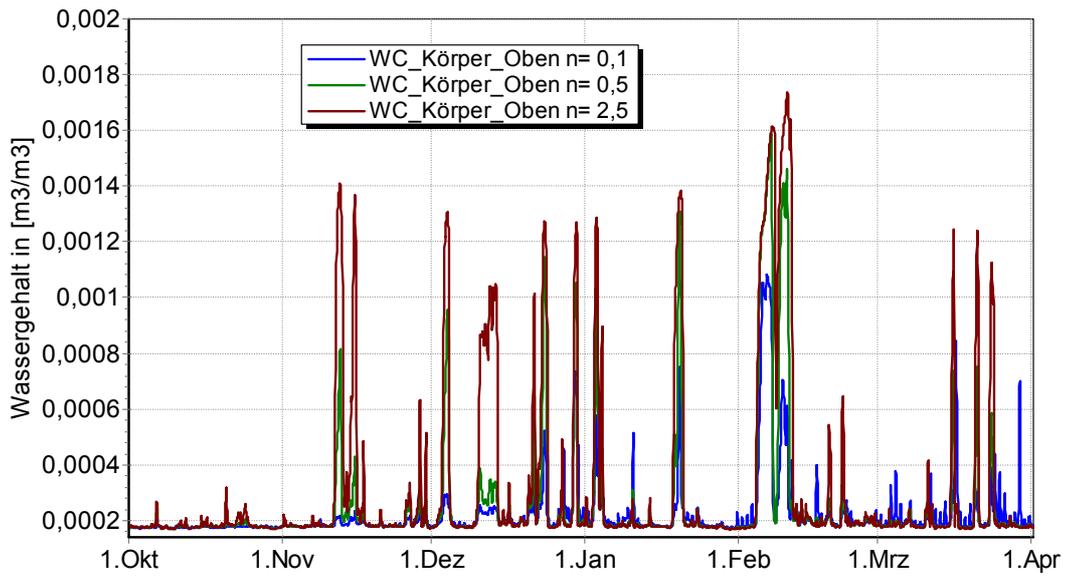


Abbildung 4.48: Verlauf der Wassergehalte an dem Ausgabepunkt 2 im Zeitraum von Oktober bis April.

### Ausgabepunkt 3, Wassergehalt an der Oberfläche

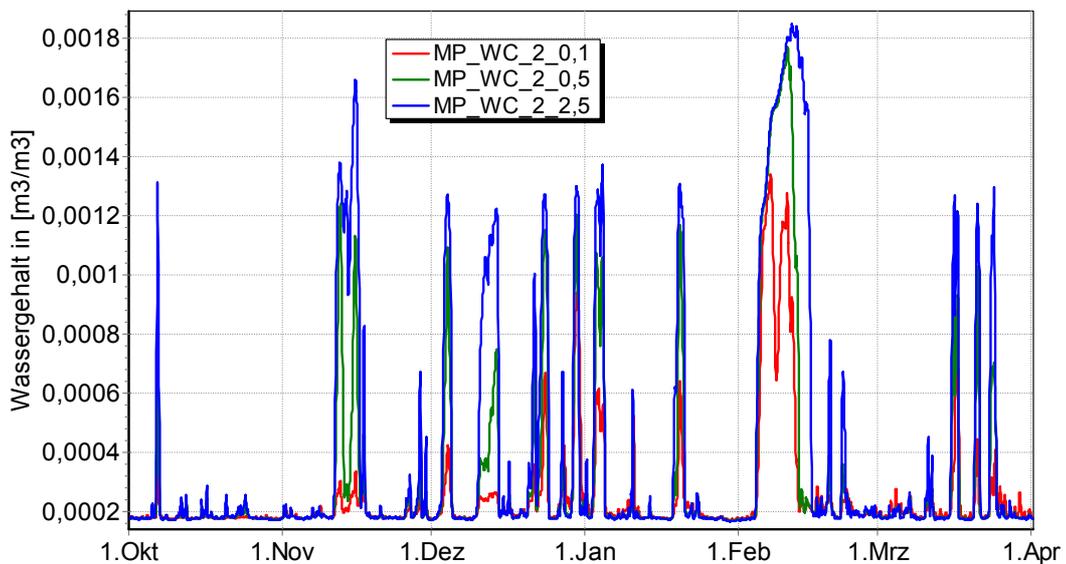


Abbildung 4.49: Verlauf der Wassergehalte an dem Ausgabepunkt 3 im Zeitraum von Oktober bis April.

#### Ausgabepunkt 4, Wassergehalt an der Oberfläche

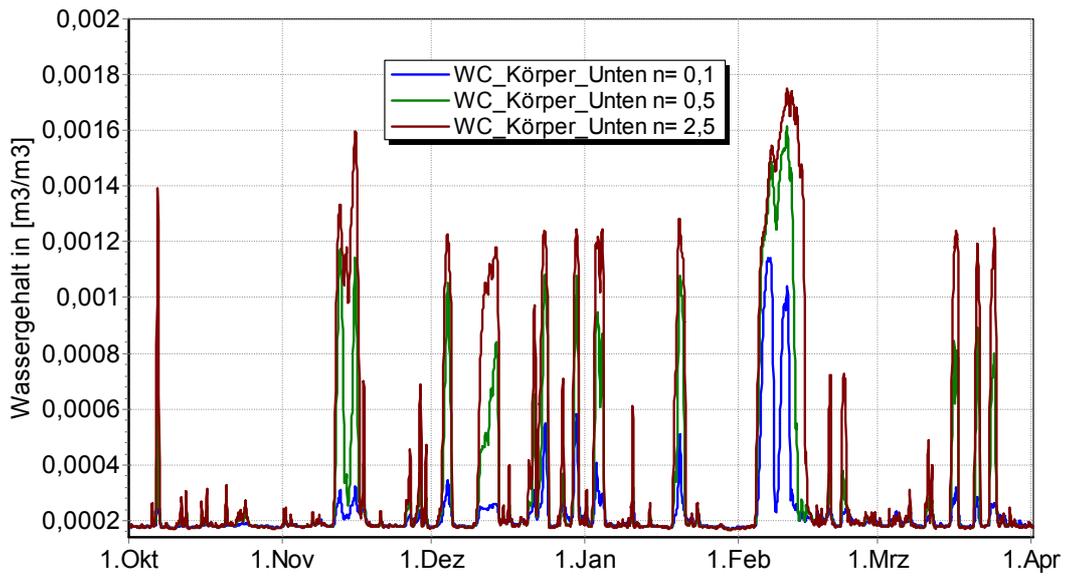


Abbildung 4.50: Verlauf der Wassergehalte an dem Ausgabepunkt 4 im Zeitraum von Oktober bis April.

#### Ausgabepunkt 5, Wassergehalt an der Oberfläche

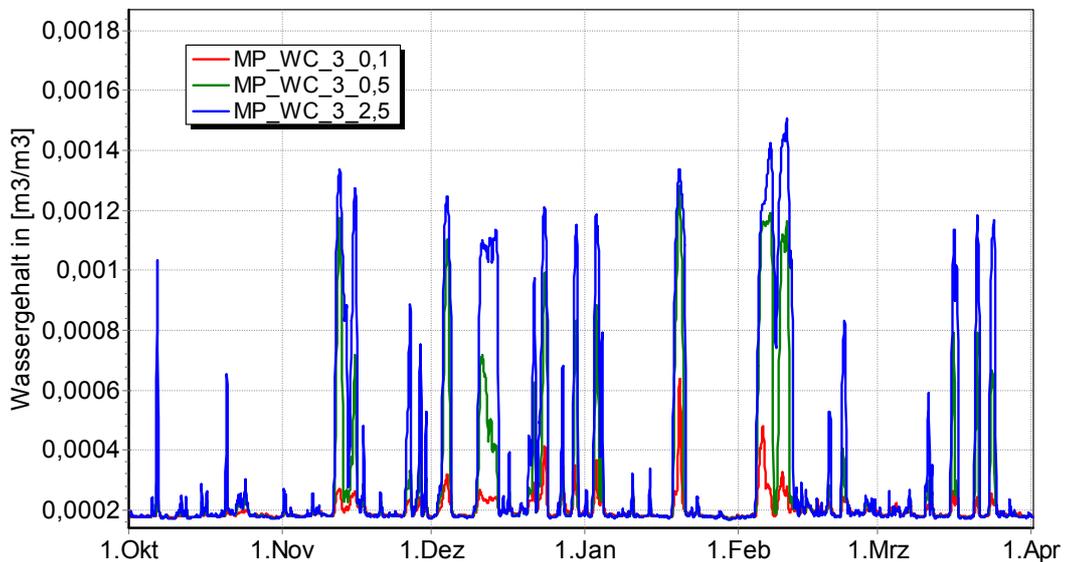


Abbildung 4.51: Verlauf der Wassergehalte an dem Ausgabepunkt 5 im Zeitraum von Oktober bis April.

#### 4.3 Einfluß der Orientierung am Beispiel der transparenten PE-Folie mit $sd = 6\text{m}$ und Luftwechselrate $n = 0.1$

Im folgenden Abschnitt werden auszugsweise die Ergebnisse der Varianten „transparente PE-Folie mit einem  $sd$ -Wert =  $6\text{m}$  und einer Luftwechselrate von  $n = 0.5$  vorgestellt. Aus dem Vergleich ausgewählter Ausgabepositionen ergeben sich die unterschiedlichen Belastungen in Abhängigkeit von der Orientierungsrichtung.

##### Integrale Wassermassendichte für unterschiedliche Orientierungen

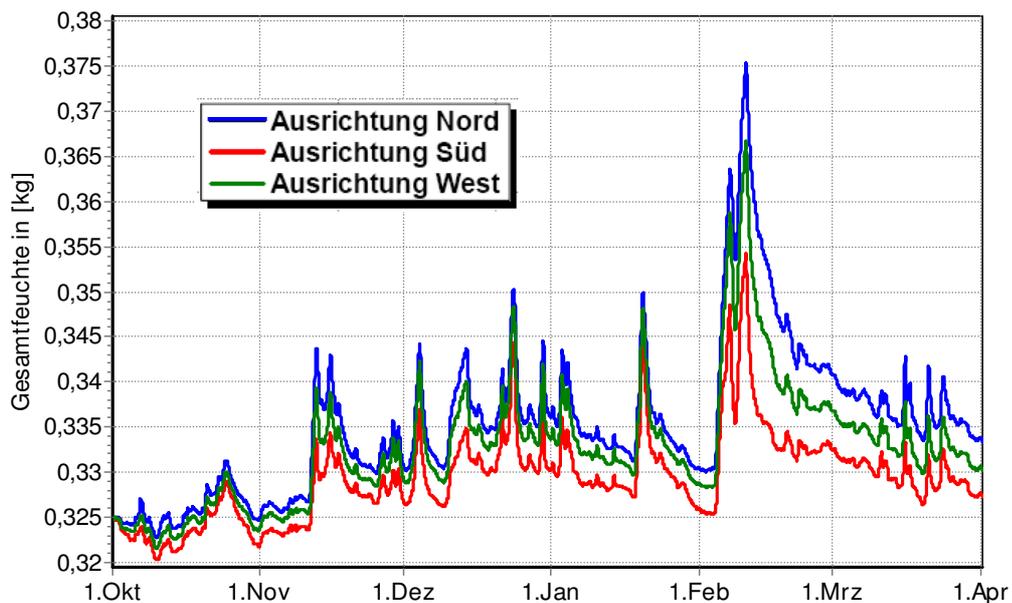


Abbildung 4.52: Verlauf der integralen Wassergehalte in der Skulptur bei einer Einhausung mit einer transparenten PE-Folie mit  $sd = 6\text{m}$  und einer Luftwechselrate von  $0.5\text{ 1/h}$  im Zeitraum von Oktober bis April.

Die Simulationsergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass die südlich exponierten Marmorbereiche der Skulpturen infolge des Strahlungseintrages am stärksten Abtrocknen. Die Nordexposition weist die höchsten Feuchtegehalte auf und die Westexposition nimmt eine Mittelstellung ein.

Unterschiede in den Berechnungsergebnissen zwischen den einzelnen Orientierungen sind auf den Einfluss der kurzwelligigen Strahlung zurückzuführen.

Auf horizontale Flächen wirken sowohl die kurzwellige wie auch die langwellige Strahlung stärker ein.

Ausgabepunkt 2, relative Luftfeuchte und Temperatur an der Oberfläche für unterschiedliche Orientierungen

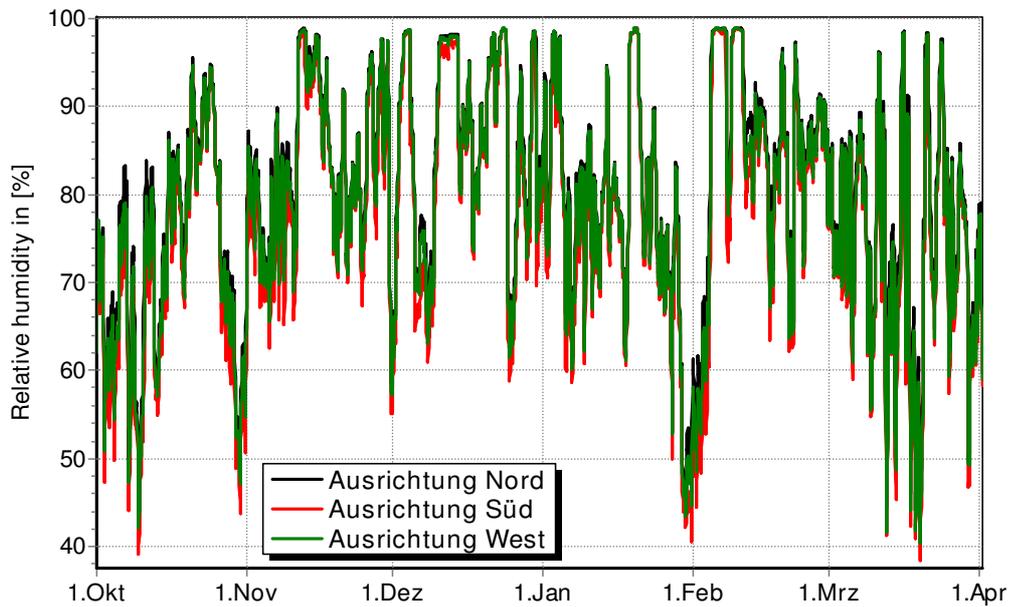


Abbildung 4.53: Verlauf der relativen Luftfeuchte an dem Ausgabepunkt 2 an der Skulptur bei einer Einhausung mit einer transparenten PE-Folie mit  $s_d = 6\text{m}$  und einer Luftwechselrate von  $0.5\text{ 1/h}$  im Zeitraum von Oktober bis April.

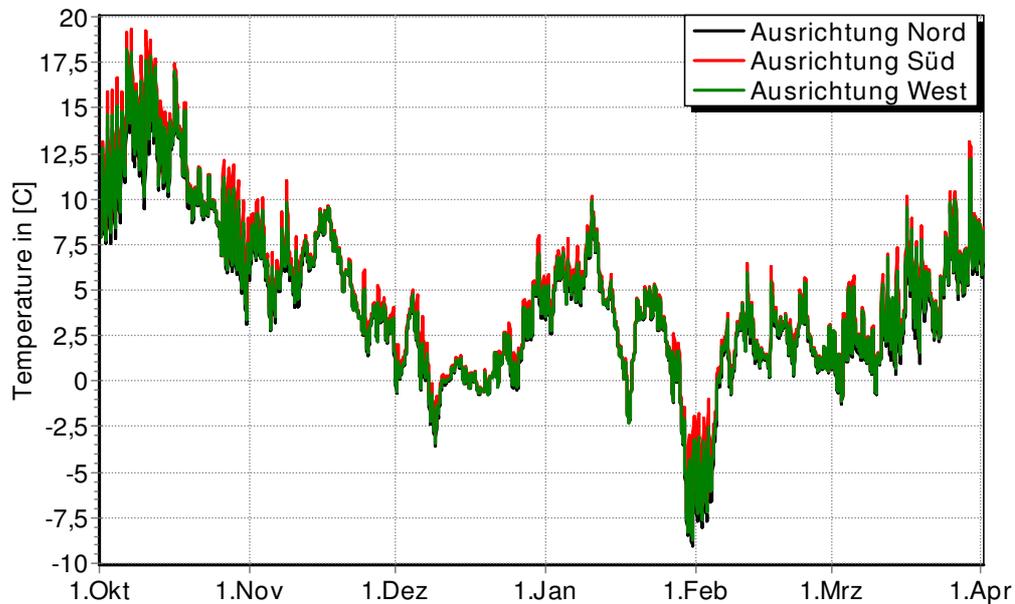


Abbildung 4.54: Verlauf der Temperatur an dem Ausgabepunkt 2 an der Skulptur bei einer Einhausung mit einer transparenten PE-Folie mit  $s_d = 6\text{m}$  und einer Luftwechselrate von  $0.5\text{ 1/h}$  im Zeitraum von Oktober bis April.

#### 4.4 Vergleich unterschiedlicher Einhausungssysteme bei verschiedenen Luftwechselraten $n = 0.1$ , $n = 0.5$ und $n = 2.5$

Im folgenden Abschnitt werden auszugsweise die Ergebnisse unterschiedlicher Einhausungssysteme bei verschiedenen Luftwechselraten von  $n = 0.5$ ,  $n = 0.5$  und  $n = 2.5$  miteinander verglichen. Aus den ausgewählten Vergleichen der Feuchtemassen leiten sich die unterschiedlichen Belastungen in Abhängigkeit von der Luftwechselrate ab.

Integrale Wassermassendichte für unterschiedliche Einhausungssysteme und nördlicher Exposition

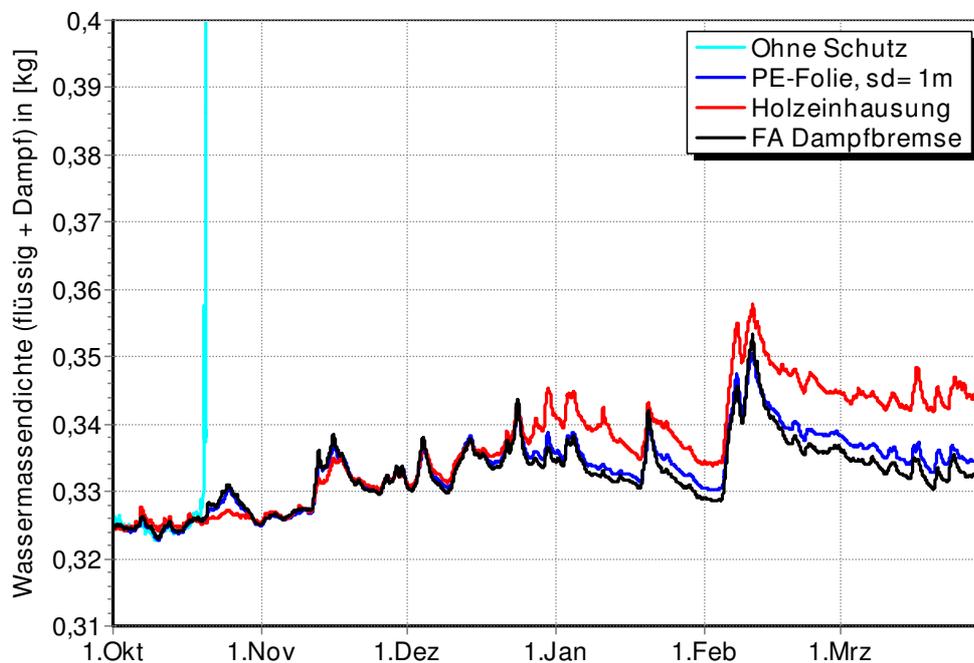


Abbildung 4.55: Verlauf der integralen Wassergehalte in der Skulptur bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von  $0.1 \text{ 1/h}$  im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

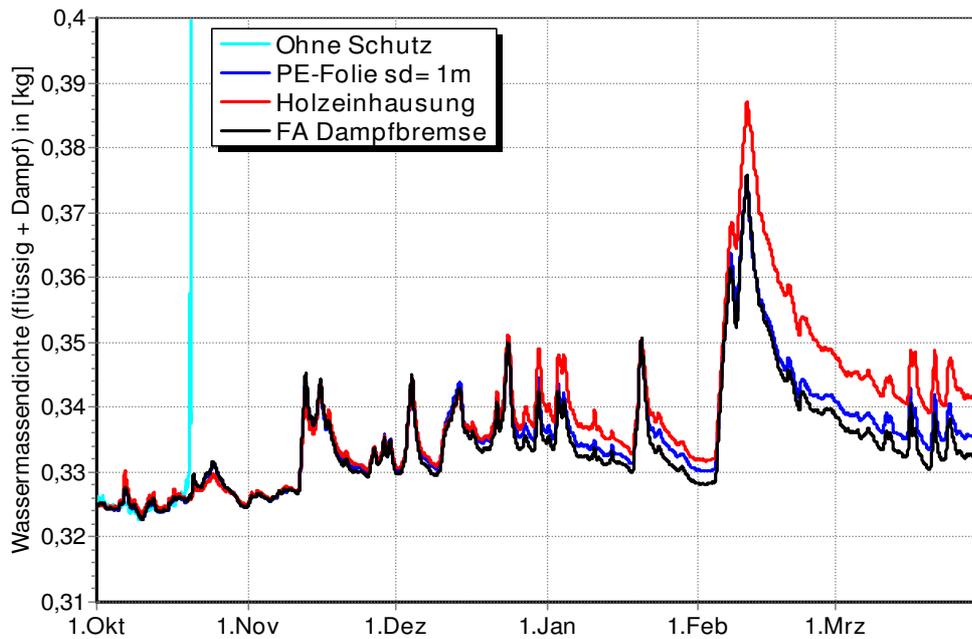


Abbildung 4.56: Verlauf der integralen Wassergehalte in der Skulptur bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von 0.5 1/h im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

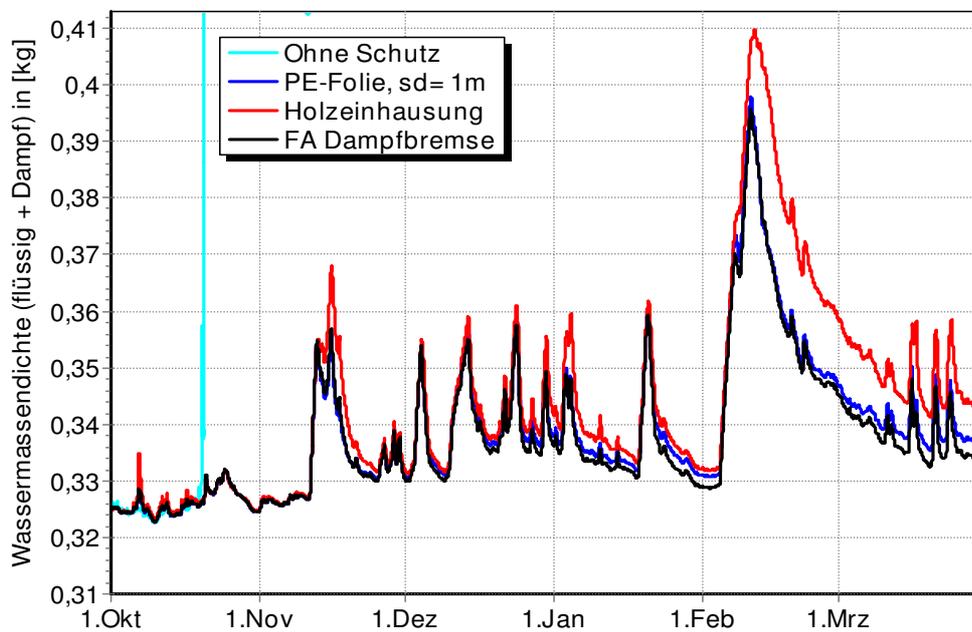


Abbildung 4.57: Verlauf der integralen Wassergehalte in der Skulptur bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von 2.5 1/h im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

Die Simulationsergebnisse zeigen die integralen Feuchtegehalte der Marmorskulpturen für unterschiedliche Einhausungssysteme im Vergleich. Für die feuchekritische Nordorientierung kann festgestellt werden, dass sämtliche Einhausungen eine deutlich geringere Feuchtebelastung aufweisen, als die freistehende Skulptur ohne Einhausung. Hier liegen um eine Größenordnung geringere Werte vor.

Der Vergleich der Einhausungen untereinander identifiziert die geringste Belastung bei der feuchteadaptiven Dampfbremse. Hier wirkt das Trocknungspotential der Dampfbremse bei höheren Feuchten positiv aus. Nur geringfügig schlechter ist die transparente PE-Folie mit einem  $s_d$ -Wert = 1 zu bewerten. Die Holzeinhausung ist zwar ein geeigneter Schlagregenschutz, jedoch kann in die Einhausung gelangte Feuchte schlechter wieder abtrocknen. Hinsichtlich der hygrischen Feuchtebelastung haben die Folien gegenüber der Holzeinhausung gewisse Vorteile.

Der Vergleich der Systeme bei unterschiedlichen Luftwechselraten zeigt, dass mit zunehmender Luftwechselrate die Marmorskulpturen stärker auffeuchten. Gelangt wärmere und häufiger auch feuchtere Luft an die kühleren Skulpturen, kondensiert Wasser an der Oberfläche, was zu einer kontinuierlichen Befeuchtung führt. Eine Abtrocknung der Skulpturen durch eine Luftkonvektion tritt unter den verwendeten Klimabedingungen des Testreferenzjahres weniger häufig auf. Daraus leitet sich im Hinblick auf die hygrische Feuchtebelastung die Empfehlung ab die Luftwechselrate möglichst niedrig zu halten.

#### 4.5 Vergleich unterschiedlicher Einhausungssysteme an verschiedenen Positionen der Marmorskulpturen, Nordorientierung und der Luftwechselrate $n = 0.1$

Im folgenden Abschnitt werden auszugsweise die Ergebnisse für die Einhausungssysteme an unterschiedlichen Positionen der Marmorskulpturen miteinander verglichen. Gewählt wurde die nordorientierte Exposition bei einer Luftwechselrate von  $n = 0.1$ . Aus den ausgewählten Vergleichen der Positionen untereinander ergeben sich die jeweiligen Belastungen.

Thermodynamische Zustandsgrößen für unterschiedliche Einhausungssysteme, nördlicher Exposition und einer Luftwechselrate von  $n = 0.1$

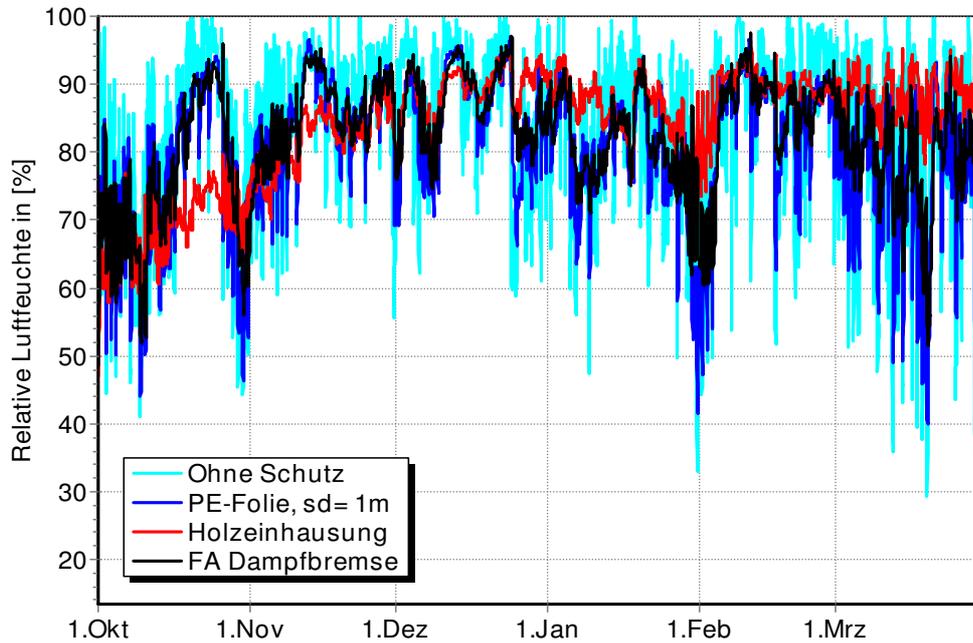


Abbildung 4.58: Verlauf der relativen Luftfeuchte am Arm der Skulptur (Position 1) bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von 0.1 1/h im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

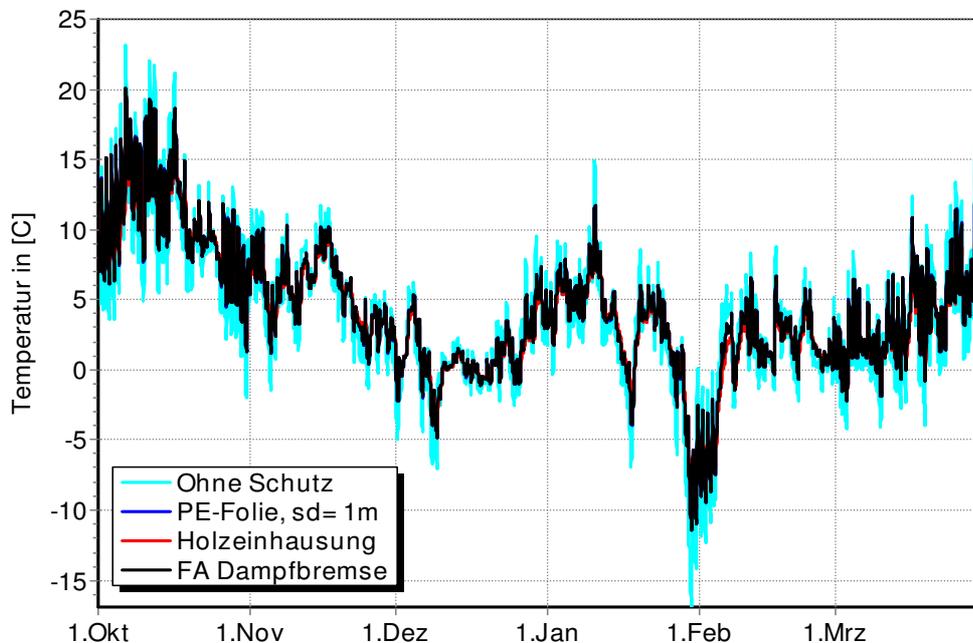


Abbildung 4.59: Verlauf der Temperatur am Arm der Skulptur (Position 1) bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von 0.1 1/h im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

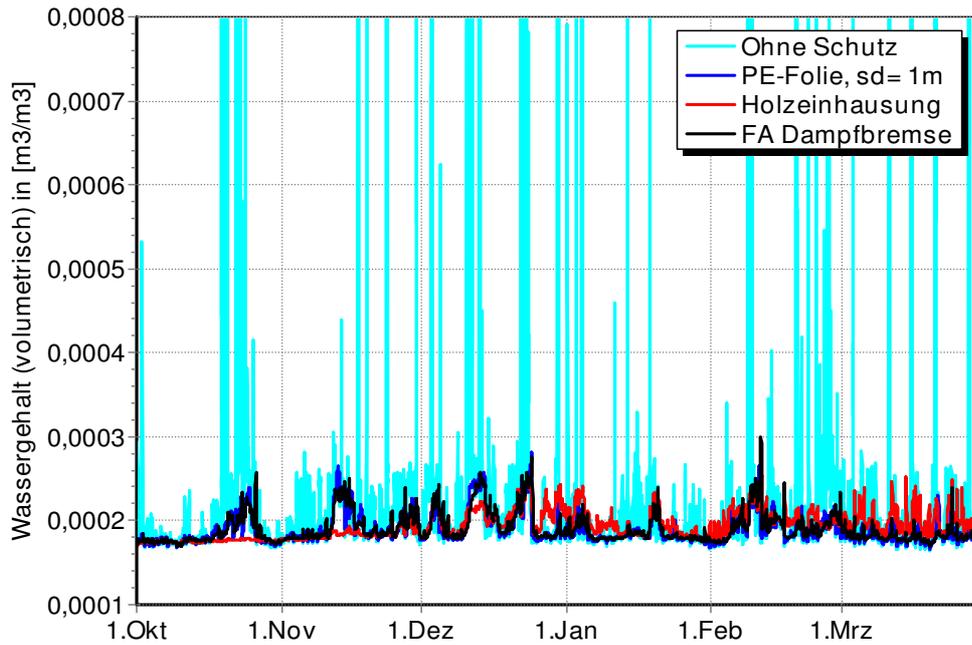


Abbildung 4.60: Verlauf der Wassergehalte am Arm der Skulptur (Position 1) bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von 0.1 1/h im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

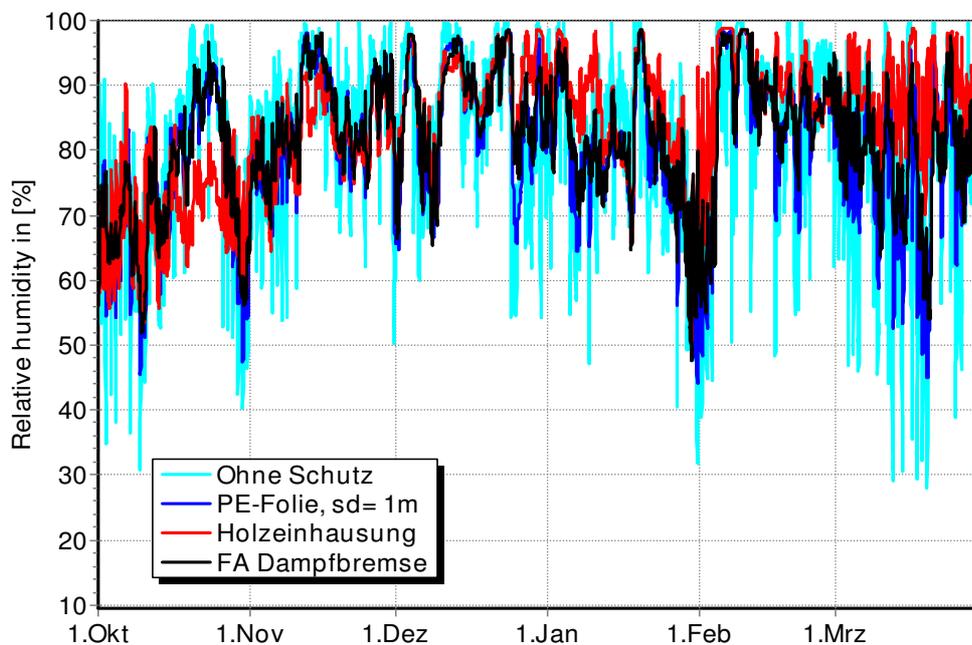


Abbildung 4.61: Verlauf der relativen Luftfeuchte am Torso der Skulptur (Position 2, horizontale Oberfläche oben) bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von 0.1 1/h im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

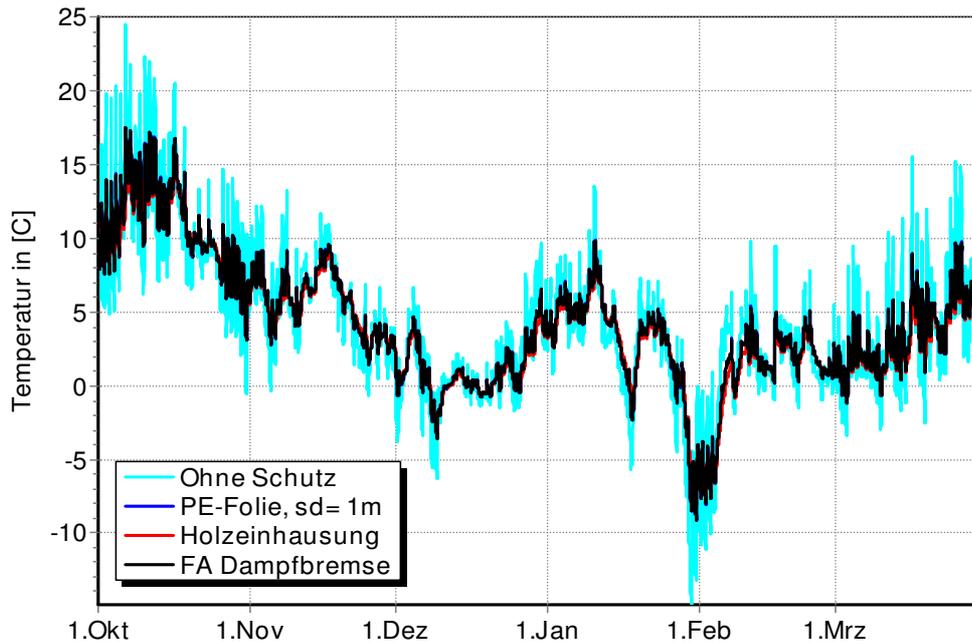


Abbildung 4.62: Verlauf der Temperatur am Torso der Skulptur (Position 2, horizontale Oberfläche oben) bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von 0.1 1/h im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

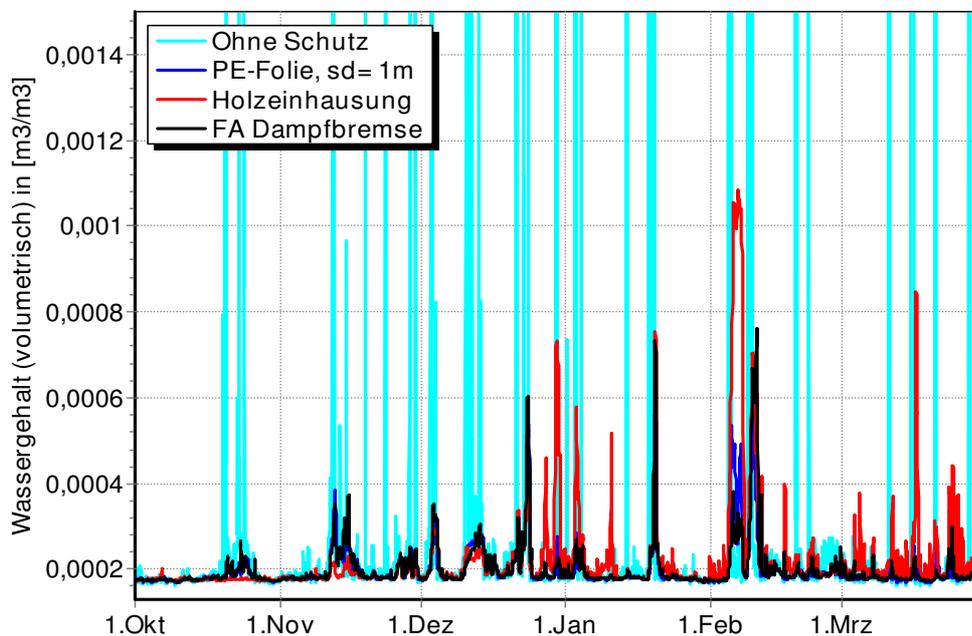


Abbildung 4.63: Verlauf der Wassergehalte am Torso der Skulptur (Position 2, horizontale Oberfläche oben) bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von 0.1 1/h im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

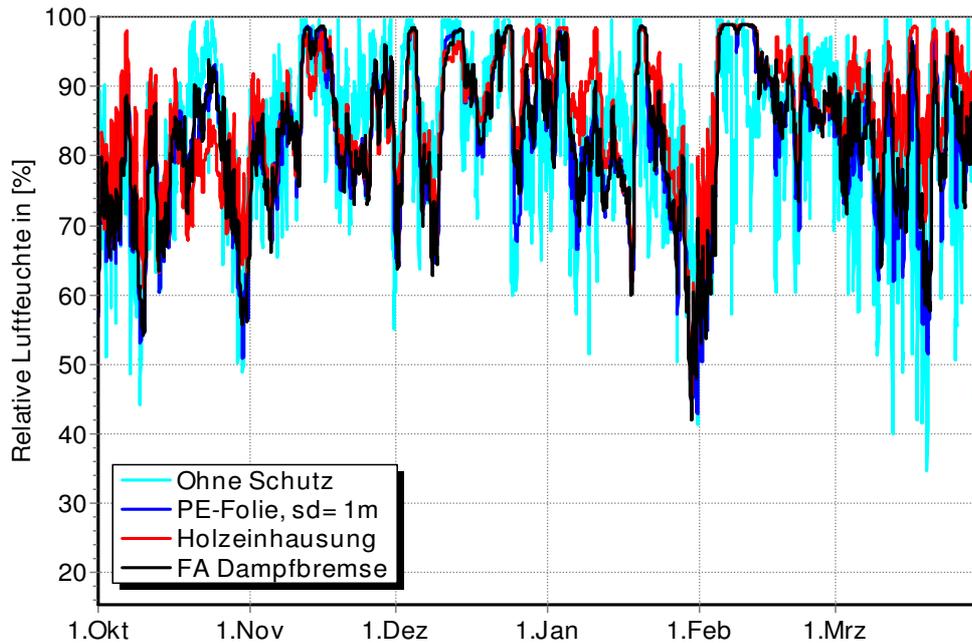


Abbildung 4.64: Verlauf der relativen Luftfeuchte am Torso der Skulptur (Position 3) bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von 0.1 1/h im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

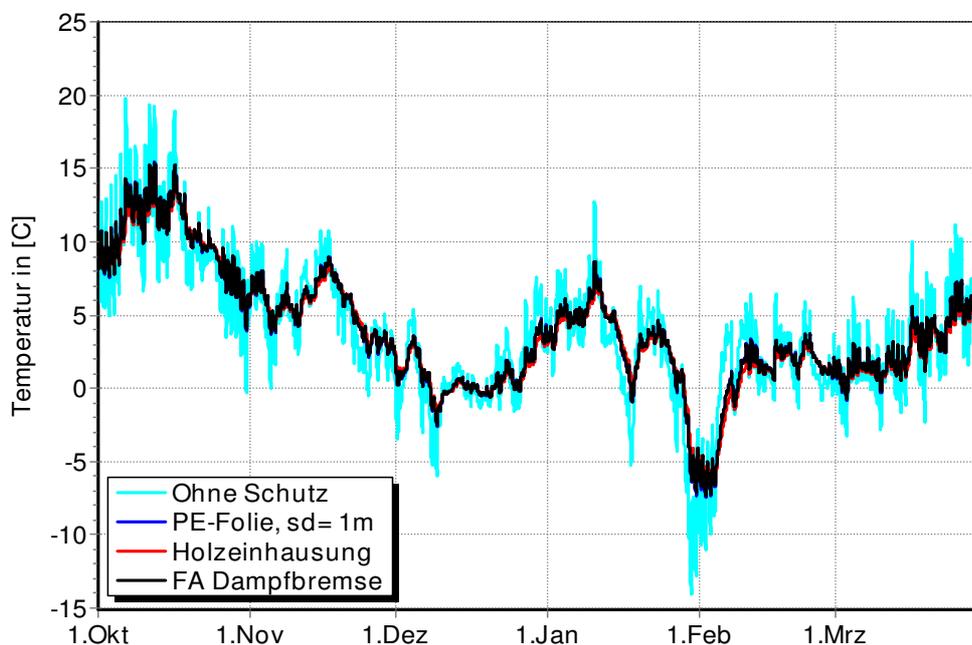


Abbildung 4.65: Verlauf der Temperatur am Torso der Skulptur (Position 3) bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von 0.1 1/h im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

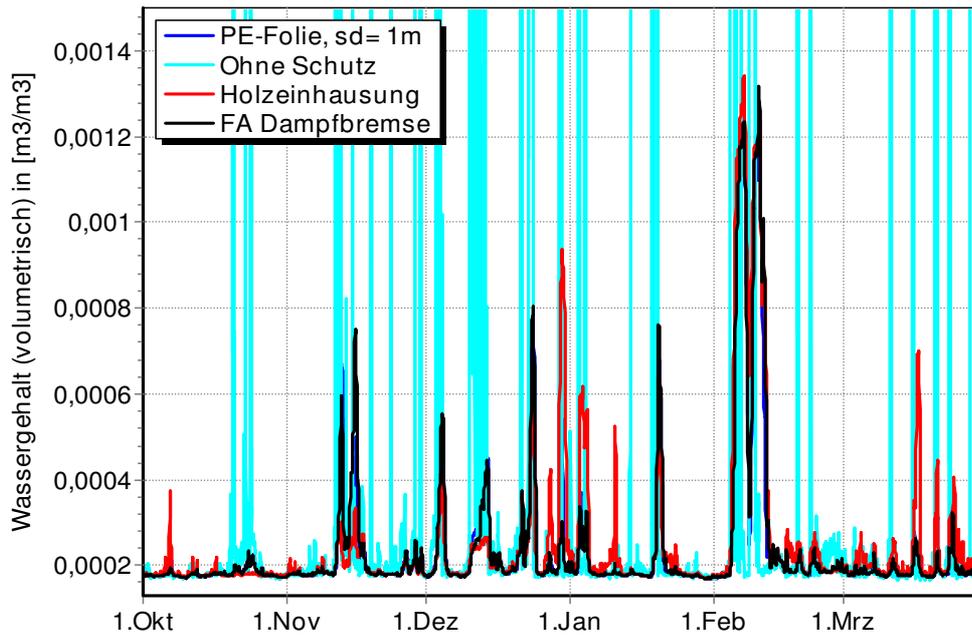


Abbildung 4.66: Verlauf der Wassergehalte am Torso der Skulptur (Position 3) bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von 0.1 1/h im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

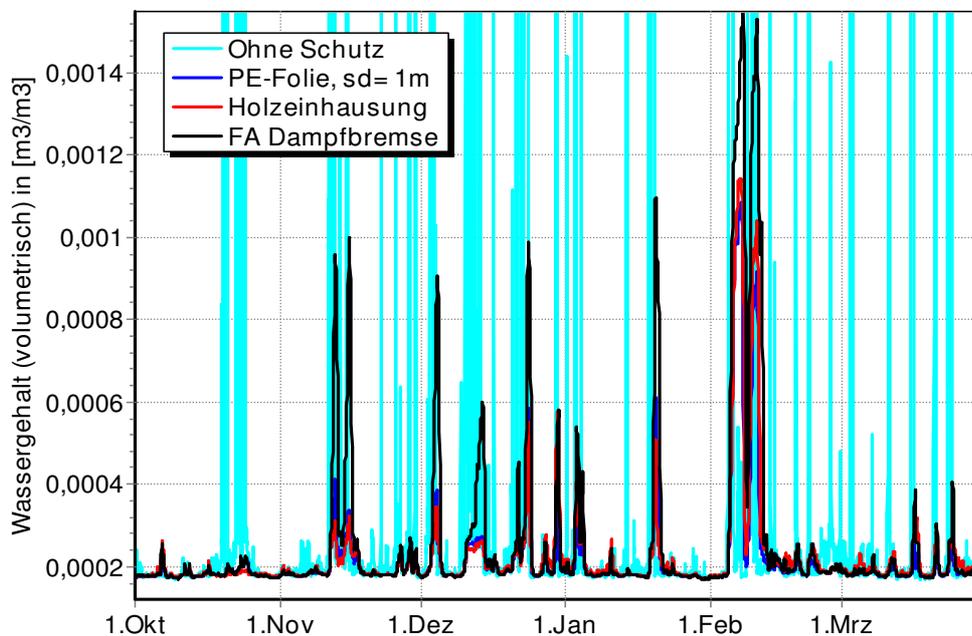


Abbildung 4.67: Verlauf der Wassergehalte am Torso der Skulptur (Position 4, horizontale Oberfläche unten) bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von 0.1 1/h im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

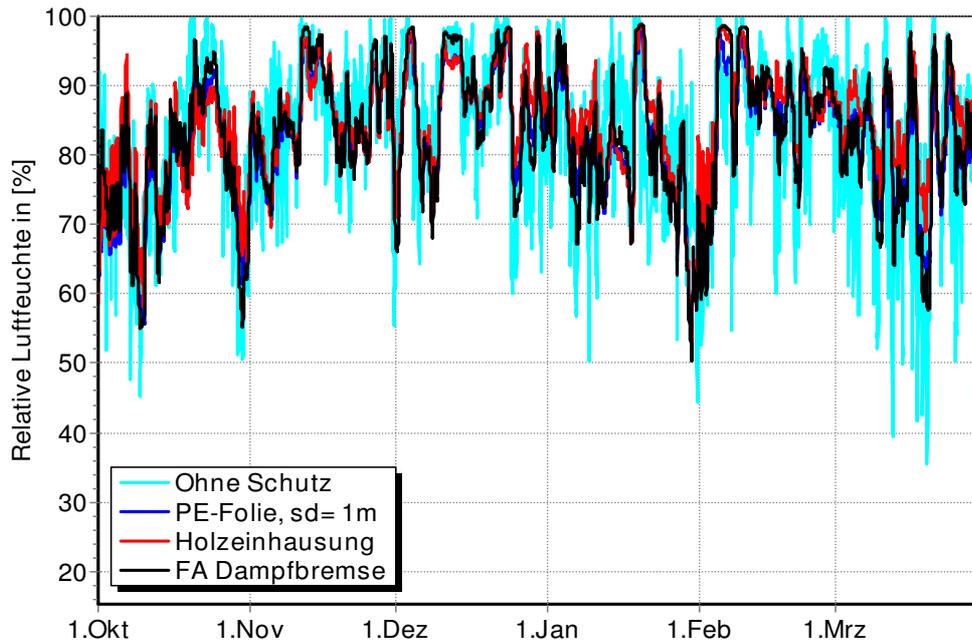


Abbildung 4.68: Verlauf der relativen Luftfeuchte am Bein der Skulptur (Position 5) bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von 0.1 1/h im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

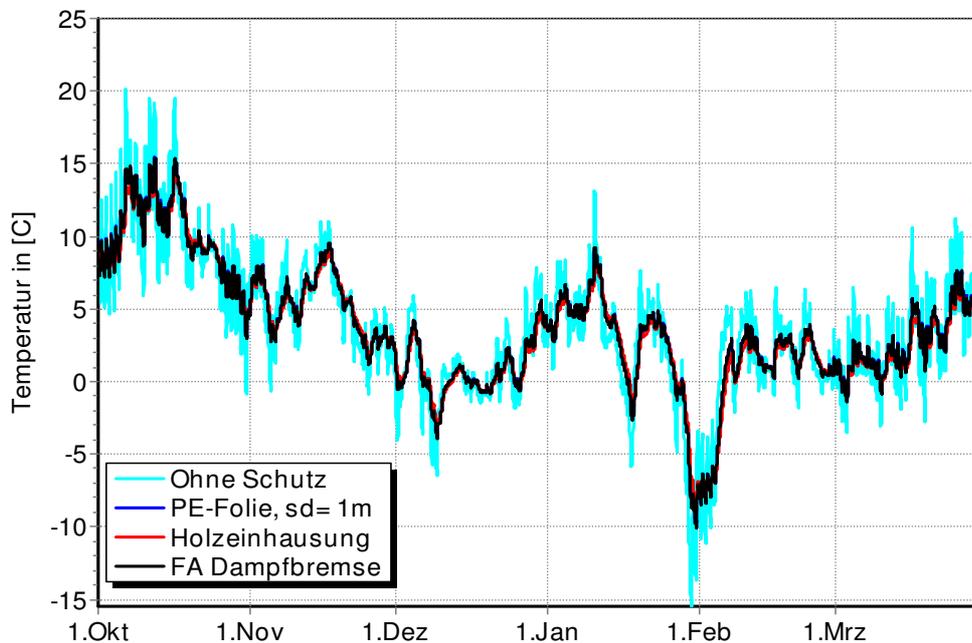


Abbildung 4.69: Verlauf der Temperatur am Bein der Skulptur (Position 5) bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von 0.1 1/h im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

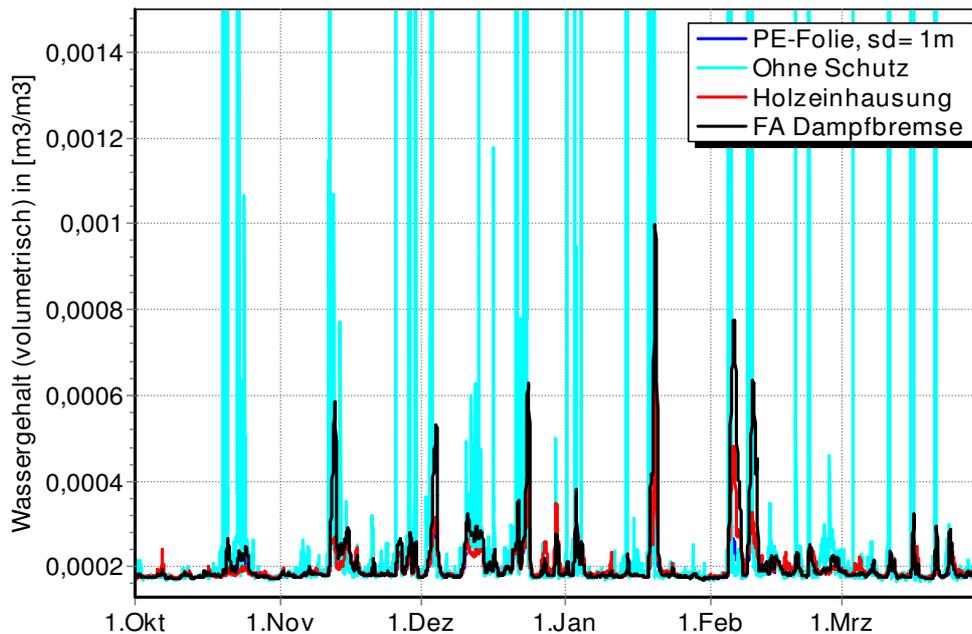


Abbildung 4.70: Verlauf der Wassergehalte am Bein der Skulptur (Position 5) bei unterschiedlichen Einhausungen und nördlicher Exposition bei einer Luftwechselrate von 0.1 1/h im Zeitraum von Oktober bis April. Die freistehende Skulptur ohne Einhausung ist vergleichend mit aufgeführt.

Die graphische Auswertung der Simulationen ergibt in allen Fällen eine erhebliche höhere Belastung der freistehenden Skulptur ohne Einhausung. Besonders sichtbar wird dies durch die übermäßigen Fluktuationen. Relative Luftfeuchte, Temperatur und Wassergehalte zeigen ein klimabedingtes „auf und ab“ und identifizieren eine hohe Belastungsintensität.

Die dünnen, filigranen Bereiche der Marmorskulptur (Position 1) weisen eine geringe Masse, sind folglich weniger träge auf und reagieren auf Temperaturänderungen relativ rasch. Dies zeigt sich in einer größeren Temperaturvariation. Aufgrund ihrer exponierten Lage können hier die höchsten Temperaturen ausgewiesen werden. Kondensation findet daher auch nur in einem geringen Maße statt, wodurch die Feuchtegehalte in Einhausungen ein niedriges Niveau aufweisen.

Ähnlich verhält sich der Bereich des nach oben exponierten Torsos (Position 2). Aufgrund der Einstrahlung werden solche Bereiche leicht temperiert, was sich ebenfalls in leicht reduzierten Feuchtegehalten niederschlägt. Ansonsten weist der Torso (Position 3) generell aufgrund der Massenträgheit eine geringere Fluktuation auf und ist deutlich durch Kondensationsereignisse charakterisiert. Diese können je nach Klimabedingungen auch länger andauern sein. Der Bereich des nach unten exponierten Torsos (Position 4) oder auch des Beins (Position 5) wird kaum durch Strahlung temperiert. Folglich sind hier die niedrigsten Temperaturen und höchsten Feuchtegehalte anzutreffen.

Bei der Bewertung der jeweiligen Einhausungstypen kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die Holzeinhausung hinsichtlich der Temperatur eine geringere Fluktuation

aufweist. Hier macht sich die Dämmwirkung des Holzes bemerkbar, wobei das Innenraumklima generell schwach geringere Temperaturen aufweist, da die Strahlung weniger wirksam ist. Die Marmorbereiche in den Positionen 1, 2 und 3 weisen hier höhere Wassergehalte in den Positionen 4 und 5 niedrigere Wassergehalte auf. Aufgrund der niedrigeren Temperaturen liegen in der Regel höhere Luftfeuchten in sämtlichen Positionen vor.

Eine detaillierte Betrachtung der Belastungen zeigt auch, dass die Holzeinhausung im Herbst gewisse Vorteile mit sich bringt, wobei die Fluktuationen und Belastungen geringere Amplituden zeigen. Während des Winters bis hin zum Ende der Einhausungsperiode verkehren sich diese Vorteile jedoch in einen Nachteil. In allen Bereichen sind Kondensationen und höhere Feuchtegehalte zu finden.

## 5. Auswertung und Interpretation der Simulationen

Der Vergleich der unterschiedlichen Einhausungssysteme ergibt kein einheitliches Bild. Positive Effekte bei den filigranen Marmorbereichen können sich bei den massiven Marmorskulpturelementen negativ auswirken und umgekehrt. Zudem bestehen Wechselwirkungen zwischen den Klimaeinflüssen, den Einhausungssystemen und der Marmorskulptur, die ein eindeutiges Ergebnis maskieren. Das Ziel, die Belastungen der Marmorskulpturen durch ein geeignetes Einhausungssystem zu minimieren, fordert eine komplexe Beurteilungsweise.

Aus den Untersuchungen von Rüderrich (2003) und Rüderrich et al. (2010) geht hervor, dass die Marmorverwitterung maßgeblich durch eine thermische und eine hygrische Dilatation gesteuert wird. Variierende Temperaturen und Wassergehalte führen zu sogenannten „microcracks“ und zur fortschreitenden Verwitterung, deren Ursache in der Anisotropie der kristallographischen Orientierung der Calcitkristalle liegt.

Vor diesem Hintergrund wird es wichtig die hygrischen und thermischen Fluktuationen der Marmorskulpturen in den Einhausungen zu minimieren. Zur Bewertung der unterschiedlichen Varianten von Einhausungen werden Fluktuationen herangezogen. Dazu werden die in der Simulation ausgegebenen Temperaturen, relativen Luftfeuchten und Wassergehalte sowie deren Profile in den repräsentativen Ausgabepositionen 1 bis 5 in ihrem zeitlichen Ablauf interpretiert. Die Zustandsgrößen oder auch Bemessungswerte aus der Simulation werden gegen die „Zeitstrecke“ aufgetragen (siehe Abbildung 5.1). Im angegebenen Beispiel weist beispielsweise die rote Kurve eine deutlich längere Zeitstrecke auf, als die blaue Kurve. Je größer die Variation eines Parameters, desto länger ist die zugehörige Zeitstrecke und desto größer ist auch die Belastung, die in der entsprechenden Position wirksam ist.

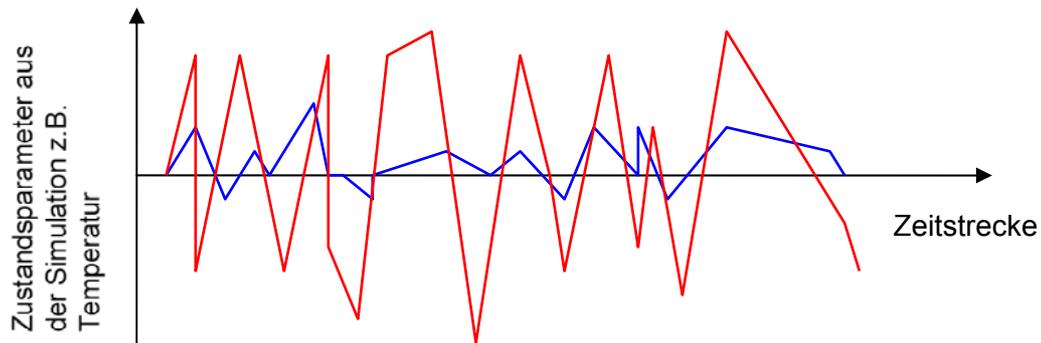


Abbildung 5.1: Schematisches Diagramm zur Verdeutlichung der Auswertung der Simulationsergebnisse für die Generierung von Belastungskennzahlen.

## 5.1 Belastungskennzahlen

Das in dieser Studie angewandte Auswertungsverfahren ist am Institut für Bauklimatik im Rahmen eines Forschungsvorhabens entwickelt worden. Es eignet sich ausgezeichnet, um belastbare Aussagen hinsichtlich der Eignung der verschiedenen Einhausungsarten zu treffen. Im Verlauf des Verfahrens werden dabei verschiedene Schadensmechanismen untersucht.

Algenwachstum / Schäden in Folge von Frost-Tauwechselln. Für die Abschätzung der Neigung der Skulpturen hinsichtlich eines Algenbefalls kann die kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche Hinweise liefern. Die kumulierte Kondensationsdauer beinhaltet deshalb die Zeitspanne, bei der die relative Luftfeuchte über 98% und gleichzeitig die Temperatur über 0°C verläuft. Sie erlaubt einen Vergleich der Wahrscheinlichkeit von biologischem Wachstum bei verschiedenen Konstruktionsvarianten: Je länger frei verfügbares Wasser vorhanden ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Algen oder Flechten auftreten.

Die Kondensationsdauer erlaubt auch Rückschlüsse auf die Gefahr von Frostschäden, denn mit der Dauer von Zuständen hoher Feuchtigkeit steigt auch während der kalten Witterungsperiode die Gefahr von Frostschäden. Hohe Feuchtegehalte in Verbindung mit niedrigen Temperaturen unter 0°C liefern Informationen über eine Frostwahrscheinlichkeit und die Anzahl von Frost-Tauwechselln.

Belastungskennzahlen für mechanische Schädigung. Zeitliche Änderungen von Feuchte und Temperatur bewirken hygri-sches Quellen und Schwinden sowie thermische Dehnungen. Dadurch kann es auch innerhalb einer homogenen Materialschicht zu Spannungsaufbau im Porengefüge kommen. Mikrorisse und Absandung können die Folge sein. Aus diesem Grund werden neben den Zustandsgrößen Feuchte und Temperatur auch deren Gradienten im oberflächennahen Bereich in die Auswertung einbezogen, d.h. der Verlauf von Temperatur und Feuchte auf der Oberfläche wird mit dem Verlauf in 10 mm Tiefe verglichen. Die

hygrothermischen Verwitterungs- und Rissinduktionsbelastungskennwerte sind ein Maß für die durch Temperatur- und Feuchteänderungen hervorgerufenen mechanischen Zerstörungen der äußeren Materialschichten. Dafür werden die Kurvenlängen von Temperatur, Luftfeuchte oder Wassergehalt bzw. deren Gradienten im Oberflächenbereich aufsummiert. Das heißt, die Wegstrecke, die z. B. der Temperaturverlauf in einem Jahr zurücklegt, wird hierfür mit berücksichtigt. Dabei werden sowohl die Amplitude als auch die Frequenz der „Temperaturschwingung“ erfasst. Ein Temperaturverlauf mit großen Differenzen zwischen Tageshöchst- und den tiefsten Temperaturen in der Nacht oder mit häufigeren Temperaturwechseln führt zu einer größeren Kurvenlänge als gleichmäßigere Oberflächentemperaturen.

Hohe Werte bei den Belastungskennzahlen sind demnach kritischer zu beurteilen. Je kleiner die Zahlenwerte, desto geringer ist die Belastung.

## 5.2 Tabellarische Ergebnisse und Auswertungen

In den nachfolgenden Tabellen sind von den fünf näher überwachten Positionen (siehe Abb. 2) auf der Marmorskulptur am Arm (Position 1), an einer oben gelegenen Fläche des Torsos (Position 2), an der Flanke des Torsos (Position 3) und an der Unterseite des Torsos (Position 4) sowie am Bein (Position 5) lediglich drei aus Gründen der Übersichtlichkeit angegeben. Die untere Seite des Körpers ist wegen der niedrigen langwelligen Abstrahlung nur gering belastet und wird deshalb hier nicht abgebildet. Die Position 5 an der Seite des Beines liegt bezüglich der Ergebnisse zwischen dem Bereich am dünnen Arm und der Flanke des Körpers.

Nahezu immer ergeben sich am Arm die höchsten Belastungszahlen, zum Teil mit großem Abstand zu den übrigen, überwachten Punkten. Ausschlaggebend für die höhere Belastung ist das geringe Volumen des Armes. Dadurch steht weniger hygri-sche und thermische Speichermasse zur Verfügung, um die Spannungen an der Oberfläche auszugleichen. Lediglich hinsichtlich der Gefahr von Schimmelpilzwachstum (Kondensationsdauer) und damit auch der Gefahr von Frost ist dort die Gefahr am geringsten. Der Grund hierfür ist darin zu suchen, dass der Arm während warmer Witterung schneller austrocknet, während an anderen Stellen der Skulptur länger Feuchte aus tiefer liegenden Bereichen an die Oberfläche geleitet wird. An massigeren Bereichen ist dadurch zwar der Feuchteverlauf im oberflächennahen Bereich gleichmäßiger, jedoch auch höher. Folgerichtig ist die Gefahr von Algenwachstum in massigen Bereichen am größten, z.B. dem Körper. Am Körper wiederum wurden die größten Belastungen an der Flanke registriert. Da feuchte Luft nach oben steigt und die langwellige Wärmeabstrahlung an zum Boden gerichteten Bereichen am geringsten ist, sind auch hier die geringsten Zeiten hoher Feuchte festzustellen. An Bereichen, die zum Himmel gerichtet sind, ist die kurzweilige Sonneneinstrahlung wiederum am größten, welche eine Austrocknung unterstützt. Demzufolge ist die Gefahr eines Algenwachstums, und von Frost-Tau-Schäden, an der Flanke der Skulpturen am größten.

Tab. 5.1: Belastungskennzahlen für die untersuchten nordexponierten Varianten: mit 4 Einhausungstypen, jeweils 3 Luftwechselraten und für 3 Positionen an der Marmorskulptur.

NORD			Hygrothermische Witterungs- belastung		Hygrothermische Rissinduktions- belastung		Kondensations- dauer $t_{\varphi} > 98\%$ [d]
	Luftwechsel [1/h]		Wärme	Feuchte	Wärme	Feuchte	
Dampfbremse	0.1	Arm	40.2	39.4	148.0	40.6	-
		Körper, oben	31.4	19.7	128.5	19.9	3.1
		Körperflanke	22.8	13.5	110.5	12.7	13.6
	0.5	Arm	40.2	40.3	148.0	39.8	-
		Körper, oben	31.4	20.1	128.5	18.6	14.0
		Körperflanke	22.8	19.1	110.4	15.0	24.4
	2.5	Arm	40.1	29.3	147.8	28.5	7.0
		Körper, oben	31.3	26.9	128.3	20.5	21.4
		Körperflanke	22.8	25.2	110.2	19.1	31.0
Holz	0.1	Arm	32.6	58.2	127.9	57.3	-
		Körper, oben	23.4	23.1	99.9	22.9	10.0
		Körperflanke	16.5	16.1	84.0	13.7	15.7
	0.5	Arm	32.5	35.2	128.1	36.0	0.1
		Körper, oben	23.3	19.9	100.2	16.4	15.9
		Körperflanke	16.5	20.9	84.0	16.8	27.6
	2.5	Arm	32.5	30.7	128.1	30.9	13.6
		Körper, oben	23.3	29.1	100.5	21.4	27.7
		Körperflanke	16.5	28.6	84.1	23.2	38.9
PE-Folie, $s_d = 1m$	0.1	Arm	40.2	49.9	147.8	49.9	-
		Körper, oben	31.4	20.4	128.5	19.4	4.3
		Körperflanke	22.7	13.0	110.5	12.0	12.9
	0.5	Arm	40.2	44.0	147.8	38.4	-
		Körper, oben	31.4	21.7	128.4	19.4	16.9
		Körperflanke	22.7	20.6	110.4	16.0	25.3
	2.5	Arm	40.2	29.5	147.9	28.7	7.2
		Körper, oben	31.4	27.1	128.5	20.7	21.5
		Körperflanke	22.7	25.5	110.5	19.6	31.1
PE-Folie, $s_d = 6m$	0.1	Arm	40.2	44.0	147.8	38.4	-
		Körper, oben	31.4	21.7	128.4	19.4	16.9
		Körperflanke	22.7	20.6	110.4	16.0	25.3
	0.5	Arm	40.2	44.1	147.8	38.2	-
		Körper, oben	31.4	21.3	128.4	19.2	16.5
		Körperflanke	22.7	20.4	110.4	15.9	25.2
	2.5	Arm	40.2	29.4	147.9	28.7	7.2
		Körper, oben	31.4	27.1	128.5	20.6	21.5
		Körperflanke	22.7	25.5	110.5	19.6	31.1
Ohne Einhausung	Winter	Arm	54.4	43.4	216.4	32.4	5.8
		Körper, oben	52.8	46.8	175.1	35.4	8.3
		Körperflanke	44.5	63.1	177.5	47.7	12.6
	Sommer	Arm	122.2	15.5	235.5	12.4	3.1
		Körper, oben	115.6	5.3	258.1	4.4	1.2
		Körperflanke	94	4.7	242.2	4.4	1.3

Tab. 5.2: Belastungskennzahlen für die untersuchten westexponierten Varianten: mit 4 Einhausungstypen, jeweils 3 Luftwechselraten und für 3 Positionen an der Marmorskulptur.

West			Hygrothermische Witterungsbelastung		Hygrothermische Rissinduktionsbelastung		Kondensationsdauer $t_p > 98\%$ [d]
Luftwechsel [1/h]			Wärme	Feuchte	Wärme	Feuchte	
Dampfbremse	0.1	Arm	44.4	49.4	132.2	45.8	-
		Körper, oben	31.9	20.2	129.7	19.5	2.9
		Körperflanke	29.6	14.3	100.9	13.9	10.1
	0.5	Arm	44.4	40.2	132.2	38.7	-
		Körper, oben	31.8	18.2	129.7	17.6	11.4
		Körperflanke	29.5	18.7	100.9	14.4	18.4
	2.5	Arm	44.4	28.4	132.0	27.4	6.4
		Körper, oben	31.8	25.1	129.6	20.4	19.9
		Körperflanke	29.5	24.0	100.8	17.6	26.1
Holz	0.1	Arm	35.7	55.1	128.0	52.2	-
		Körper, oben	23.8	25.5	101.4	25.2	9.0
		Körperflanke	21.2	20.4	82.8	19.1	13.9
	0.5	Arm	35.6	34.4	128.1	34.7	0.1
		Körper, oben	23.8	19.6	101.3	16.8	13.9
		Körperflanke	21.2	20.0	83.0	15.4	24.0
	2.5	Arm	35.5	29.1	128.0	29.8	12.5
		Körper, oben	23.7	26.6	101.3	21.2	25.9
		Körperflanke	21.2	29.8	83.4	20.6	34.5
PE-Folie, $s_d = 1\text{m}$	0.1	Arm	44.5	49.7	131.7	46.9	-
		Körper, oben	31.9	19.3	129.5	17.4	2.4
		Körperflanke	29.5	12.3	101.0	11.8	9.5
	0.5	Arm	44.5	43.6	131.7	37.2	-
		Körper, oben	31.9	19.7	129.5	19.0	13.3
		Körperflanke	29.5	20.1	101.0	15.3	20.8
	2.5	Arm	44.5	28.5	131.7	27.6	6.7
		Körper, oben	31.8	25.3	129.6	20.5	20.0
		Körperflanke	29.5	24.3	101.0	17.8	26.3
PE-Folie, $s_d = 6\text{m}$	0.1	Arm	44.5	56.3	131.8	52.4	-
		Körper, oben	31.9	21.7	129.5	20.8	0.2
		Körperflanke	29.5	10.4	101.0	9.8	6.9
	0.5	Arm	44.4	43.9	131.5	37.3	-
		Körper, oben	31.9	19.3	129.3	18.6	12.9
		Körperflanke	29.5	19.8	100.8	15.1	20.6
	2.5	Arm	44.4	28.5	131.7	27.5	6.7
		Körper, oben	31.9	25.3	129.6	20.5	20.0
		Körperflanke	29.5	24.3	101.0	17.8	26.3
Ohne Einhausung	Winter	Arm	61.2	92.7	129.8	67.5	10.9
		Körper, oben	54.2	47.3	169.7	36	8.2
		Körperflanke	53.4	95.4	133.2	73.2	15.7
	Sommer	Arm	125.0	41.0	237.7	34.0	4.9
		Körper, oben	121.6	5.2	254.9	4.3	1.2
		Körperflanke	108	19.7	222.4	16.6	2.1

Tab. 5.3: Belastungskennzahlen für die untersuchten südexponierten Varianten: mit 4 Einhausungstypen, jeweils 3 Luftwechselraten und für 3 Positionen an der Marmorskulptur.

Süd			Hygrothermische Witterungsbelastung		Hygrothermische Rissinduktionsbelastung		Kondensationsdauer $t_{\phi} > 98\%$ [d]
			Wärme	Feuchte	Wärme	Feuchte	
Luftwechsel [1/h]							
Dampfbremse	0.1	Arm	48.4	37.4	140.8	35.0	-
		Körper, oben	34.0	20.4	130.5	31.0	2.3
		Körperflanke	34.6	13.4	124.9	13.1	6.7
	0.5	Arm	48.4	43.6	140.8	40.9	-
		Körper, oben	33.9	15.5	130.5	15.2	9.5
		Körperflanke	34.6	16.2	124.9	14.8	12.9
	2.5	Arm	48.3	26.6	140.6	25.4	5.5
		Körper, oben	33.9	24.0	130.3	23.1	15.5
		Körperflanke	34.5	24.2	124.8	17.9	18.5
Holz	0.1	Arm	38.7	44.6	132.9	48.5	-
		Körper, oben	25.4	27.6	101.8	26.9	7.8
		Körperflanke	24.7	23.7	98.3	23.3	11.6
	0.5	Arm	38.7	34.6	133.0	34.2	-
		Körper, oben	25.4	20.2	102.1	18.8	11.7
		Körperflanke	24.7	18.7	98.2	14.5	16.3
	2.5	Arm	38.5	28.4	132.9	28.2	10.1
		Körper, oben	25.3	27.4	102.4	20.4	21.5
		Körperflanke	24.6	24.4	98.3	18.8	26.3
PE-Folie, $s_d = 1m$	0.1	Arm	46.7	53.5	134.6	50.2	-
		Körper, oben	32.6	16.7	126.3	14.8	1.4
		Körperflanke	33.3	11.3	119.7	10.6	6.1
	0.5	Arm	46.7	44.8	134.6	37.3	-
		Körper, oben	32.6	17.0	126.2	16.5	10.8
		Körperflanke	33.4	18.1	119.7	15.6	14.5
	2.5	Arm	48.5	26.9	140.7	25.8	5.5
		Körper, oben	34.0	24.3	130.4	23.3	15.9
		Körperflanke	34.5	24.7	125.0	18.2	19.4
PE-Folie, $s_d = 6m$	0.1	Arm	48.5	55.4	140.6	51.2	-
		Körper, oben	34.0	22.7	130.2	21.1	-
		Körperflanke	34.5	11.7	124.9	10.7	4.2
	0.5	Arm	48.5	45.6	140.7	37.6	-
		Körper, oben	34.0	16.7	130.3	16.1	10.6
		Körperflanke	34.5	17.9	125.0	15.5	14.2
	2.5	Arm	48.5	26.9	140.7	25.7	5.5
		Körper, oben	34.0	24.3	130.4	23.3	15.9
		Körperflanke	34.5	24.7	125.0	18.2	19.4
Ohne Einhausung	Winter	Arm	69.2	83.1	163	65.7	9.3
		Körper, oben	54.7	44.8	167.5	33.5	7.9
		Körperflanke	61.2	92.7	154.6	70.6	13.9
	Sommer	Arm	125.1	24.0	224.1	20.3	2.4
		Körper, oben	121.9	5.4	253.1	4.4	1.2
		Körperflanke	105.7	8	212.6	6.8	0.5

Bezüglich der Auswertung der Simulationsergebnisse hatten diese Beobachtungen zur Folge, dass nur die Bereiche mit der jeweils stärksten Belastung miteinander verglichen wurden.

Im Folgenden werden nur die Einhausungsvarianten miteinander verglichen. Eine Gegenüberstellung mit der ungeschützten Skulptur wird später vorgenommen.

#### Einfluss der Orientierung

Witterung-Wärme: Hier ist die südliche Ausrichtung am stärksten belastet, die Ausrichtung nach Norden mit der geringsten Sonneneinstrahlung am geringsten, der nach Westen ausgerichtete Teil liegt gemäß den Berechnungsergebnissen dazwischen.

Witterung-Feuchte: Bei den Holzeinhausungen ist der Norden am stärksten belastet und der Westen etwas stärker als der Süden. Mit der feuchteadaptiven Dampfbremse sind uneinheitliche Ergebnisse festzustellen. Die Ergebnisse bei den PE-Folien unterscheiden sich nur kaum.

Riss-Wärme: Bei Verwendung von Dampfbremsen oder PE-Folien sind an nördlich orientierten Bereichen die größten Scherspannungen in oberflächennahen Flächen zu erwarten, an südlichen Bereichen wird diese am geringsten sein. Holzeinkleidungen verursachen dagegen an nördlichen Flächen die höchsten Spannungen, die anderen Ausrichtungen liegen etwas darunter.

Riss-Feuchte: Bei Holzeinhausungen und auch bei den PE-Folien sind nahezu mit allen Varianten im Norden die Belastungen am größten. Mit Dampfbremse sind uneinheitliche Ergebnisse festzustellen.

Algen: Die Wahrscheinlichkeit von Algenwachstum beziehungsweise die Gefahr, dass Frost-Tau-Wechsel zu strukturellen Schäden führen können ist bei allen Varianten übereinstimmend im Norden am größten. Im Süden, bedingt durch die größere Einwirkung kurzweiliger Sonnenstrahlung, sind diese Belastungskennzahlen am geringsten.

#### Einfluss der Luftwechselrate

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass mit einer Luftwechselrate von 2.5 1/h die geringsten Belastungen bei den Belastungskennzahlen bezüglich der Witterungs- und Rissinduktionsspannungen ermittelt worden sind.

Demgegenüber steigt die Dauer von Zuständen hoher Feuchte mit der Luftwechselrate auf der Materialoberfläche eindeutig an. Es fällt dabei auf, dass bei vielen Varianten, die Differenz der Dauer hoher Feuchte zwischen 0.1 und 0.5 1/h genau so groß ist, wie zwischen einer Luftwechselrate von 0.5 und 2.5 1/h, während sich also der Luftwechsel vervünffacht, bleibt die Steigerung bei der Dauer häufig ähnlich. Bei der Dauer der Kondensationsperiode ist die Steigerung zwischen niedriger und hoher Luftwechselrate jedoch stärker ausgeprägt, als bei den anderen Belastungskennzahlen, die sich dazu häufig nicht ändern. Demzufolge kann aus den Tabellen geschlossen werden, dass eine niedrige

Luftwechselrate bevorzugt werden sollte.

#### Einfluss des Materials

Algenwachstum (Frost): Gemäß den Ergebnissen ist bei Verwendung einer Holzeinhausung in jedem Fall die Gefahr am höchsten, dass es zu Schäden infolge von Frost-Tauwechselln und Algenwachstum kommt.

Witterung-Wärme, Riss-Wärme: Zwischen den drei verschiedenen Folien unterscheiden sich die Ergebnisse praktisch nicht. Bei diesen thermischen Konstruktionskennwerten verhält sich die Skulptur mit Holzeinhausung grundsätzlich etwas besser. Die Holzeinhausung bewirkt offensichtlich eine ausgleichende Wirkung auf die thermischen Belastungskennzahlen aus.

Witterung-Feuchte, Riss-Feuchte: Bei Nordorientierung und bei niedrigen Luftwechselraten fällt diese feuchtetechnische Belastungskennzahl mit Holzeinhausung etwas schlechter aus, als bei den drei Foliensystemen. Mit höheren Luftwechselraten sind die Ergebnisse ähnlich.

Werden die drei Foliensysteme miteinander verglichen kann festgestellt werden, dass die feuchteadaptive Dampfbremse bei den feuchtetechnischen Kennwerten meistens günstigere Ergebnisse zeigt, vor allem bei niedrigen Luftwechselraten.

#### Freie Bewitterung der Marmorskulpturen

Auffällig ist die im Sommer und Winter unterschiedliche Belastung hinsichtlich Feuchte und Wärme. Während im Sommer die thermischen Kennzahlen weitaus kritischer sind als im Winter, übertreffen die hygrischen Belastungskennzahlen im Winter die sommerlichen Ergebnisse.

Ohne schützende Einhausung bewegen sich die Ergebnisse bezüglich der wärmetechnischen Belastung sehr deutlich über den Werten mit Einhausung jeder Variante. Die Wahrscheinlichkeit von Algenwachstum (und Frostschiäden) ist jedoch vergleichbar, wenn bei den eingehausten Varianten eine niedrige Luftwechselrate von 0.1 1/h zur Anwendung kommt. Bei höheren Luftwechselraten sind bei eingehausten Skulpturen die Bedingungen für Algen günstiger. Die hygrische Belastung ist bei der nicht eingehausten Skulptur wegen des Schlagregeneinflusses stark abhängig von der Orientierung, während für den Norden die ungeschützte Variante teilweise besser abschneidet als die Foliensysteme sind in den stärker dem Regen ausgesetzten Orientierungen die hygrischen Kennwerte zum Teil doppelt so hoch wie die Ergebnisse mit Einhausung.

## 6. Literatur

- Blum (2002) *Modellvorhaben: Einhausungen für den Schutz von Klima- und Umweltbelastungen an wertvollen Denkmälern aus Natursteinen anhand von Beispielen an den Schlössern Clemenswerth (Niedersachsen) und Weikersheim (Baden-Württemberg)* Az 12559, unveröffentl. DBU Bericht.
- Greubel D., Schwarz A., (1998) *Klimamessungen und Regenbelastung. in: Die Steinskulpturen am Zentralbau des Jagdschlusses Clemenswerth / Emsland*, Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen 15, S. 69 - 73.
- Ishisaki T., M. Takami, J. Grunewald, R. Plagge & H. Fechner 2003: *Deterioration mechanism of stone and earthen walls in historical village of Hokkaido*. In. Research in Building Physics, eds. J. Carmeliet, H. Hens & G. Vermeir. A.A. Balkema Swets & Zeilinger B.V. Linse Netherlands, Publishers, ISBN 90 5809 565 7, 283-290.
- Lange K. persönliche Mitteilungen Dezember 2007 und Januar 2008, Fotos und zwei Excel-Dateien der Klimamessungen in Sanssouci.
- Nicolai A, Grunewald J, Plagge R, Scheffler G, (2008a) *Development of a Combined Heat, Moisture, and Salt Transport Model for Unsaturated Porous Building Materials, in simulation of Time Dependent Degradation of Porous Materials*, Research Report on Priority Program DFG SPP 1122, eds. L. Franke, G Deckelmann & R. Espinosa-Marzal, Cuilliver Verlag, ISBN 978-3-86727-902-4, S. 67-84.
- Nicolai A, Grunewald J, Plagge R, Scheffler G, (2008b) *An Efficient Numerical Solution Method and Implementation for Coupled Heat, Moisture and Salt Transport: The Delphin Program*, Research Report on Priority Program DFG SPP 1122, eds. L. Franke, G Deckelmann & R. Espinosa-Marzal, Cuilliver Verlag, ISBN 978-3-86727-902-4, S. 85-100.
- Plagge, R. 2008: *Effect of climatic load on the material properties of the Humayun Red Sandstone*. International Symposium on "Study of Environmental Conditions Surrounding Cultural Properties and Their Protective Measures". In Conservation and Restoration of Cultural Property 2008.
- Plagge, R. 2004: *Experimental technique to measure material parameters related to moisture flow*. Symposium on: Study of moisture problems related to the conservation of historical stone monuments and buildings, National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo, Japan, 19-32.
- Poschlod K. 1990: *Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluss auf die Verwitterung*. Münchener Geowissenschaftl. Abhandlungen.
- Ruedrich J (2003): *Gefügekонтроllierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore*. Diss. Universität Göttingen.

- Rüderich, J., Y. Rieffel, S. Pirskawetz, H. Alpermann, U. Joksch, C. Gengnagel, F. Weise, R. Plagge, J. Zhao & S. Siegesmund 2010: *Development and assessment of protective winter covers for marble statues of the Schlossbrücke, Berlin (Germany)*, Environ Earth Sci. DOI 10.1007/s12665-010-0765-2.
- Scheffler, G. & R. Plagge 2009: *A whole range hygric material model: Modelling liquid and vapour transport properties in porous media*, International Journal of Heat and Mass Transfer. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.030
- Wölbart O. (2005): *Winterschutzverkleidungen für witterungsgefährdete Objekte*. In: Matthias Exner, Dörthe Jakobs (Hrsg.) *Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte*, Tagung ICOMOS, Reichenau Nov. 2004, S.185 - 190.