

Rainer Drewello (Hg.)

## Risikozyffer

Umweltschäden an Marmor und Sandsteinskulpturen  
erfassen und objektiv bewerten

**Risikoziffer.**  
**Umweltschäden an Marmor und Sandsteinskulpturen**  
**erfassen und objektiv bewerten**

Risk Number.  
Determining and objectively assessing environmental damage  
on marble and sandstone sculptures

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)



**Forschungen des Instituts  
für Archäologische Wissenschaften,  
Denkmalwissenschaften und Kunstgeschichte**

herausgegeben vom Institut für Archäologische Wissenschaften, Denkmalwissenschaften  
und Kunstgeschichte der Otto-Friedrich-Universität Bamberg

Abteilung  
Archäologische  
Wissenschaften

Michaela Konrad  
Andreas Schäfer  
Till Sonnemann

Abteilung  
Denkmalwissenschaften

Stefan Breitling  
Mona Hess  
Rainer Drewello  
Gerhard Vinke

Abteilung  
Kunstgeschichte

Stephan Albrecht  
Wolfgang Brassat

Band 12

**Abteilung Denkmalkunde,**

Verantwortlicher Herausgeber:

Rainer Drewello

Rainer Drewello (Hg.)

# Risikoziffer

Umweltschäden an Marmor und  
Sandsteinskulpturen erfassen und objektiv  
bewerten

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

Die Arbeiten zu dieser Publikation fanden im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU geförderten Projekts statt. Dessen offizieller Titel lautet: „Entwicklung eines konservatorischen Bewertungssystems zum Schutz anthropogen geschädigter Sandstein- und Marmorskulpturen sowie dessen modellhafte Evaluierung am Beispiel national bedeutender Sammlungen“. AZ 33162/01-45

### **Danksagung**

An erster Stelle gebührt ein besonderer Dank der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die großzügige Förderung des Projekts. DBU AZ 33162/01-45

Ohne die Unterstützung der nachfolgend genannten Institutionen wäre die erfolgreiche Durchführung des Projekts nicht möglich gewesen:

Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg, Potsdam. Frau Kathrin Lange  
Bayerische Verwaltung der Staatlichen Schlösser, Gärten und Seen, Schloss Nymphenburg München. Herr Klaus Häfner

sib – Sächsisches Immobilien- und Baumanagement, Dresden. Frau Tanja Müller

Staatliche Schlösser, Burgen und Gärten Sachsen, Barockgarten Großsedlitz. Frau Dr. Andrea Dietrich

Stadt Baiersdorf als Sachwalterin des Jüdischen Friedhofs. Frau Daniela Pietsch

Mit wichtigen Anregungen und Verbesserungsvorschlägen haben die Mitglieder des Fachbeirats das Projekt befördert: Dr. Michael Auras, Dr. Paul Bellendorf, Dipl. Rest. Klaus Häfner, Prof. Dr. Christoph Herm, Dr. Saskia Hüneke, Dr. Arndt Kiesewetter, Dipl. Rest. Kathrin Lange, Dipl. Chem. Martin Mach, Dipl. Ing. Tanja Müller, Prof. Dr. Siegfried Siegesmund, Prof. Dr. Heiner Siedel, Dr. Eberhard Wendler.

### Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Informationen sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk ist als freie Onlineversion über den Hochschulschriften-Server (OPUS; <http://www.opus-bayern.de/uni-bamberg/>) der Universitätsbibliothek Bamberg erreichbar. Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Herstellung und Druck: docupoint Magdeburg

Umschlaggestaltung: University of Bamberg Press Bamberg, Larissa Günther

Umschlagbild: Apoll vorn C. Pfeuffer. Apoll SGSG Potsdam Sanssouci K. Lange. Apoll rück C. Pfeuffer.

© University of Bamberg Press Bamberg, 2018

<http://www.uni-bamberg.de/ubp/>

ISSN: 2196-4505

ISBN: 978-3-86309-553-6 (Druckausgabe)

eISBN: 978-3-86309-554-3 (Online-Ausgabe)

URN: urn:nbn:de:bvb:473-opus4-510935

DOI: <http://dx.doi.org/10.20378/irbo-51093>

# Inhalt

<b>1.</b>	Risikoziffer I: Wege der Entscheidungsfindung in der Denmalpflege . . . . .	9
	Rolf Snethlage	
<b>2.</b>	Risikoziffer II: Eine Einführung . . . . .	17
	Rolf Snethlage	
<b>3.</b>	Risikoziffer III: Was ist Risiko? . . . . .	33
	Rolf Snethlage	
<b>4.</b>	3D-Modellierung von Skulpturen mit Laserscan und die quantitative Erfassung der 3D-Flächenmaße von Verwitterungsphänomenen . . . . .	43
	Carolin Pfeuffer	
<b>5.</b>	Ultraschalldiagnostik - ein essentieller Bestandteil der Berechnung der Risikoziffer . . . .	65
	Wolfram Köhler	
<b>6.</b>	3D-Rauheitsmessungen für das Monitoring von Natursteinoberflächen . . . . .	79
	Wolfram Köhler	
<b>7.</b>	Risikoziffer IV: Ausfüllen der Datenblätter . . . . .	89
	Rolf Snethlage	
<b>8.</b>	Risikoziffer V: Erläuterungen zu den Datenblättern . . . . .	97
	Rolf Snethlage	
<b>9.</b>	Risikoziffer VI: Auswertungen und Vergleiche . . . . .	113
	Rolf Snethlage	
<b>10.</b>	Risikoziffer VII: Ausblick. . . . .	121
	Rolf Snethlage	



## Vorwort

Das Projekt Risikoziffer wirft spontan gleich zwei Fragen auf:

Lässt sich die Essenz einer wortreich geführten Diskussion unter Eigentümer, Denkmalpfleger, Restaurator und Fachgutachter über die Notwendigkeit einer Restaurierungsmaßnahme in einer einzigen Zahl zusammenfassen? Was üblicherweise auf mehreren Seiten unter Würdigung kunsthistorischer Aspekte, der Bewertung der Standortbedingungen und Bemessung von Materialeigenschaften und Oberflächenschäden ausgeführt wird, soll in einer einzigen Zahl ausgedrückt werden können, die noch obendrein objektiv und frei von subjektiven Einstufungen ist?

Was als ein kühnes und nicht ganz ernst zu nehmendes Unterfangen angesehen werden kann, erweist sich bei näherem Hinsehen als nicht so kompliziert lösbar. Lässt man die Eigenschaftswörter Revue passieren, die eingesetzt werden, Zustand und Gefährdungsgrad einer Skulptur im Freien zu beschreiben, so fällt auf, dass diese immer aus Steigerungen nach folgendem Schema zusammengefügt sind: „Kaum gefährdet – in geringem Umfang gefährdet – gefährdet – stark gefährdet – höchst gefährdet“. Für die Risikoziffer braucht nur diese verbale in eine zahlenmäßige Skala umgeformt zu werden, zum Beispiel in eine Skala von Null bis Eins.

Die restauratorischen Stellungnahmen befassen sich mit den eingetretenen Schäden und den Veränderungen der Oberflächeneigenschaften, die mit spezieller Software auf Photos kartiert werden. Da es sich um flächenhafte Eigenschaften handelt, bereitet es keine Probleme, ihre Fläche in Bezug zur Gesamtoberfläche der Skulptur zu setzen, um eine zahlenmäßige Skalierung zu erhalten.

In den materialtechnischen Gutachten werden zahlenmäßige Messwerte zu den relevanten Gesteinseigenschaften referiert, die ebenfalls ganz einfach in eine Skala von Null bis Eins umgewandelt werden können, wenn man die Messwerte auf die Eigenschaften im unverwitterten Zustand normiert.

Selbst die kunsthistorische, denkmalpflegerische Bewertung kann man in einer Zahl darstellen, wenn man sich bezüglich der Bedeutung von Künstler und Objekt sowie der denkmalpflegerischen Werte nach Riegl auf eine zahlenmäßige Skala statt der verbalen Beschreibung einigt. Ein Vorschlag, ausgearbeitet von Frau Dr. Hüneke und Dipl. Rest. Lange, ist im System der Risikoziffer enthalten.

Das messtechnisch schwierigste Problem stellt sich in den Berechnungen der betroffenen Oberflächen dar. Heute verfügbare Programme arbeiten nur zweidimensional und eignen sich für Flächenberechnungen nur bei ebenen Objekten wie Mauern. Die Lösung bestand für das Projekt in der Anwendung des handgeführten 3D T-Laserscans. Auf den 3D Modellen der Skulpturen lassen sich Schäden und Oberflächenveränderungen kartieren und die 3D Flächenanteile berechnen. Mit dieser Methodik hat das Projekt weltweit Neuland für die Restaurierungsplanung beschrritten.

Das Konzept Risikoziffer zeigt, dass kunstgeschichtlich und naturwissenschaftlich orientierte Schadensbewertungen sich nicht unvereinbar gegenüber stehen. Sie gründen auf den genau gleichen logischen Ableitungen, die in unserem universalen Denken verankert sind. Der alles überragende Vorteil der naturwissenschaftlich orientierten zahlenmäßigen Beschreibung von Eigenschaften gegenüber der verbalen Beschreibung ist nämlich der, dass sich mit Zahlen rechnen lässt, dagegen mit Worten nicht. Das zeigt die Risikoziffer, die neue Wege für die Schadensbewertung in der Denkmalpflege und der Restaurierungswissenschaft beschreitet.

Bamberg, im April 2018

Prof. Dr. Rainer Drewello  
Institut für Archäologische Wissenschaften,  
Denkmalwissenschaften und Kunstgeschichte



Rolf Snethlage

# 1. Risikoziffer I: Wege der Entscheidungsfindung in der Denkmalpflege

## Zusammenfassung

Allgemein gibt es verschiedene Methoden, im Privaten wie im öffentlichen Sektor Entscheidungen herbeizuführen. Sie reichen von streng logischen Ansätzen bis zur Propagierung von heuristischen Methoden, die allein auf die Schätzung von Einflüssen basieren, weil man alle Faktoren nie wird klären können. Wirtschaftlich ist die Abschätzung der Kosten-Nutzen-Analyse von großer Bedeutung. In der Denkmalpflege basieren Entscheidungen auf Betrachtungen über den Wert eines Denkmals und vor allem auf dem Riegl'schen Wertekanon. Internationale Prinzipien zur Erhaltung des Kulturerbes sind in verschiedenen Chartas wie der bekannten Charta von Venedig niedergelegt.

## Abstract

In the private and public sector there are several methods to bring about decisions. The methods comprise logical approaches as well as the propagation of heuristic methods in which decisions are made mainly on the basis of appraisals since it is nearly impossible to understand all parameters influencing a decision. In the economic world the cost-profit-assessment is of highest importance. In the case of monuments decisions are frequently made by considering their value according in particular to the value system of Alois Riegl. International principles for the preservation of the cultural heritage are recorded in a series of chartas among which the Venice Charta is the best known.

## 1. Einleitung

Entscheidungen über Konservierungsmaßnahmen an Marmordenkmalen werden im Idealfall in einem intensiven interdisziplinären Diskurs zwischen den betreffenden Fachdisziplinen getroffen. Beteiligt sind die Eigentümer, Denkmalpfleger, Kunst- und Kulturwissenschaftler, Architekten, Gartenarchitekten, Restauratoren, Konservierungswissenschaftler, mitunter Statiker und Finanzfachleute. Jede der Fachdisziplinen trägt ihr spezifisches Fachwissen zu dem endgültigen Erhaltungskonzept bei. Dabei kommen sowohl objektive als auch subjektive Kriterien zur Geltung. Häufig geschieht es aber auch, dass das Feld des verstandesmäßigen Argumentierens verlassen wird und persönliche Vorlieben zum Tragen kommen. Je

mehr letztere das Erhaltungskonzept bestimmen, desto weniger tragfähig und vor allen desto weniger nachvollziehbar wird es künftigen Generationen sein. Rationale Entscheidungen in der Konservierung sind deshalb schon lange ein großes Desiderat.

## 2. Methoden der Entscheidungsfindung

In jedem Entscheidungsprozess laufen bewusst oder unbewusst verschiedene Methoden der Entscheidungsfindung ab. Einige davon sollen im Folgenden kurz abgehandelt werden.

### 2.1 Für und Wider Kolumnen

Benjamin Franklins „Moral and Prudential Algebra“ wird allgemein als das früheste Beispiel für eine Methode angesehen, mit deren Hilfe rationale Entscheidungen getroffen werden können (siehe MARTIGNON 2001). Seinem Freund Jonathan Williams hat er dafür folgende Vorgehensweise empfohlen (FRANKLIN 1779): Man nehme zwei Streifen Papier und liste das Für und Wider einer Entscheidung in einer Kolumne auf; sodann wäge man die Motive für die Fürs und Widers mit positiven und negativen Zahlenwerten und bilde die Summe. Je nachdem, ob die Summe positiv oder negativ ist, entscheide man sich in die betreffende Richtung. Der Nachteil dieser Methode liegt unter anderem darin, dass ein möglicherweise sehr komplexes Problem als lineares Modell abgebildet wird.

Während die Forschung über rationales Entscheiden relativ jung ist, hat der Begriff „rational“ eine lange Geschichte. Er wird in der westlichen Geschichte auf Aristoteles zurückgeführt, welcher die Logik als bestimmendes Werkzeug für rationales Handeln ansieht. 1637 entwickelte Descartes, aufbauend auf den Schriften von Aristoteles, eine Anleitung für rationales Denken, das auf den Gesetzen der Logik basiert. Die Logik kann jedoch Folgerungen und Rückschlüsse nur in einer deterministischen Welt ableiten, in der alle Parameter bestimmbar sind. Aus diesem Grund wurde spätestens im Zeitalter der Aufklärung klar, dass vollständige Bestimmtheit in sich eine Illusion ist (siehe hierzu ASHWORTH 2001).

### 2.2 Kosten – Nutzen – Analyse

Ein Ansatz, zu rationalen Entscheidungen zu gelangen, ist die Kosten – Nutzen – Analyse. Das Individuum bewertet den Nutzen, den ein Produkt für ihn darstellt im Vergleich zu den Kosten, die es verursacht. Ein wichtiges Argument in dieser Analyse stellt der sog. Grenznutzen (marginal Utility) dar. Bei der Entscheidung für ein Produkt werden alle Argumente gesammelt bis weitere Argumente keinen weiteren Zusatzgewinn mehr verursachen. Auf der anderen Seite werden alle Argumente betrachtet, wie viel Geld man für das Produkt ausgeben kann, bis eine Obergrenze erreicht ist. Der Quotient aus Grenznutzen und Grenzkosten wird als „Willingness To Pay“ bezeichnet (ASHWORTH 2001). In der Tat hat man in vielen Experimenten Bewohner gefragt, wie viel sie zur Erhaltung eines Denkmals oder einer Bibliothek privat zu bezahlen bereit wären. Das Ergebnis liefert eine demokratische Aussage über den Wert eines Objekts oder auch eines Denkmals in der Gesellschaft.

Diese Argumentationslinie erscheint uns Denkmalpflegern sehr ungewöhnlich, halten wir doch unser Anliegen der Denkmalpflege als gesellschaftlich fest verankert. Es gibt ja auch handfeste ökonomische Gründe für die Erhaltung der Denkmallandschaft. Tourismus, Bildung und Wohlstand gehen in historischen Städten Hand in Hand. Denkmalpflege als Wirtschaftsfaktor ist längst erkannt. Dennoch erleben Denkmalpfleger täglich, dass finanzielle Einschränkungen die Konservierung einer Skulptur oder die Instandsetzung eines Gebäudes verhindern oder verzögern, weil die Vorstellungen von Investoren eine höhere Priorität besitzen. Auch der Abriss eines alten Gebäudes stellt eine Folge der „Willingness To Pay“ dar; der Grenznutzen des neuen Gebäudes wird höher eingeschätzt als der des alten Gebäudes.

### 2.3 Die heuristische Methode

Die Wege, die für eine rational begründete Entscheidung besritten werden müssen, sind in komplexen Systemen sehr langwierig und unübersichtlich, weil alle Faktoren mehr oder wenige miteinander zusammen hängen. Heuristische Verfahren verwerfen den Anspruch auf Vollständigkeit, um bei komplexen Aufgaben einen Kompromiss zwischen Aufwand und der Güte der Lösung einzugehen. Dazu wird versucht, mithilfe von Schätzungen, „Faustregeln“, intuitiv-intelligentem Raten oder unter zusätzlichen Hilfsannahmen eine gute Lösung zu erzeugen, ohne optimale Eigenschaften zu garantieren. GIGERENZER (2008) betrachtet die heuristische Methodik sogar allen anderen Methoden der Entscheidungsfindung

als überlegen, liefert sie doch in seinen Augen oft die besseren Resultate. In der Tat kann die Suche nach allen Einflussparametern eine Entscheidung so lange hinauszögern, dass sich das Problem mittlerweile von selbst erledigt hat, im Denkmalbereich zum Beispiel durch den Zusammenbruch eines Gebäudes. Gerade in der Denkmalpflege sind heuristische Entscheidungsfindungen häufig verbreitet, vor allem da, wo Experten auf einen breiten Erfahrungsschatz mit ähnlich gelagerten Fällen zurückgreifen können. Dies darf jedoch nicht dazu führen, dass die Suche nach neuen Möglichkeiten von vornherein ausgeschlossen wird. Die heuristische Methodik wird später von Nutzen sein, die Parameter des hier nachfolgend entwickelten Systems Risikoziffer einzugrenzen.

## 3. Entscheidungskriterien in der Denkmalpflege

Entscheidungsprozesse in der Denkmalpflege sind von subjektiven und objektiven Kriterien geprägt. Subjektive Kriterien betreffen den künstlerischen und öffentlichen Wert, der im Laufe der Zeit starken Schwankungen unterworfen sein kann. Kunstströmungen werden emporgehoben und verfallen wieder. Der denkmalpflegerische Ansatz der Bewahrung des Originals in seinem tradierten Zustand hat gegenüber der Idealvorstellung einer Wiederherstellung des „Originals“ erst spät den Vorrang erhalten. Auf der anderen Seite benützt die Denkmalpflege auch objektive und nachvollziehbare Kriterien, beispielsweise bei der Eintragung eines Objekts in die Denkmalliste.

### 3.1 Was ist das Original und was ist dessen Wert

Einen wichtigen Platz im Rahmen von Entscheidungen heute nimmt die Frage ein, ob das zur Diskussion stehende Objekt ein Original, eine Replik oder gar „bloß“ eine Kopie ist. In der römischen Antike war die Verehrung des Originals, wie sie für unsere Zeit typisch ist, noch nicht verbreitet. Rom schmückte sich mit Kopien griechischer Skulpturen, die in Griechenland in eigens für diesen Zweck eingerichteten Werkstätten hergestellt wurden. Es gab einen schwungvollen Handel mit Originalen, Fälschungen und Kopien.

Die traditionellste Definition von Original ist die früheste Form einer Skulptur, eines Gemäldes oder einer Idee. Das Original strahlt aber noch mehr aus als den nüchternen Befund, es sei die Erstausgabe, nämlich das Authentische, Echte, nicht Abgeleitete oder einfach das Beste (siehe KLINE 2001). Hinzu kommt, dass gerade in unserer Zeit das Original und sein Künstler aufs engste miteinander verwoben werden. Ist der Künstler berühmt, steigt der Wert des Originals, wird

ein vermeintliches Original als Werkstattarbeit enttarnt, fällt dessen Wert ins Bodenlose, obwohl sich an den objektiven Gegebenheiten nichts geändert hat. Form, Technik und Ausdruck sind nach wie vor die gleichen. Es scheint wohl so zu sein, dass die Aura des großen Künstlers das Original wie ein Heiligenschein umgibt. Es ist, als würden wir die Nähe des Künstlers spüren und uns emporgehoben fühlen in seine Bekanntheit und in seinen künstlerischen Arbeitsprozess. Letztlich transferieren wir unseren gesteigerten Selbstwert nach außen auf das Original. Als im Mittelalter die Künstler noch namenlos waren, dienten Kunstwerke zur Verehrung Gottes; heute verehren wir im Kunstwerk den Künstler als „Gott“. Unser Verhalten dem Original gegenüber scheint damit seinen Ursprung im Berührungskult zu haben, der in der Reliquienverehrung nach wie vor große Bedeutung hat. Bei der Berührung der Reliquie fließt ein ideeller Teil des Heiligen auf uns über, heilt und erhöht uns.

### 3.2 Internationale Prinzipien der Bewahrung des Kulturerbes

Neben der Charta von Venedig (ICOMOS 1966) ist für Skulpturen in historischen Gärten die Florence Charter die verbindliche Richtschnur (ICOMOS IFLA 1981). In dieser Charta sind Monumente und Skulpturen als unverzichtbare Elemente des lebendigen Organismus Park wie dieser selbst zu bewahren.

Für die Maßnahmen in der Praxis hat sich die Gegenüberstellung von Konservieren - Restaurieren – Renovieren bewährt, die inzwischen auch international anerkannt und befolgt wird. PETZET (1993) hat die Termini in seiner Schrift „Denkmalpflege heute“ erläutert und an Hand von Beispielen deutlich gemacht. Die Prinzipien Konservieren – Restaurieren – Renovieren werden hier als bekannt vorausgesetzt. Als wichtige Alternative oder Ergänzung zu tatsächlichen Maßnahmen kommt die präventive Konservierung hinzu, welche das Umfeld eines Objekts in die Maßnahmen einbezieht (siehe SCHÄDLER-SAUB 2010).

Inhaltlich sind als Grundsätze der Konservierung und Restaurierung für eine Entscheidungsfindung hervorzuheben:

#### 3.2.1 Reversibilität

Das Ziel der Reversibilität ist in den meisten Fällen nicht erreichbar. Es ist auch nicht in der Charta von Venedig ausgesprochen, obwohl das immer wieder gesagt wird. In der Charta von Venedig steht geschrieben, „Wenn traditionelle Techniken sich als ungeeignet erweisen, kann die Konsolidierung eines

Denkmals durch den Gebrauch einer jeden modernen Technik erfolgen, sofern deren Wirksamkeit durch wissenschaftliche Daten nachgewiesen und durch Experiment belegt ist“. Schon aus dieser Formulierung geht hervor, dass sich die Charta von Venedig in erster Linie mit Gebäuden und historischen Stätten befasst und nicht mit der Erhaltung einzelner Denkmäler oder Figuren.

#### 3.2.2 Kompatibilität

Konservierungsmittel und Konservierungsmethoden sollen, weil Reversibilität nicht erreicht werden kann, mit dem Material des zu behandelnden Objekts kompatibel sein, das betrifft auch die Verträglichkeit mit dem äußeren Erscheinungsbild. SASSE & SNETHLAGE haben die Kompatibilität von Konservierungsmethoden mit messbaren Eigenschaften und Grenzwerten für tolerable Abweichungen hinterlegt (siehe TEUTONICO ET AL. 1997). Das Prinzip der Kompatibilität ist auch die Grundlage für die im Leitfaden Steinkonservierung (SNETHLAGE & PFANNER 2013) niedergelegten Richtgrößen.

#### 3.2.3 Sicherstellung künftiger Optionen

Behandlungen, die heute durchgeführt werden, dürfen die Optionen auf künftige Behandlungen nicht einschränken oder diese gar unmöglich machen. Auf diese Forderung hat als erster BRANDI (1963) hingewiesen. Wird die Kompatibilität gewahrt, dann wird der Grundsatz der freien Optionen in der Zukunft auch nicht verletzt.

### 3.3 Das Wertesystem von Riegl

Die Entscheidung, was mit einer Gartenskulptur geschehen soll, gründet sich nicht nur auf „objektive“ Beobachtungen und Zustandsbeschreibungen oder gar Messwerte. So genannte „weiche“ Entscheidungskriterien, die sehr stark von individuellen Empfindungen geprägt sind, spielen eine große Rolle. Sie lassen sich entsprechend der von RIEGL (1903) formulierten Wertekategorien in zwei Hauptgruppen einteilen (siehe auch HUBEL 2006):

- 1) Erinnerungswerte
  - 1.1) Alterswert
  - 1.2) Historischer Wert
- 2) Gegenwartswerte
  - 2.1) Gebrauchswert
  - 2.2) Kunstwert
    - 2.2.1) Neuheitswert
    - 2.2.2) Relativer Kunstwert

## 1. Risikoziffer I: Wege der Entscheidungsfindung in der Denkmalpflege

Für unsere Betrachtungen sind die Erinnerungswerte bei weitem am wichtigsten. Die Riegl'schen Wertekategorien fließen durch das Datenblatt „Kunsthistorische Bewertungen“ mit in die Bewertung der Risikoziffer ein (Die Ausführungen zu den Riegl'schen Wertekategorien sind weitgehend aus HUBEL (2006) übernommen).

Der **Alterswert** gründet sich auf die Spuren zerstörender mechanischer oder chemischer Prozesse. Die Altersspuren vermitteln den Eindruck der verfloßenen Zeit und erwecken die Vorstellung des ewigen Werdens und Vergehens. Der Alterswert verbietet das Eingreifen im Sinne von Erhalten und Bewahren; kein Zustand soll durch Konservieren festgehalten werden und der natürliche Kreislauf nicht gestoppt werden. Der Alterswert und die sich daraus ableitenden Forderungen als absolut genommen erscheinen auf Gartenskulpturen in Reinform nicht anwendbar zu sein. Die bewusste Schaffung einer Ruinenkultur kann nicht das Ziel von Denkmalpflege und Gartenkultur sein.

Der **historische Wert** betont das Denkmal als ein historisches Dokument. Je mehr Informationen über die Epoche seiner Entstehung an dem Denkmal ablesbar sind, desto größer ist sein historischer Wert. Zum Beispiel geben die Attribute Hinweise auf die Identität einer Skulptur; Details von Kleidung oder Schmuck verraten zeitgenössische Moden. Bearbeitungsspuren zeugen von handwerklichen Techniken. Damit eine Skulptur auf künftigen Generationen historische Informationen liefern kann, soll es geschützt und konserviert werden, um den Zeugnischarakter so lang wie möglich aufrecht zu erhalten. Der historische Wert ist deshalb für die Entscheidungsfindung bei der Frage: Konservierung des Originals – Unterschutzstellung des Originals – Herstellung einer Kopie von entscheidender Bedeutung. Bei der Beschlussfassung sind selbstverständlich Fragen nach Ensembleschutz und geeigneter Unterbringung der Originale zu berücksichtigen.

Die **Gegenwartswerte** sind im Gegensatz zu den Erinnerungswerten eher strategischer oder ökonomischer Art und weniger individuell geprägt.

Der **Gebrauchswert** wird durch den Nutzen, den der Eigentümer an seinem Denkmal hat, bestimmt. Gerade in Zeiten von Kostenrechnung und Kommerzialisierung wird eine optimale Nutzung gewünscht. Im Fall von Parksulpturen steigt der Gebrauchswert einer Parkanlage, wenn die Einheit von Natur und

Kunst durch vollständige Skulpturenensembles erlebbar gemacht wird. Der Gebrauchswert verlangt deshalb, dass alle Skulpturen in gutem Zustand erhalten werden, dass fehlende Teile wieder ergänzt werden.

Der **Kunstwert** umfasst die ästhetischen Qualitäten eines Denkmals, die jedoch als immanente Eigenschaften ebenso den Erinnerungswert und den historischen Wert beeinflussen. Der Kunstwert hat im Laufe der Zeit schon öfter Verschiebungen erlebt. So wurden im 19. Jh. viele Kirchen purifiziert, indem barocke Innenausstattungen komplett ausgeräumt wurden.

Im **Neuheitswert** ist die künstlerische Schönheit eines Denkmals angesprochen, die am vollkommensten in Erscheinung treten kann, wenn das Denkmal nicht durch Veränderungen oder die Verwitterung beeinträchtigt ist. Um den Neuheitswert wieder herzustellen, sind Ergänzungen, Rekonstruktionen, Neufassungen von Nöten. RIEGL lehnt den Neuheitswert, welcher den Lauf der Zeit umkehren möchte, jedoch strikt ab.

Der **relative Kunstwert** ist auf den Wandel ästhetischer Maßstäbe im Lauf der Zeit bezogen. Kunstströmungen und künstlerische Leistungen wurden und werden unterschiedlich bewertet und geschätzt. Kunstwerke des Barock wurden im Klassizismus und Historismus verachtet und bedenkenlos zerstört. Bis in die 1970 Jahre galten die Werke des Historismus und des Jugendstils als schwülstig und kitschig. Denkmalpflege heute bedeutet, sich von modischen Strömungen und Auffassungen zu verabschieden und Denkmäler zu erhalten, die gegenwärtig als weniger bedeutsam angesehen werden, es in der Zukunft jedoch werden können.

Fasst man diese Betrachtungen zusammen, so kommt dem historischen Wert bei der Entscheidung, was mit einer Gartenskulptur geschehen soll, die größte Bedeutung zu. Die Argumente, welche im historischen Wert verbunden sind, lassen sich überwiegend rational begründen. Die Bewertungen des Oberflächenzustands können diese Argumente mit qualitativen und quantitativen Messungen untermauern.

## 4. Was ist das kulturelle Erbe – subjektive und objektive Kriterien

Wir alle erleben täglich, dass wir trotz scheinbar besseren Wissens irrational anmutende Entscheidungen treffen. Hier spielen die sog. weichen Faktoren eine

Rolle wie Geneigtheit, Vorliebe, Sympathie, Nutzen u.v.a. Auch im Bereich Denkmalpflege und Konservierung spielen diese weichen Faktoren eine bedeutende Rolle, wenn nicht sogar die Hauptrolle. In seinem Beitrag „What is Cultural Heritage“ zitiert BURMAN (2001) William Morris, der 1877 über ein Gebäude, das es wert sei, erhalten zu werden, schreibt, es müsse „künstlerisch, pittoresk, historisch, antik, reich an Substanz, überhaupt dergestalt sein, dass gebildete Menschen es wert finden, darüber zu diskutieren. Hier sind lauter Kriterien genannt, die sich einer strengen Bemessung entziehen, demgemäß als subjektiv einzustufen sind.

Dennoch gelten auch in der Denkmalpflege wissenschaftlich objektive Kriterien. Ein Objekt, welches in die Denkmalliste eingetragen werden soll, muss bestimmte Kriterien erfüllen. Kirchen sind Ausdruck der christlichen Kultur, Schlösser gestatten uns einen Rückblick in die Geschichte der Herrschenden, manche Gebäude stellen ein Dokument einer Baustilperiode dar, Bauernhäuser sind einzigartige Vertreter eines ländlichen, auf die Nützlichkeit ausgerichteten Baustils, Skulpturen sind als Elemente der Parklandschaft unersetzlich für die Gesamtwirkung des Ensembles. BURMAN (2001) zitiert objektive Werte für ein Denkmalgebäude, die sich thematisch auch auf Skulpturen übertragen ließen:

- Der Gebäuderaum selbst: Größe, Volumen, Anordnung der Räume, Funktionalität
- Dekorative Elemente: Stuckverzierungen, die authentisch für eine Architekturperiode sind
- Wände: Wandmalereien oder Tapetenmalereien auf Papier, Stoff, Leder oder Metall
- Fußböden: Dielenboden oder Parkett
- Ausstattung: Möbel, Gipsfiguren, Bücher, Photographien
- Gemälde: Welche Künstler und deren Wert
- Technische Einrichtungen: Heizung, Wasserversorgung, Gaslampen

Auf Skulpturen übertragen könnte man als objektive Kriterien für deren Wert festhalten:

- Material: Qualität und Provenienz des Marmors bzw. Sandsteins
- Maße und Ausgewogenheit der Figur
- Künstlerische Ausdrucksstärke
- Dekorative Elemente als Dokumente der Mode
- Attribute und deren Bedeutung für die Identifizierung einer Skulptur
- Herstellungstechnik, Bearbeitungsspuren.
- Farbfassungen

Dem lassen sich eher subjektive, kunsthistorische Werte gegenüber stellen, wie sie in der BURRA CHARTER (1981,1988) festgeschrieben sind: „Kulturelle Bedeutung umfasst ästhetische, historische, wissenschaftliche oder soziale Werte für vergangene, gegenwärtige und künftige Generationen“.

- Der ästhetische Wert enthält die Aspekte der sensuellen Erfassung. Dazu gehören Material, Form, Maßstab, Farbe, Textur, aber auch Gerüche und Klänge.
- Der historische Wert umfasst die Entwicklungsgeschichte der Ästhetik, Wissenschaft und Gesellschaft. Ein Denkmal kann einen historischen Wert haben, weil es eine historische Figur, eine Epoche, ein Ereignis oder eine Aktion entscheidend beeinflusst hat oder von ihm beeinflusst wurde.
- Wissenschaftlicher oder Forschungswert hängt ab von der Bedeutung der mit dem Objekt verknüpften Daten, seiner Seltenheit, Qualität oder Repräsentanz für ein bestimmtes Ereignis.
- Der soziale Wert umfasst diejenigen Qualitäten, derentwegen das Objekt oder der Platz zum Gegenstand eines geistigen, politischen, nationalen oder sonstigen kulturellen Empfindung für eine Mehrheit oder Minderheit geworden ist.

Aus der Gegenüberstellung der Argumente wird deutlich, dass sich Material oder Substanz aus zwei Perspektiven betrachten lassen, einer materialkundlichen, auf Maße wie den goldenen Schnitt bezogenen Perspektive und aus der ästhetischen Perspektive, bei der Material, Farbe, Maße in einen sensuellen Kontext gebracht werden.

### 5. Das Denkmal als Produkt

LIPP (2001) entwirft in seiner ökonomischen Theorie des kulturellen Erbes den Gedanken, Denkmälern einen finanziellen Wert beizumessen. Er verfolgt damit das Ziel, Denkmälern in unserer Gesellschaft den ihnen gebührenden Stellenwert zu verschaffen, um breiten Kreisen der Bevölkerung eine Idee der Werte zu vermitteln, die in der gebauten Umwelt vorhanden sind.

Der Wert eines Produkts wird bestimmt durch Angebot und Nachfrage. Immaterielle Werte wie Denkmalwerte existieren nur im Umfeld nicht-ökonomischer Beziehungen, sie stellen Liebhabereien dar, für die man sich nichts kaufen kann. Auf die Festlegung eines Preises kann nur dort verzichtet werden, wenn das Denkmal unverkäuflich ist, wie zum Beispiel die

## 1. Risikoziffer I: Wege der Entscheidungsfindung in der Denkmalpflege

Marmorfiguren im Schlosspark Sanssouci. Das trifft allerdings auf praktisch alle Objekte zu, die in Denkmallisten erfasst sind.

Die Festlegung des Preises kann sich am Markt orientieren, der für Immobilien oder den Kunstmarkt gültig ist. In diesen Preisen sind neben objektiven Kosten für Instandhaltung, Reparatur etc. auch modische Faktoren wie Repräsentation, Life Style, Identifizierung, Verwirklichung, Wirkung enthalten. Harte Faktoren wären Lage, Alter, Nutzfläche, Reparaturanfälligkeit, Vermietungsgewinn. Zu den weichen Faktoren würden Alterswert, Authentizität und Einzigartigkeit gehören.

Um ein Denkmalgebäude zu bewerten, sollte zunächst der Wiederbeschaffungswert (die Kosten für einen Neubau oder komplette Renovierung) ermittelt werden. Die Kosten für seine Instandsetzung wären von diesem Wert abzuziehen. Der Preis für den kulturellen Wert seiner Ausstattung ist zu addieren. Dieser Preis könnte ermittelt werden, indem man auf dem Markt vergleichbare Ausstattungsgegenstände wie Türen, Stuck, Bilder, Möbel etc. sucht und den Preis, den sie in Auktionen erzielt haben, feststellt.

### 6. Schlussfolgerungen

In die Entscheidungsfindung bei einer Restaurierung von Marmor- oder Sandsteinskulpturen fließen viele objektive und subjektive Kriterien ein, wie in den vorangegangenen Ausführungen dargelegt wurde. Aber auch auf den ersten Blick rein subjektive, emotionale Kriterien können mit objektiv rationalen Argumenten unterstützt werden. Kunstgeschichtliche Erwägungen charakterisieren den Wert eines Objekts nach stilistischen, künstlerischen und ikonographischen Gesichtspunkten. Die Bekanntheit des Künstlers oder des Auftraggebers sind von Bedeutung. Die Geschichtswissenschaft untersucht die geschichtliche Aussage und die Erinnerungsfunktion eines Denkmals. Die Denkmalpflege beleuchtet unter anderem den Wert eines Objekts im Ensemble. Original und originaler Standort gehören zusammen. Diese Einheit darf nur bei allergrößter Gefahr für das Denkmal durchbrochen werden. Bei allen Entscheidungen besteht unter Denkmalpflegern der Wunsch nach einem Höchstmaß an objektiven Kriterien.

### 7) Literaturverzeichnis

ASHWORTH GREGORY (2001): Paradigms for Rational Decision-Making in the Preservation of Cultural Property. Group Report. In: N.S. Baer and F. Snickars, eds.: Rational Decision Making in the Preservation

of Cultural Property. p. 277-294. Report of the 86th Dahlem Workshop March 26-31, 2000. Dahlem University Press, Berlin.

BRANDI C (1963) Teoria del restauro. Einaudi Roma. (Theory of restoration. English translation 2005. ICR Rome)

BURMAN, PETER (2001): What is cultural heritage? In: N.S. Baer and F. Snickars, eds.: Rational Decision Making in the Preservation of Cultural Property. p. 11-22. Report of the 86th Dahlem Workshop March 26-31, 2000. Dahlem University Press, Berlin.

BURRA CHARTER (1981, 1988): The Australian ICOMOS Charter for the Conservation of Places of Cultural Significance. Adapted 1979, with revisions in 1981 and 1988. [http://www.icomos.org/docs/burra\\_charter.html](http://www.icomos.org/docs/burra_charter.html).

FRANKLIN BENJAMIN (1779): Letter to Jonathan Williams (Passy, April 8th, 1779). In: A.H. Smyth, ed.: The writings of Benjamin Franklin, vol. VII, S. 281 f. New York 1907.

GIGERENZER, GERD (2008): Bauchentscheidungen. Die Intelligenz des Unbewussten und die Macht der Intuition. Goldmann München.

HUBEL, ACHIM (2006): Denkmalpflege. Geschichte, Themen, Aufgaben. Eine Einführung. Reclam Stuttgart.

ICOMOS (1966): The Venice Charter. International Charter for the conservation and Restoration of Monuments and Sites. Approved by the 2nd International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments Venice 1964

ICOMOS IFLA (1981): Historic Gardens – the Florence Charter. In: M. Petzet: International Principles of Preservation. Monuments and Sites XX, p. 70. Hendrik Bäßler Verlag Berlin 2001.

KLINE, MARY-JO (2001): Value of the Original: What is Value? What is Original? In: N.S. Baer and F. Snickars, eds.: Rational Decision Making in the Preservation of Cultural Property. p. 169-180. Report of the 86th Dahlem Workshop March 26-31, 2000. Dahlem University Press, Berlin.

LIPP, WILFRIED (2001): Monument as Products: Sketches of an Economic Theory of Architectural Heritage.

In: N.S. Baer and F. Snickars, eds.: Rational Decision Making in the Preservation of Cultural Property. p. 197-210. Report of the 86th Dahlem Workshop March 26-31, 2000. Dahlem University Press, Berlin.

MARTIGNON, LAURA F. (2001): Principles of Adaptive Decision-Making. In: N.S. Baer and F. Snickars, eds.: Rational Decision Making in the Preservation of Cultural Property. p. 263-276. Report of the 86th Dahlem Workshop March 26-31, 2000. Dahlem University Press, Berlin.

PETZET, MICHAEL (1993) Denkmalpflege heute. Arbeitsheft 60. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München

RIEGL, ALOIS (1903): Der moderne Denkmalkultus. Sein Wesen und seine Entstehung. In: A. Riegl: Gesammelte Aufsätze. Augsburg, Wien.

SCHÄDLER-SAUB, URSULA (2010): Konservierung, Restaurierung, Instandsetzung. In: D.J. Martin und M. Krauzberger, Hrsg.: Handbuch Denkmalschutz und Denkmalpflege. 3. Auflage. Teil D. Kapitel VI. S. 314. Verlag C. H. Beck, München.

SNETHLAGE, ROLF & PFANNER, MICHAEL (2013): Leitfaden Steinkonservierung. 4. Auflage. Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart.

TEUTONICO JEAN-MARIE, CHAROLA AE, DE WITTE E, GRASSEGGER G, KOESTLER RJ, LAURENZI-TABASSO M, SASSE HR, SNETHLAGE R (1997): Group report: How can we ensure the responsible and effective use of treatments (cleaning, consolidation, protection)? In: Baer N S, Snethlage R (Eds) Saving our architectural heritage: The conservation of historic stone structures: 293-313. J Wiley & Sons Chichester New York



Rolf Snethlage

## 2. Risikoziffer II: Eine Einführung

### Zusammenfassung

Es werden die prinzipiellen Überlegungen dargestellt, welche Anlass gegeben haben, das Modell Risikoziffer zu entwerfen. Die Risikoziffer ist in der Lage, den Zustand und den Gefährdungsgrad einer Skulptur in einer einzigen Zahl abzubilden. Das bisherige Vorgehen besteht darin, Zustand und Gefährdungsgrad verbal zu beschreiben, wobei die verwendeten Begriffe wie „stark, desolat, gravierend“ usw. nicht definiert sind und von den Anwendern subjektiv angewendet werden. Die Risikoziffer entnimmt aus den fachlichen Stellungnahmen die verfügbaren Messwerte und erzeugt aus diesen durch Normierung mit den zum jeweiligen Gestein verfügbaren Messwerten für den unverwitterten Zustand eine einzige Zahl, die Risikoziffer. Deren Größe kann immer nur zwischen Null und Eins variieren. Auf diese Weise können problemlos Objekt miteinander verglichen werden, was auf herkömmliche Weise wieder nur mit unscharfen Beschreibungen möglich wäre.

### Abstract

In this contribution the principle considerations leading to the concept of Risk Number are described. The Risk Number is able to express in one single figure the state and the degree of endangerment of a sculpture. So far, terms such as “strongly”, “serious” or “endangering” describe the state of damage and endangerment. In general linguistic use these adverbs are well understood but they are not clearly defined regarding an objective classification. Consequently, people use them in different subjective ways. The idea of the Risk Number is to replace the verbal terms by numbers scaling from zero to ten. To achieve this, all data concerning the monument available in expert reports have to be transformed into numbers by normalizing them in relation to the data of the stone in fresh state. The size of these scaled numbers ranges between zero and one only. This way the risk numbers of various sculptures can very easily be compared with each other.

### 1. Anlass und Formulierung der Projektziele

Bei der Zustandsbeurteilung von Skulpturen aus Marmor oder Sandstein werden zumeist subjektive

Bewertungen wie „höchst“, „mittel“ oder „gering“ gefährdet verwendet. Die betreffenden Objekte sind deshalb einem hohen, mittleren oder geringem Risiko ausgesetzt, einen irreparablen Schaden zu erleiden. Das von der DBU geförderte Projekt hatte deshalb zum Ziel, die Entscheidungswege von subjektiven Einschätzungen zu befreien und auf nachprüfbar messtechnisch erfasste Grundlagen zu stellen. Endziel des zu entwickelnden einfachen Expertensystems soll eine Risikoziffer sein, mit deren Hilfe man den Gefährdungsgrad einer Skulptur absolut und im Vergleich mit anderen Skulpturen ablesen kann.

Das Projekt beschäftigt sich deshalb mit der Frage, wie ein rational begründeter Entscheidungsprozess beschaffen sein sollte, um aus denkmalpflegerischer und restauratorischer Sicht zu dem bestmöglichen Erhaltungskonzept zu kommen. Es wird also der Versuch unternommen, ein einfaches Expert System zu entwickeln, das ohne die sophistischen Elemente der Expert System Forschung wie komplette Verlinkung aller Problemfelder und Lernfähigkeit auskommt.

Gleichzeitig soll mit einer umfassenden Dokumentation der Untersuchungen und der daraus abgeleiteten Entscheidungen eine Basis für künftige Generationen geschaffen werden, eingetretene Veränderungen im Zustand des betreffenden Denkmals objektiv besser zu erkennen und die möglicherweise erhöhte Bestandsgefährdung beurteilen zu können.

Der Beitrag wendet sich an alle Entscheidungsträger, die bei der Pflege und Erhaltung von Skulpturen beteiligt sind: Kunsthistoriker, Architekten, Naturwissenschaftler, Restauratoren, Verwaltungsfachleute in öffentlichen und privaten Einrichtungen. Diese Personen stehen häufig vor der Frage, welche Figuren in ihren Parkanlagen besonders und welche weniger gefährdet sind, oder welche Skulpturen so gefährdet sind, dass sie nicht weiterhin im Freien aufgestellt bleiben können und in den schützenden Innenraum verbracht werden müssen.

Das in diesem Beitrag entwickelte Bewertungskonzept liefert auf der Grundlage von kunsthistorischen Bewertungen und naturwissenschaftlichen Untersu-

## 2. Risikoziffer II: Eine Einführung

chungen rational begründete Entscheidungshilfen und erlaubt es, eindeutige Prioritäten bei der Behandlung von Skulpturenensembles zu setzen. Dies geschieht mit Hilfe einer einzigen Risikoziffer, in der alle Argumente kunsthistorischer und naturwissenschaftlicher Art zusammengefasst sind.

Die erstmalige Berechnung der Risikoziffer dient als Ersterfassung und schafft die Basis für das künftige Monitoring, mit dem die Zustandsveränderungen erkannt und eine Prognose für das weitere Verhalten nach objektiven Maßstäben abgegeben werden kann. Ausgehend von einer Ersterfassung oder von den Ergebnissen eines Monitoringprogramms kann ein Restaurierungskonzept abgeleitet werden, dessen Erfolg mit Hilfe von objektiven Messwerten beurteilt werden kann.

Ebenso bedeutsam wie die Auswahl der Beurteilungskriterien ist die exakte Dokumentation der Befunde, der Untersuchungsergebnisse und der Begründungen, die für die Entscheidungsfindung zu Grunde gelegt wurden. Diese Dokumente müssen jedoch auch sicher und wieder auffindbar archiviert werden. Nur dann werden die durchgeführten Maßnahmen einen nachhaltigen Erfolg nach sich ziehen.

### 2. Die Risikoziffer: Informationsinhalt und Berechnung

Die Entscheidung über Konservierungsarbeiten an Skulpturen aus Marmor oder Sandstein fällt üblicher Weise in einem Diskurs zwischen Eigentümer, Denkmalpfleger, Restaurator und Fachgutachter, in dem Argumente abgewogen werden und Maßnahmen festgelegt werden. In den mündlichen und schriftlichen Formulierungen der Beteiligten werden über den Erhaltungszustand und den zu erwartenden Schadensfortschritt meist Formulierungen wie diese Skulptur ist „sehr/auf das höchste“ gefährdet, der Marmor ist „gering/mittelgradig/ höchstgradig“ verwittert, die Oberfläche der Skulptur ist „gering/ kaum/ stark“ in Mitleidenschaft gezogen, so dass „wichtige/unersetzliche“ Gestaltungsdetails verloren zu gehen drohen. Diese Wertungen stehen zwar auf der Grundlage exakter Beobachtungen und Messungen, sie sind jedoch höchst beeinflusst vom individuellen Temperament des Sprechers, sich auszudrücken. Darüber hinaus lassen sie sich in dieser Form nicht in einer Entscheidungsmatrix darstellen, weil ihr Gebrauch keiner allgemein anerkannten Richtlinie folgt. Die Folge davon ist, dass die getroffenen Entscheidungen später nicht objektiv nachvollziehbar sind.

Da wäre es doch im Sinne einer besseren Dokumentation – obwohl es zugegebenermaßen zunächst ungewöhnlich erscheint – besser, die zur Beschreibungen der Befunde verwendeten Adverbien in einer Zahlenreihe von 0 bis 10 abzubilden. Mit diesen Zahlen ließe sich sogar eine Entscheidungsmatrix aufstellen, wenn man sich vorab über die Verwendung der Zahlenwerte einigen würde. Auf jeden Fall wäre man mit der Verwendung von Bewertungszahlen sofort auf dem Weg zu einer objektiveren Beurteilungsmethode, die weit weniger von individuell subjektiven Einschätzungen dominiert würden würde.

Diese Voraussetzung bedenkend wurde das Ziel des Projekts formuliert, auf messtechnischer und allgemein verabredeter Grundlage eine Rechenmethode zu entwickeln, den Zustand und den Gefährdungsgrad einer Skulptur im Freien quantitativ und objektiv zu erfassen. Alle an einem Objekt und seiner Umgebung erfassten Beobachtungen und Messwerte sollten zu einer einzigen Zahl, der Risikoziffer, zusammengefasst werden, welche den Zustand und die Erhaltungsperspektive in einem einzigen Zahlenwert vereint. Die einzelnen Parameter sind thematisch in separaten Datenblättern geordnet, wie die folgenden Ausführungen darlegen.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde folgender Weg eingeschlagen, der in etwa dem uns vertrauten Entscheidungsdiskurs entspricht. Alle Berechnungen geschehen auf einfachen Excel Datenblättern, die miteinander verbunden sind, so dass nur die Eintragungen auf dem betreffenden Blatt vorgenommen werden müssen. Die Entscheidung für ein einfaches Excel-basiertes System erfolgte ganz bewusst, um die Bedienung auch jedermann möglich zu machen.

Vor Beginn der Arbeiten wurden 12 Objekte aus Marmor und aus Sandstein ausgewählt, um zu prüfen, ob die Risikoziffer die Anforderungen erfüllen würde (s. Abb. 1).

Die Objekte sind aus Marmor und aus Sandstein. Apoll und Vestalin (beide 1749) von den Neuen Kammern im Park Sanssouci bestehen aus Carrara Marmor, Äolus (1728) im Schlosspark Nymphenburg aus Sterzinger Marmor, die Flora (1723/24) aus Laaser Marmor. Die Skulpturen aus dem Barockgarten Großsedlitz sind aus Elbsandstein Typ Cotta gefertigt. Später wird auf die Eigenschaften dieser Gesteinsart noch detaillierter eingegangen werden. Im Falle der Großsedlitzer Figuren ergab sich die interessante

			
Apoll Neue Kammern Potsdam Sanssouci Photo K. Lange SPSC	Vestalin Neue Kammern Potsdam Sanssouci Photo K. Lange SPSC	Äolus Schlosspark Nymphenburg München Photo SV Bayern	Flora Schlosspark Nymphenburg München Photo SV Bayern
			
Hera/Juno Barockgarten Großsedlitz Photo M. Eilenberger	Hera/Juno Kopie Barockgarten Großsedlitz	Kybele/Rhea Barock- garten Großsedlitz Photo M. Eilenberger	Kybele/Rhea Kopie Barockgarten Großsedlitz
			
Grabmal Siegmund Sulzberger Jüdischer Friedhof Baiersdorf	Grabmal Bernhard Ehrenbacher Jüdischer Friedhof Baiersdorf	Grabmal Nr. 935 Löw Gans Jüdischer Friedhof Baiersdorf	Grabmal Nr. 1091 Jüdischer Friedhof Baiersdorf

Abb. 1: Darstellung der untersuchten Skulpturen und Grabsteine



**Abb. 2:** Satyr Halbrondell vor Neuem Palais Park Sanssouci, Photo K. Lange SPSC

Möglichkeit, die Originalfiguren von Hera/Juno und Kybele/Rhea von 1726 mit deren modernen Kopien von 1951/52 und 1988 vergleichen zu können. Die Grabsteine auf dem Jüdischen Friedhof in Baiersdorf bei Erlangen sind bis auf das Doppelgrab Nr. 1091 (dieses ist aus rotem Buntsandstein) aus Schilfsandstein. Die Grabmäler Bernhard Ehrenbacher und Siegmund Sulzbacher stammen aus den Jahren 1893 bzw. 1913. Die Jahreszahlen der beiden Grabmäler 935 und 1091 sind unbekannt.

Später wurde noch die Figur Satyr vom Halbrondell vor dem Neuen Palais im Park Sanssouci in die Auswertung genommen (s. Abb. 2). Der Satyr wurde bereits bei einer Kampagne der Wissenschaftlergruppe FIDA im Jahr 2013 bearbeitet. Eine 3D Vermessung hat nicht stattgefunden.

### 2.1 Die Datenblätter

Inhalt und Zweck der Datenblätter werden an einem konkreten Beispiel aus dem Projekt, der Schadenserfassung und Berechnung der Risikoziffer der Skulptur der Hera (Original) im Barockgarten Großsedlitz bei Dresden erläutert. Die Figur ist durch Kriegseinwirkungen sichtbar stark geschädigt. Der Kopf ist zwar vorhanden, kann aber wegen eines fehlenden Halsstücks nicht aufgesetzt werden.

- **Datenblatt 1: Objektinformationen**

Am Anfang steht die allgemeine Information zum Objekt mit Angaben über Name der Skulptur, Bildhauer, Alter, Aufstellungsort usw.

- **Datenblatt 2: Kunstwissenschaftliche Bewertung**

Hier werden wichtige Kriterien wie die Bedeutung des Künstlers, die Differenziertheit der Gestaltung, der formcharakteristische Wert und die RIEGL'schen Werte (1903) einer zahlenmäßigen Bewertung unterzogen.

- **Datenblatt 3: Restaurierungsgeschichte**

Einen Sonderfall stellt das Datenblatt „Restaurierungsgeschichte“ dar. Hier ist nicht die Dokumentation der restauratorischen Maßnahmen gemeint, die im Laufe der Zeit über eine Figur hinweggegangen sind. Diese Dokumentationen wurden ja bereits in den Restaurierungsberichten niedergelegt. Stattdessen werden diejenigen Restaurierungsmethoden bewertet, von denen nachweislich ein Risiko für die Integrität einer Skulptur ausgeht. Erwähnt seien hier lediglich Reinigungen mit Säuren, die Verwendung von Zementmörtel oder Füllungen von Fehlstellen mit PE Mörteln.

- **Datenblatt 4: Umwelt Exogene Risikofaktoren**

Die Verwitterungsdynamik einer Skulptur an ihrem Aufstellungsort wird bestimmt durch „Exogene Faktoren“, die sich in den Umweltbedingungen manifestieren. Der Aufstellungsort, das lokale Klima, Frostgefahr oder Niederschlagsmenge zählen zu den exogenen Risikofaktoren.

- **Datenblatt 5 und 6: Naturstein Endogene Risikofaktoren**

Die „endogenen Natursteineigenschaften bestimmen in noch größerem Maße als die exogenen Risikofaktoren den Verlauf der Verwitterung. Auf Grund von Mineralbestand, Gefüge und thermischen wie hygri-schen Dehnungen ist die Verwitterungsdynamik von Gestein zu Gestein unterschiedlich. Datenblatt 5 ist Marmor zugeeignet, Datenblatt 6 dem Sandstein. Für beide Gesteinsarten sind verschiedenen Eigenschaften maßgeblich.

- **Datenblatt 7: Vandalismus**

Als anthropogene bedingter Umweltparameter wird auch die Gefahr betrachtet, die in Form von Vandalismus auf den Bestand einwirkt. Akte der Zerstörung verursachen nicht nur große Schäden, sondern auch hohe Kosten. Mechanische Beschädigungen und Graffiti stellen eine permanente Bedrohung des Bestandes dar.

- **Datenblätter 8, 9, 10 und 11**

Die messtechnischen Methoden zur aktuellen Zustandserfassung einer Skulptur geben einen Einblick in die in der Vergangenheit erfolgten Veränderungen und zeigen, wie weit sich das Gestein von seinem Ausgangszustand entfernt hat. Damit verbunden ist auch ein Blick in die Zukunft. Je mehr sich die Gesteinseigenschaften und der Oberflächenzustand vom Ausgangswert entfernt haben, desto größer ist das Risiko, dass irreparable Schäden entstehen. Die Methoden der aktuellen Zustandserfassung werden in drei Datenblättern zusammengefasst:

- Mechanische Schäden – Materialverlust
- Veränderungen der Oberfläche
- Ultraschalldiagnostik

Die beiden erstgenannten folgen im Wesentlichen dem Schadensglossar von ICOMOS ISCS (2010), werden jedoch durch zusätzlich durch Messwerte objektiviert. Vervollständigt wird der Kanon der Schadensphänomene durch Messungen der Oberflächenrauheit und der Kantenrückwitterung. Beides sind wichtige Indizien für den Schadenszustand einer Skulptur.

Die Ultraschalldiagnostik zielt besonders auf die Schadensbeurteilung von Marmor ab. Sie ist eine wichtige Untersuchungsmethode, da sie als einzige einen Einblick in das Innere einer Skulptur erlaubt.

- **Datenblatt 12: Gesamtbewertung**

Auf diesem Datenblatt werden die Resultate der Datenblätter 2 – 11 zusammengefasst. Es wird die Gesamt-Risikoziffer errechnet, welche die Gefährdung der betreffenden Skulptur als einen Zahlenwert zwischen 0 und 1 darstellt. Die Figur Hera im Barockgaten Großsedlitz, unser Beispiel, hat die Gesamt-Risikoziffer 0,64 (arithmetisches Mittel).

## 2.2 Messmethoden und Rechenschritte

Zwei verschiedene Methoden der Erfassung der Einzelparameter kommen zum Einsatz:

- Messtechnisch bestimmbare Parameter: Als Maß gilt die Veränderung des betreffenden Parameters vom Ausgangswert im frischen Zustand.
- Nur zahlenmäßig erfassbare Parameter: Diese Parameter lassen sich nicht als Veränderung von einem Ausgangszustand beschreiben. Sie liegen als Messwerte vor, der Messwert wird jedoch gemäß einer Übereinkunft eingestuft. Ein Beispiel sind die Niederschlagsmengen, die in vorgegebenen Grenzen mit unterschiedlichen Messwertzahlen belegt werden.

Im Vergleich zu anderen Ansätze zur Risikobewertung (WAENTIG 2014; DELGADO RODRIGUES & GROSSI 2004; 2007; REVEZ 2010) wird in diesem Projekt ein vollkommen neuer Ansatz gewählt, das Risiko, dem eine Skulptur im Freien ausgesetzt ist, zu bewerten.

- **Schritt 1: Erfassung der Messwertziffer M(i) jedes Parameters**

Für jeden Parameter wird eine Messwertziffer M(i) berechnet oder vergeben. Diese gibt an, wie weit sich ein Parameter vom Ausgangszustand vor Einsetzen der Verwitterung entfernt hat, welcher Anteil der Oberfläche von einem Schadensbild betroffen ist oder wie hoch ein Parameter übereinkunftsgemäß eingestuft wird. Die Messwertziffer ist in der allgemeinen Risikobetrachtung vergleichbar mit der Eintrittswahrscheinlichkeit. Durch die Normierung auf den Bezugswert, der am frischen Gestein bestimmt ist, erlangt die Messwertziffer M(i) immer einen Wert zwischen 0 und 1.

- **Schritt 2: Festlegung der Bewertungsziffer B(i) jedes Parameters**

Die Zahl gibt an, wie stark die betreffende Eigenschaft auf den Verwitterungsprozess Einfluss nimmt. Sie ist auf Zahlenwerte zwischen 0 und 10 eingegrenzt. Ein Parameter, der im Verwitterungsprozess intensiv wirksam ist, wird beispielsweise mit 10 bewertet, ein anderer, der weniger verwitterungsrelevant ist, beispielsweise mit 5. Die Bewertungszahlen sind fest vorgegeben und dürfen nicht verändert werden, weil sonst keine Vergleichbarkeit mehr gegeben ist.

- **Schritt 3: Berechnung der Risikoziffer R(i)**

Wie soeben beschrieben, ist die Messwertzahl M(i) immer eine Zahl zwischen 0 und 1, die Bewertungsziffer B(i) immer eine Zahl zwischen 0 und 10. Das Risiko, das von einem Parameter (i) für den Bestand einer Skulptur ausgeht, wird in Form der Risikoziffer ausgedrückt. Sie ist das Produkt von Messwertziffer und Bewertungsziffer:

$$R(i) = M(i) * B(i)$$

Die Risikoziffer R(i) für jeden Einzelparameter ist folgerichtig stets eine Zahl zwischen 0 und 10. 0 bedeutet keinen Einfluss oder nicht bestimmt, 10 bedeutet maximalen Einfluss auf den Schadensprozess. Die Berechnung der Risikoziffer R(i) für die zutreffenden Parameter ist der erste Rechenschritt.

## 2. Risikoziffer II: Eine Einführung

Die einzelnen Parameter (i) sind gemäß ihrer Eigenschaften in den oben gezeigten Datenblättern 1 bis 12 zusammengefasst:

1. Objektbeschreibung
2. Kunstwissenschaftliche Bewertung B(KB)
3. Restaurierungsgeschichte R(RGS)
4. Umwelt Exogenen Risikofaktoren R(U)
5. Naturstein Endogene Risikofaktoren R(N) für Marmor
6. Naturstein Endogene Risikofaktoren R(N) für Sandstein
7. Gefahr durch Menschen Vandalismus R(V)
8. Mechanische Schäden Materialverlust R(M)
9. Veränderungen der Oberfläche R(OF)
10. Ultraschalldiagnostik R(US) I
11. Ultraschalldiagnostik R(US) II
12. Gesamtbewertung R(ges)

Wie eingangs erwähnt, dient das Datenblatt 1 nur der Objektbeschreibung und wird nicht in die Berechnung der Risikoziffer R(ges) einbezogen. Datenblatt 2: Kunstwissenschaftliche Bewertung B(KB) besitzt eine Sonderfunktion, auf die später eingegangen wird. Zur Berechnung der Risikoziffer dienen nur die Datenblätter 3 bis 11. Das Resultat wird auf Datenblatt 12 dargestellt. Die Berechnung der Teilrisiken wird wie folgt vorgenommen.

Im zweiten Rechenschritt wird für jedes Datenblatt ein Teilrisiko R(RGS), R(U), R(N), R(V), R(M), R(OF) und R(US) berechnet. Dazu werden zunächst alle Risikoziffern R(i), so wie sie nach obiger Formel berechnet wurden, addiert. Diese Summe wird dann durch das maximal mögliche Risiko geteilt, das ist diejenige Risikoziffer des Datenblattes, die sich dann ergäbe, wenn alle individuellen Messwertzahlen R(i) den Wert 1 hätten. Als Folge dieser Normierung resultiert für jedes Datenblatt eine Teil-Risikoziffer R(i), die einen Wert zwischen 0 und 1 besitzt.

Im letzten Datenblatt, der Gesamtbewertung, werden die Teilrisiken zur Gesamt-Risikoziffer R(ges) zusammengefasst. Dazu werden die Teilrisiken aller Datenblätter (7 an der Zahl weil 5 oder 6 gemäß der Gesteinsart alternativ verwendet werden) summiert und der Mittelwert gebildet:

$$R(\text{ges}) = [R(\text{RGS}) + R(\text{U}) + R(\text{N}) + R(\text{V}) + R(\text{M}) + R(\text{OF}) + R(\text{US})] / 7 = < 1.$$

Wegen der Mittelwertbildung ist auch die Gesamt-Risikoziffer R(ges) eine Zahl zwischen 0 und 1. Eine 0 bedeutet kein Risiko, eine 1 sehr hohes Risiko. Durch diese Normierung erhält man sofort und einfach eine

Information über den Risikograd der zur Diskussion stehenden Skulptur. Diese Zahl ist durch objektive und quantitative Messungen ermittelt und damit frei von jeglicher subjektiver Einschätzung. Sie eignet sich hervorragend als Entscheidungshilfe, insbesondere für ein Ranking innerhalb eines Skulpturenkollektivs. Sie zeigt in Verbindung mit den Teilrisiken auch an, an welchen Stellen einer Skulptur besondere Risiken bestehen.

Die kunstwissenschaftliche Bewertung B(i) kann nun dazu verwendet werden, die Rangfolge zwischen Skulpturen, die sich hinsichtlich der Gesamt-Risikoziffer nur unwesentlich unterscheiden, weiter zu verfeinern. Dazu wird R(ges) mit B(i) multipliziert:

$$R(\text{ges}; \text{gewichtet}) = R(\text{ges}) * B(\text{KB}).$$

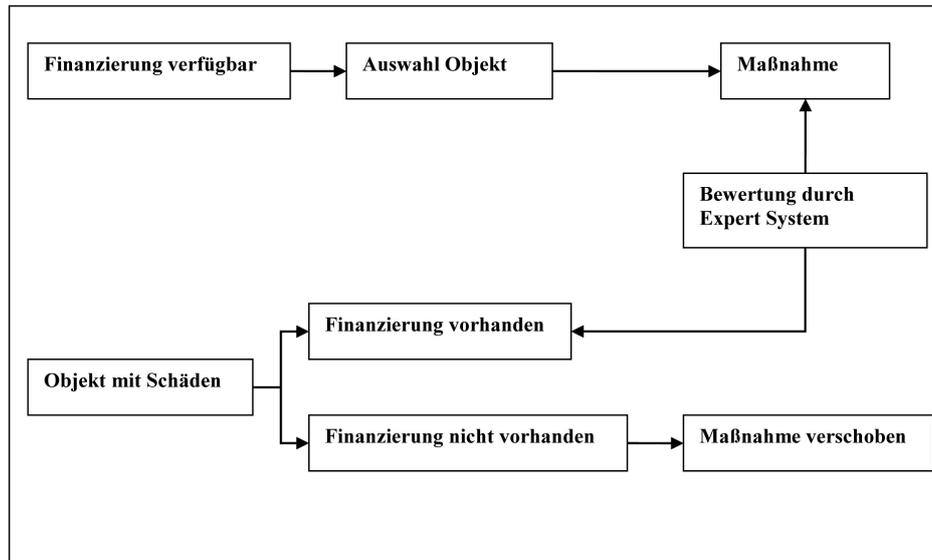
Besitzt eine Skulptur eine höhere Zahl B(KB) als eine andere, so rückt sie in der Reihenfolge nach vorn und wird bei einer Maßnahmenkampagne bevorzugt eingeordnet.

Neben dem arithmetischen Mittel bietet sich auch die Verwendung des quadratischen Mittels für die Berechnung der Gesamt-Risikoziffer an. Bei dieser Berechnung werden die größeren Werte stärker gewichtet. Eine Skulptur erscheint beim quadratischen Mittel etwas stärker gefährdet als beim arithmetischen Mittel. Die Aussagekraft beider Rechenmethoden ist aber die gleiche. In der vorliegenden Untersuchung ist immer nur das arithmetische Mittel betrachtet worden.

Besonders für die praktische Anwendung ist die Spalte mit Angaben zu den Höchststrisiken gedacht. Als Höchststrisiko wird eine Risikoziffer R(i) > 0,75 gewertet. Das bedeutet, dass der zugehörige Parameter sich sehr weit vom Idealwert im frischen Gesteinszustand entfernt hat. Diese Information kann genutzt werden, gezielte Gegenmaßnahmen einzuleiten. Genaue Informationen zu den Datenblättern und deren Inhalte sind in den Aufsätzen „Datenblätter Ausfüllen“ und „Datenblätter Erläuterungen“ zu finden.

### 3. Maßnahmenplanung gemäß Finanzierung

Ob ein gefährdetes Objekt tatsächlich die Konservierung erhalten kann, die es für seine Erhaltung benötigt, hängt von der Finanzierung ab. Trotz größter Schäden verzögern sich die Maßnahmen oft über Gebühr, besonders dann, wenn der Eigentümer nicht liquide oder desinteressiert ist. Die Risikoziffer kann in solchen Fällen als Argumentationshilfe eingesetzt werden, selbst wenn sie keine Wunder bewirken



**Abb. 3:** Entscheidungswege, die zu einer Maßnahme führen. Die Maßnahme unterbleibt, wenn keine Finanzierung vorhanden ist.

kann. Das Ablaufschema zeigt die möglichen Entscheidungswege.

#### 4. Zusammenfassung

Es erscheint auf den ersten Blick wagemutig und überzogen, das Risiko, dem ein Bildwerk aus Marmor oder Sandstein in der freien Umgebung unter Berücksichtigung seines Zustands ausgesetzt ist, mit einer einzigen Ziffer zu bewerten und darauf Entscheidungen aufzubauen. Betrachtet man aber den Entscheidungsprozess, der bei allen Restaurierungsprojekten durchlaufen wird, so wird man feststellen, dass alle Parameter, die in dem System „Risikoziffer“ enthalten sind, in den Planungsgesprächen ebenfalls abgehandelt werden, die meisten davon aber nur auf der rein deskriptiven Ebene. Warum sollte es dann nicht möglich sein, diese rein beschreibende Bewertung mit Hilfe exakter messtechnischer Bezüge in Zahlenwerte zu verwandeln, die eine zusammenfassende Risikobewertung gestatten? Bei der Risikoziffer passiert also letztendlich auch nichts anderes als in den üblichen Planungsgesprächen, nur eben in Form von Zahlen und nicht in Worten.

Das System Risikoziffer ist auch für ein Langzeitmonitoring geeignet. Würde man heute verbal argumentieren, dass sich der Zustand der Oberfläche stark verschlechtert hat und die Ultraschallgeschwindigkeit beträchtlich abgenommen hat, so kann man nun mit Hilfe der Risikoziffer  $R(US)$  exakt angeben, dass das Risiko für das betreffende Objekt, irreparable Schäden zu erleiden, zum Beispiel von  $R(US) = 0,5$  auf

$RZ = 0,75$  zugenommen hat und dass die Zeit zum Handeln gekommen ist.

Hat eine Organisation, die ein großes Ensemble zu betreuen hat, erst einmal für alle Skulpturen eine Risikoziffer ermitteln lassen, dann kann sie auf dieser Grundlage genauer und besser entscheiden, welche Skulpturen mehr gefährdet sind als andere und welche deshalb bevorzugt behandelt werden müssen.

Das hier aufgestellte Expert System Risikoziffer ist sicher noch nicht perfekt. Zu seiner Verbesserung ist vor allem die Erprobung in der Praxis an noch mehr Beispielen erforderlich.

Die Zahlen zu den Höchst Risiken geben aber schon jetzt präzise an, an welchen Stellen konservatorisch eingegriffen werden muss. Auch die schwierigste Frage, ob eine Skulptur weiterhin im Freien stehen bleiben darf oder in ein schützendes Depot gebracht werden muss, kann in Kombination von Risikoziffer und Art der Höchst Risiken beantwortet werden.

#### 11 Literaturverzeichnis

DELGADO RODRIGUES JOSE & GROSSI A (2007). Indicators and Ratings for the Compatibility Assessment of Conservation Actions. *Journal of Cultural Heritage*, 8, 32-43. doi: doi:101016/j.culher.2006.04.007

REVEZ MARIA JOAO (2016): Calculated Risk. The (In) compatibility of Built Heritage Cleaning Methods. Dissertation Faculty of Chemistry and Technology New University of Lisbon

## 2. Risikoziffer II: Eine Einführung

RIEGL, ALOIS (1903): Der moderne Denkmalkultus. Sein Wesen und seine Entstehung. In: A. Riegl: Gesammelte Aufsätze. Augsburg, Wien.

WAENTIG FRIEDERIKE, DROPMANN MELANIE, KONOLD KARIN, SPIEGEL ELISE, WENZEL CHRISTOPH (2014): Präventive Konservierung. Ein Leitfaden. ICOM Deutschland - Beiträge zur Museologie Band 5. 96 Seiten.

Hera / Juno Schlossgarten Großsedlitz frei		
Objekt	Spalte für Eintrag	Anmerkung
Name	Hera Juno	Original
Sammlungsnummer	Großsedlitz Nr 73	
Name des Objekts	Rhea / Kybele	
Art des Objekts	Parkfigur	
Bildhauer	Johann Christian Kirchner	
Entwerfer	dsgl	
Erschaffungsjahr	um 1726	
Aufstellungsjahr	um 1726	
Aufstellungsort original	Schlosspark Großsedlitz	
Aufstellungsort jetzt / Jahr	Schlosspark Großsedlitz	
Steinmaterial	Cottaer Sandstein	
Steinfabe	beige	
Objekthöhe	ca 220 cm	
Objektbreite	ca 80 cm	
Objekttiefe	keine Angabe	



Datenblatt 1: Objektinformation

Hera / Juno Original		
Kunstwissenschaftliche Bewertung KB	B(i)	Anmerkungen
Bedeutung des Künstlers	7	
Künstlerischer Wert	7	
Originärer Wert	10	
Formcharakteristischer Wert Original	8	
Formcharakteristischer Wert Kopie	0	
Oberfläche Bearbeitung	8	
Materialspezifischer Wert	6	
Zustand. Erhaltungswert	10	
Alterswert nach Riegl	8	
Historischer Wert nach Riegl	8	
Gebrauchswert nach Riegl	4	
Kunstwert nach Riegl	8	
Ensemblewert	10	
Kunstwissenschaftliche Bewertung B(KB)		
$B(KB) = \text{Summe } B(i) / n * B(\text{max})$	0,78	
Erläuterungen		
siehe Drop Down Menu in Spalte B(i)		
n = Anzahl der bewerteten Felder		
B(max) = 10 für jedes bewertete Feld		

Datenblatt 2: Kunstwissenschaftliche Bewertung

## 2. Risikoziffer II: Eine Einführung

Hera / Juno Original								
Restaurierungsgeschichte (RGS)								
Jahr	Dokumentation	Maßnahme	Messwertzahl M(i)	Bewertungszahl (Bi) Methode	Bewertungszahl B(i) wenn - dann	Risiko R(i) = M(i) * B(i)	Anzahl Hochrisiken	Anmerkungen
2016/2017	ja	Reinigung	0,8	5	5	4	1	
		Vierungen aus Stein	0	3	0	0	0	nicht durchgeführt
2016/2017	ja	Ergänzung aus Mörtel	1	2	2	2	1	
2016/2017	ja	Rissfüllungen	1	2	2	2	1	
2016/2017	ja	Festigung	1	2	2	2	1	
2016/2017	ja	Farbfassung	0	0	0	0	0	nur minimale Spuren von Leinölfassung. Keine Neufassung.
		Hydrophobierung	0	0	0	0	0	nicht durchgeführt
2016/2017	Ja	Vernadelungen Dübel	1	10	10	10	1	
		Schutzschlämme	0	0	0	0	0	nicht durchgeführt
		Antigrffiti	0	0	0	0	0	nicht durchgeführt
		AVT	0	0	0	0	0	nicht durchgeführt
2016/2017	ja	Entsorgung	0,5	5	5	2,5	0	
		Gipsumwandlung	0	0	0	0	0	
		Summe R(i) und B(i)		29	26	22,5	5	
					26			
	Risikoziffer Restaurierungsgeschichte	R(RGS) = Summe R(i) / Summe B (i)				0,87		
			B(max)	130				

Datenblatt 3: Restaurierungsgeschichte

Hera / Juno Original						
Umwelt Exogene Risikofaktoren (U)						
	Messwertzahl M (i)	Bewertungszahl B(i)	Risiko R(i) = M(i) * B(i)	Anzahl Hochrisiken	Anmerkungen	
Aufstellungsort	1	10	10	1		
Niederschlag mm/Jahr	0,5	10	5	0		
Frostgefahr	0,7	10	7	0		
Nebel, Kondensation, Aerosol	0,5	6	3	0		
Trocknungsbedingungen	0,5	10	5	0		
Besondere Belastungen	0	10	0	0		
Schadgas Immission NOx [I(gem) - I(o)] / I(gem) µg/m3	0,4	10	4	0		
Feinstaub Immission PM10 [I(gem) - I(o)] / I(gem) µg/m3	[I(gem) - I(o)] / I(gem)	10	5,5	0		
Schadgas Immission SO2 [I(gem) - I(o)] / I(gem) µg/m3	0	10	0	0		
Summe R(i) und B(i)		86	39,5	1		
Winterschutz	0,5					
Risikoziffer Umwelt						
R(U) = Summe R(i) / Summe B(i)			0,23			
*Messwertzahl Winterschutz						

Datenblatt 4: Umwelt/Exogene Risikofaktoren

## 2. Risikoziffer II: Eine Einführung

Hera / Juno Original							
Naturstein Endogene Risikofaktoren (N)							
Sandstein							
	Auswahlkriterien M(i)	M(i)	B(i) Vorgabe	B(i) wenn - dann	Risiko R(i) = M(i) * B(i)	Anzahl Hochrisiken	Anmerkungen
Modalbestand	Chlorit + Illit	1	10	10	10	1	
	Kaolinit	1	10	10	10	1	
	Cc + Do	0	10	0	0	0	
				0	0	0	
W-Wert kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> (Mittelwert)	W(i) - W(o) / W(i)	0	10	0	0	0	Literaturwert für W(o) = 2,0 (Wendler (2007). Messwert W(i) = 0,60 - 0,67 kg/m <sup>2</sup> * h <sup>0,5</sup> . Nicht auswertbar
Q-Wert kg/m <sup>2</sup> h (Mittelwert)	Q(i) - Q(o) / Q(i)	0	10	0	0	0	
						0	
Kornform	Mikroskopbild	1	8	8	8	1	
						0	
Kornbindung	Mikroskopbild	0,5	10	10	5	0	
						0	
Textur	visueller Befund	1	5	5	5	1	
						0	
Risiko durch hygrische Dehnung	Aufstellungsort bewerten	1	10	10	10	1	
						0	
Optional wenn Probenahme möglich oder Literaturdaten verfügbar				0	0	0	
						0	
Porosität Vol.-% (Mittelwert aus Literaturdaten)	Messung	1	10	10	10	1	Grunert (2007). P = 22,81%
						0	
S-Wert (Mittelwert aus Literaturdaten)	Messung	0,5	10	10	10	0	Grunert (2007). S = 0,7
						0	
Feuchtedehnung H <sub>2</sub> O ges. (Mittelwert aus Literaturdaten)	Messung	0,4	10	10	4	0	
						0	
Druckfestigkeit DF Mpa	DF(i) - DF(o)  / DF(i)	0	6	0	0	0	nicht ermittelt
Biegezugfestigkeit BZF Mpa	BZF(i) - BZF(o)  / BZF(i)	0	8	0	0	0	nicht ermittelt
			127	83	72	6	
	Summe R(i) und Summe B(i)						
							Bewertungszahl B(i)= 0: kein Risiko
							Bewertungszahl B(i) = 10: max. Risiko
							Istwert X(i)
							Unverwittert X(o)
					0,87		
	Risikoziffer Naturstein						
	R(N) = Summe R(i)/Summe B(i)						

Datenblatt 5 und 6: Naturstein/Endogene Risikofaktoren

Hera / Juno Original							
Gefahr durch den Menschen (V)							
	Auswahlkriterien M(i)	Messwertzahl	Bewertungszahl	Risiko	Anzahl Hochrisiken	Anmerkungen	
	Gefahreinschätzung	M(i)	B(i)	R(i) = M(i) * B(i)			
Vandalismus	Gefahreinschätzung	1	10	10	1		
				0	0		
Graffiti	Gefahreinschätzung	1	10	10	1		
Summe R(i) und B(i)			20	20	2		
Risikoziffer R (V) Gefahr durch Menschen							
R(V) = Summe R(i) / Summe B(i)				1,00			

Datenblatt 7: Gefahr durch Menschen/Vandalismus

## 2. Risikoziffer II: Eine Einführung

Hera / Juno Original						
Mechanische Schäden	Materialverlust M	Messwertzahl	Bewertungszahl	Risiko	Anzahl Hochrisiken	Anmerkung
	Auswahlkriterien M(i)	M(i)	B(i)	$R(i) = M(i) * B(i)$	Verlustumfang	
Risstyp Craquele	flächenhafte Verteilung	0	10	0	0	
Risstyp Haarriss	Art und Anzahl	1	10	10	1	
Risstyp Trennschnitt						
	CorpusAusmaß	1	10	10	1	
	Arme/HandBruchgefahr	1	10	10	1	
	Bein/Beine Bruchgefahr	1	10	10	1	
	Standicherheit	1	10	10	1	
	HalsBruchgefahr	1	10	10	1	
	KopfBruchgefahr	1	10	10	1	
	FingerBruchgefahr	1	10	10	1	
	Zehen/FußBruchgefahr	1	10	10	1	
	NaseBruchgefahr	1	10	10	1	
	AttributeVerlustgefahr	1	10	10	1	
Figur fehlende Teile						
	KopfVerlust eingetreten ja	1	10	10	1	Kopf abgebrochen. Hals fehlt.
	Arm Verlust eingetreten ja	1	10	10	1	Linker und rechter Unterarm fehlen
	Bein/BeineVerlust eingetreten nein	0	10	0	0	Anzahl Beine
	Hand/HändeVerlust eingetreten ja	1	10	10	1	beide Hände fehlen
	FingerVerlust eingetreten ja	1	10	10	1	allen Finger fehlen
	NaseVerlust eingetreten ja	1	10	10	1	Nase fehlt
	ZehenVerlust eingetreten ja	1	10	10	1	3 Zehen am rechten Fuß fehlen
	SonstigeVerlust eingetreten ja	1	10	10	1	Teile des Schleiers abgebrochen
	SonstigeVerlust eingetreten ja	1	10	10	1	Einschlag im Rücken
Attribute fehlende Teile						
	WaffenVerlust eingetreten nein	0	0	0	0	
	SymbolVerlust eingetreten ja	1	10	10	1	der Pfau der Hera fehlt vollständig
	Attribute fehlende TeileVerlust eingetreten ja	1	10	10	1	Zeppter verloren
Summe R(i) und B(i)			220	200	20	
Risikoziffer Materialverlust R(M)				0,91		
$R(M) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$						
Verlustumfang					0,91	

Datenblatt 8: Mechanische Schäden/Materialverlust

## 2. Risikoziffer II: Eine Einführung

Hera / Juno Original								
Veränderung der Oberfläche OF								
	Auswahlkriterien M(i)	Oberflächenanteil	Messwertzahl M(i)	Bewertungszahl B(i)	Bewertungszahl B(i) wenn - dann	Risiko R(i) = M(i) * B(i)	Anzahl Hochrisiken	Anmerkungen
Ablagerungen Farbveränderungen								
	Ablagerungen	OF(i)/OF(ges)	0	4	0,00	0	0	
	schwarze Krusten	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0	
	Versinterungen	OF(i)/OF(ges)	0	4	0,00	0	0	
	Verfärbungen, Rostflecken	OF(i)/OF(ges)	0	4	0,00	0	0	
	Ausblühungen	OF(i)/OF(ges)	0	6	0,00	0	0	
					0,00	0	0	
Materialverlust durch chem phys Prozesse								
	Relief	OF(i)/OF(ges)	0	8	0,00	0	0	
	Rückwitterung	OF(i)/OF(ges)	0	8	0,00	0	0	
	Kreiden, Abmehlen	OF(i)/OF(ges)	0	6	0,00	0	0	
	Absanden	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0	
	Zuckerkörniger Zerfall	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0	
	Schuppen	OF(i)/OF(ges)	0	8	0,00	0	0	
	Schalenbildung	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0	
	Schichtspaltung Aufblättern	OF(i)/OF(ges)	0,09	10	10,00	0,9	0	
	Ausbruch Rostsprengung	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0	
	Abscherben Absplittern	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0	
	Alveolen	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0	
					0,00	0	0	
Erosion: Materialverlust durch chem Lösungsvorgänge								
	Rauheit					0,00	0	0
		P Zahl > 7000F(i)/OF(ges)	0,5	0,56	0,56	0,28		
		P Zahl 700 - 5000F(i)/OF(ges)	0,25	0,16	0,16	0,04		
		P Zahl 500 - 3000F(i)/OF(ges)	0,25	0,28	0,28	0,07	0	
		P Zahl 300 - 1000F(i)/OF(ges)	0	8	0,00	0	0	
		P Zahl < 1000F(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0	
					0,00	0	0	
	Kantenrückwitterung/Aufplatzen	mm	1	10	10,00	10	1	
	Differentielle Erosion ("Zellulitis")	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0	
	Mikrokarst	OF(i)/OF(ges)	0	6	0,00	0	0	
	Pitting Grube	OF(i)/OF(ges)	0	6	0,00	0	0	
					0,00	0	0	
Biologische Besiedelung								
	Algen Flechten Pilze Moose	OF(i)/OF(ges)	0,16	8	8,00	1,28	1	
	Höhere Pflanzen	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0	
Originaloberfläche								
	keine Veränderungen	OF(i)/OF(ges)	0,75					
Summe R(i) und B(i)					197,00	29,00	12,57	2
Risikoziffer Veränderung der Oberfläche R(OF)								
R(OF) = Summe R(i) / Summe B(i)						0,43		

Datenblatt 9: Veränderungen der Oberfläche

Hera / Juno Original									
Ultraschalldiagnostik									
Berechnung US Risikoziffer									
Berechnung der US Geschwindigkeiten									
Spalte C bis E die Messwerte eintragen									
Messort	Messpunkt	Messweg (cm)	Laufzeit (µs)	US(km/s)	Messwertzahl M(i)	Bewertungszahl B(i)	Risiko R(US(i)) = M(i) * B(i)	Anzahl Hochrisiken	Anmerkungen
rechts-links	1	0,00	0,000					0,00	0,00
vorne-hinten	2	0,00	0,000					0,00	0,00
rechts-links	3	0,00	0,000					0,00	0,00
vorne-hinten	4	0,00	0,000					0,00	0,00
rechts-links	5	34,00	121,050	2,81	0,22	10	2,20	0,00	
vorne-hinten	6	26,00	86,040	3,02	0,16	10	1,61	0,00	
vorne-hinten	7	12,30	40,300	3,05	0,15	10	1,52	0,00	
rechts-links	8	10,90	34,390	3,17	0,12	10	1,20	0,00	
vorne-hinten	9	9,10	33,820	2,69	0,25	10	2,53	0,00	
rechts-links	10	0,00	0,000		0,00		0,00	0,00	
rechts-links	11	38,20	123,540	3,09	0,14	10	1,41	0,00	
vorne-hinten	12	33,80	109,760	3,08	0,14	10	1,45	0,00	
rechts-links	13	16,60	54,100	3,07	0,15	10	1,48	0,00	
vorne-hinten	14	31,60	105,940	2,98	0,17	10	1,71	0,00	
rechts-links	15	13,30	42,810	3,11	0,14	10	1,37	0,00	
vorne-hinten	16	13,70	46,250	2,96	0,18	10	1,77	0,00	
rechts-links	17	22,60	72,080	3,14	0,13	10	1,29	0,00	
vorne-hinten	18	36,00	114,350	3,15	0,13	10	1,25	0,00	
rechts-links	19	14,70	45,870	3,20	0,11	10	1,10	0,00	
vorne-hinten	20	12,20	39,940	3,05	0,15	10	1,52	0,00	
rechts-links	21	9,30	29,420	3,16	0,12	10	1,22	0,00	
rechts-links	22	9,10	36,880	2,47	0,31	10	3,15	0,00	
rechts-links	23	80,90	249,850	3,24	0,10	10	1,01	0,00	
vorne-hinten	24	57,40	195,510	2,94	0,18	10	1,84	0,00	
freie Wahl	25								
Summe R(i) und B(i)						190	30,61	0,00	
Mittelwert				3,02					
Maximalwert				3,24	Risikoziffer Ultraschallgeschwindigkeit R(US)				
Minimalwert				2,47	R(US) = Summe R(US(i)) / Summe B(i)				
						0,16			

Datenblatt 10: Ultraschalldiagnostik Teil 1

2. Risikoziffer II: Eine Einführung

Hera / Juno Original		Messpunkt	US(km/s)	Messpunkt	US (km/s) aufsteigend
			1	22	2,47
Ultraschalldiagnostik			2	9	2,69
			3	5	2,81
Ultraschallgeschwindigkeit aufsteigend			4	16	2,96
			5	14	2,98
Ultraschallgeschwindigkeit nach Klassen			6	6	3,02
			7	7	3,05
			8	20	3,05
Klasse (km/s)	Anzahl		9	13	3,07
	2	0	10	12	3,08
	3	5	11	11	3,09
	4	13	12	15	3,11
	5	0	13	17	3,14
	6	0	14	18	3,15
größer 6		0	15	21	3,16
			16	8	3,17
			17	19	3,20
			18	23	3,24
			19		
			20		
			21		
			22		
			23		
			24		
			25		

Datenblatt 11: Ultraschalldiagnostik Teil 2

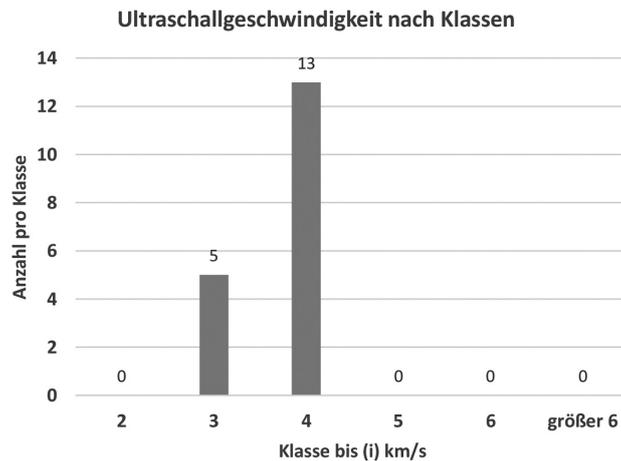


Diagramm zu Datenblatt 11: Ultraschalldiagnostik Teil 2

Hera / Juno Original frei					
<b>Gesamtbewertung</b>		arithmetisches Mittel	quadratisches Mittel		
Objektbeschreibung B(O)	wird nicht bewertet				
Kunsthistorische Bewertung B(KB)	$B(KB) = \text{Summe } B(i) / n \cdot B(i) \text{ max}$	0,78	0,78		
Restaurierungsgeschichte	$R(RGS) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,87	0,748890533		
Umwelt	$R(U) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,23	0,052739657		
Naturstein Marmor	$R(N-M) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,00	0		
Naturstein Sandstein	$R(N-S) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,87	0,752503992		
Vandalismus	$R(V) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	1,00	1		
Materialverlust	$R(M) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,91	0,826446281		
Veränderung der Oberfläche	$R(OF) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,43	0,187877408		
Ultraschalldiagnostik	$R(US) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$	0,16	0,025956786		
Summe R(RGS) bis R(US)		4,47	3,59		
<b>Berechnung der Gesamt-Risikoziffer</b>	arithmetisches Mittel			Anzahl Hochrisiken	
$R(\text{ges}) = \text{Summe } R(i) / n = R(RGS) + R(U) + R(N-M) + R(N-S) + R(V) + R(M) + R(OF) + R(US) / 7 =$		7,00		$R(i) > 0,75$	Tabellenblatt
$R(\text{ges}) =$		0,64			5Restaurierung
					1Klima
					6Naturstein
<b>Gewichtung durch kunstwissenschaftliche Bewertung K(B)</b>					2Vandalismus
$R(\text{ges gewichtet}) = R(\text{ges}) \cdot B(KB)$	$R(\text{ges})$	0,64			20Materialverlust
	$B(KB)$	0,78			2Oberfläche
	$R(\text{ges gewichtet})$	0,50			0Ultraschall
			Summe $R(i) > 0,75$		36
<b>Berechnung der Gesamt-Risikoziffer quadratisches Mittel</b>					
	$SQR R(i)$		0,72		
	$B(KB)$		0,78		
	$R(\text{ges gewichtet})$		0,56		

Datenblatt 12: Gesamtbewertung



Rolf Snethlage

### 3. Risikoziffer III: Was ist Risiko?

#### Zusammenfassung

Der Begriff „Risiko“ wird im normalen Sprachgebrauch zu häufig und unpräzise verwendet. Risiko ist ein Begriff aus dem Versicherungswesen und beschreibt dort ein finanzielles Risiko. Die Risikoziffer im Bereich der Restaurierung von Skulpturen lässt sich mit dem Allgemeinbegriff in Einklang bringen. Der drohende Verlust von ideellen und realen Werten wird in einer Zahl zum Ausdruck gebracht. Bekannte Risikoberechnung mit Risikotabellen werden präsentiert. Auf ähnliche quantitative Ansätze zur Risikobeurteilung von Konservierungsmitteln wird verwiesen.

#### Abstract

In common linguistic usage, people very frequently use the word “risk” without regarding its real meaning. Indeed the term “risk” has its origin in the insurance business where it describes nothing else than a financial risk. The Risk Number of the present study is in a certain sense in agreement with the insurance term. The Risk Number expresses the imminent loss of idealistic and real values that may happen to a sculpture in the course of further weathering in one number. It is explained how so-called risk tables can be established. Comparable approaches assessing the risk of conservation products developed by Portuguese scientists are reported.

#### 1. Einleitung

Der Begriff „Risiko“ (R) wird sowohl im allgemeinen Sprachgebrauch als auch in der wissenschaftlichen Terminologie in vielfältiger Weise unterschiedlich verwendet. Per Definitionem wäre er als das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit W und Schadensschwere (S) eines unerwünschten Ereignisses aufzufassen:

$$R = W * S$$

Diese Definition zeigt sehr deutlich, dass Risiko bzw. Risikogröße elementar mit dem Versicherungswesen verbunden sind und im Grunde eine monetäre Größe beinhalten. Das Versicherungsunternehmen bewertet das versicherte Objekt, zum Beispiel eine Auto, nach seinem monetären Wert, ermittelt die Wahrscheinlichkeit, dass es bei einem Unfall Schaden nimmt,

und errechnet daraus den Versicherungswert bzw. die zu entrichtende Police. Risiko hat für Versicherungen deshalb stets einen monetären Inhalt.

In der Umgangssprache wird der Begriff jedoch sehr oberflächlich verwendet, um einem Gefühl Ausdruck zu verleihen, dass ein bestimmtes Ereignis möglicherweise eintreten könne. Die Grenze zum unberechenbaren Zufall ist in dieser Sichtweise verwischt.

Für einen strengen Gebrauch ist Risiko von einer Reihe anderer Begriffe abzugrenzen: Der Begriff Wagnis ist tendenziell mit einer ethischen Komponente verbunden und wird bevorzugt in den Geisteswissenschaften verwendet (Wagnis Ehe, Wagnis Glaube etc.).

Im juristischen Sprachgebrauch wird Risiko von der Gefahr abgegrenzt. Als Gefahr wird eine Situation bezeichnet, von der ein sehr hohes Risiko ausgeht. Gefahren sind demnach schwieriger zu beherrschen als Risiken. Der Begriff Risiko wiederum wird vom Restrisiko abgegrenzt, das trotz bester Vorkehrungen unvermeidlich bestehen bleibt.

Im Gegensatz zu Ereignissen unter Unwissenheit und Ungewissheit (vor allem Gefahren) ist das Eintreten eines Risikos kalkulierbar. Bei der Ungewissheit sind die möglichen Auswirkungen abschätzungsweise bekannt, man verfügt jedoch über keine Aussagen zur Eintrittswahrscheinlichkeit. Bei Unwissenheit sind weder Eintrittswahrscheinlichkeit noch Auswirkungen noch Handlungsalternativen bekannt. Zu solchen Ereignissen zählen Erdbeben oder Vulkanausbrüche, von deren Eintreten man weder den Zeitpunkt noch den möglichen Schaden kennt, selbst wenn Versicherer durch umfangreiche Statistiken eine Risikoeinstufung bestimmter Gebiete vornehmen können.

Die Ingenieur- und Umweltwissenschaften haben die aus dem Versicherungswesen stammende Definition von Risiko ebenfalls übernommen.

<sup>1</sup> Alle Ausführungen der Einleitung basieren auf einem Beitrag in [WIKIPEDIA.org/wiki/Risiko](https://de.wikipedia.org/wiki/Risiko)

### 3. Risikoziffer III: Was ist Risiko?

Es treten aber wie zu erwarten Prognose und Quantifizierungsprobleme auf. Die Eintrittswahrscheinlichkeit wird im Sinne von Eintrittshäufigkeit eingesetzt. So bedeutet eine Eintrittshäufigkeit von 0,01 Ereignissen pro Jahr, dass ein Schadensereignis im Mittel alle 100 Jahre einmal eintritt. Bekanntermaßen bedeutet eine solche Aussage aber nicht, dass ein solches Ereignis nicht auch in zwei Jahren hintereinander auftreten kann.

Ein besonders interessanter Aspekt ergibt sich aus der Betrachtung von Risiko als Folge der natürlichen physikalischen Grundbedingungen des Universums. Nicht determinierte, unvorhersehbare Ereignisse gehören als Teil der Naturgesetze unmittelbar zur realen Wirklichkeit. Im englischen Sprachgebrauch werden diese Risiken als hazard (Gefährdung, Gefahr, Wagnis, Zufall) bezeichnet. Die Chaostheorie ist diejenige Wissenschaft, die sich mit dem Eintreten von Ereignissen aus deterministisch nicht fassbaren Ausgangszuständen befasst.

Das Risikomanagement beschäftigt sich mit dem planvollen Umgang mit Risiken. Als erster Schritt steht die Risikoidentifikation auf dem Arbeitsplan. Sodann werden das Schadensrisiko und die Eintrittswahrscheinlichkeit in einer Risikomatrix zusammengefasst. Die Risikosteuerung beinhaltet die Möglichkeiten, wie die betreffende Organisation mit dem Risiko umgeht, namentlich durch Selbsttragen des Schadens, Schadensvermeidung, Überwälzung auf andere, Ansätze zur Risikobegrenzung. Alle Maßnahmen zielen darauf ab, den zu erwartenden Schaden so klein wie möglich zu halten.

#### 2. Risikobetrachtung in Museen und Denkmalpflege

Für die Museumskunde und Restaurierung sind Überlegungen zum Risikomanagement in dem Leitfaden „Präventive Konservierung“ (WAENTIG et al. 2014) zusammengefasst. Dieser Titel weist bereits deutlich darauf hin, dass das Ziel der Bemühungen immer die Vermeidung von Risiken sein muss. 10 Schadensfaktoren werden vom Canadian Conservation Institute CCI benannt, um Risiken zu erkennen, einzuschätzen und zu bekämpfen:

1. Physikalische Kräfte
2. Diebstahl und Vandalismus
3. Dissoziation
4. Feuer
5. Wasser

6. Biologischer Befall
7. Schadstoffe
8. Licht und Strahlung
9. Temperatur
10. Relative Luftfeuchtigkeit

Diese 10 Schadensfaktoren haben dazu geführt, für einzelne Materialgruppen mit Hilfe physikalisch-chemischer Kenntnisse Grenzwerte für die Expositionsbedingungen festzulegen oder die Sicherheitskonzepte zu verbessern. Alle diese Bemühungen werden unter dem Begriff „Präventive Konservierung“ subsumiert.

Im Bereich Museen wäre die eingangs erwähnte Beziehung  $R = W * S$  zusätzlich um weitere Variablen zu erweitern, die sich durch die besonderen Bedingungen eines Museums ergeben. Neben Eintrittswahrscheinlichkeit (W) würden Wertverlust (V), Ausmaß des gefährlichen Ereignisses (A) und die Größe des anfälligen Teils der Sammlungen (S) das Ergebnis beeinflussen:

$$R = W * V * A * S$$

Zur Berechnung müssten den einzelnen Parametern Zahlenwerte zugemessen werden, was bei Kunstwerken oder technischen Exponaten fast unmöglich ist, weil sich ein möglicher Beschaffungs- oder Wiederverkaufswert realistischer Weise nicht feststellen lässt. Desgleichen lässt sich ein Wertverlust, der durch ein unerwünschtes Ereignis eintritt, oder dessen Folgekosten durch eine notwendig gewordene Restaurierung nur sehr schwierig bemessen. Im Bereich Museen wird aus diesen Gründen allgemein auf die Ausweisung von Risikogrößen verzichtet. Die Methode der Risikoeinschätzung zeigt jedoch Wege auf, erstrebenswerte Ziele der Risikominderung aufzuzeigen und Entscheidungsfindungen zu strukturieren.

In der Denkmalpflege wird Risiko als bloßer Begriff ständig in Gutachten und mündlichen Stellungnahmen verwendet („... dieses Objekt ist einem hohen Risiko ausgesetzt, Schaden zu nehmen...“). Eine Einschätzung im Sinne einer Risikogröße ist damit aber nicht verbunden, allenfalls im Hinblick auf eine qualitative Bewertung des Schadensrisikos. Einer präziseren Verwendung des Begriffs „Risiko“ stehen vor allem zwei Grundsätze der Denkmalpflege entgegen. Zum einen ist das die bewusst vertretene Gleichwertigkeit aller Denkmäler, welche eine Kategorisierung nach Wert und damit die Bemessung des Schadensausmaßes verhindert. Die Eintrittswahrschein-

lichkeit eines Schadensereignisses ist ebenso wenig wie im Bereich Museen abzuschätzen. Ursächlich erscheint auch die Tatsache, dass die staatliche Denkmalpflege nirgends Eigentümer von Denkmälern ist, und nur für die Eigentümer würde sich die Berechnung von Risikogrößen als Teil der haushälterischen Vorsorge tatsächlich auch lohnen. Erst wenn staatliche Institutionen beginnen, Kostenrechnungen und Bilanzen aufzustellen, wird Risikomanagement in die staatlichen Verwaltungsorgane einziehen.

### 3. Risk und Rational Decision-Making

Im Jahr 2000 hat an der FU Berlin eine Dahlem Konferenz zum Thema: "Rational Decision Making In The Preservation Of Cultural Property" stattgefunden (BAER & SNICKARS 2000) stattgefunden. Es soll hier nicht auf die einzelnen Beiträge eingegangen, sondern vielmehr nur ein sehr kurzer Überblick über die Tendenzen gegeben werden.

Bei der Einschätzung von Risiken, zum Beispiel Erdbeben oder Vandalismus, besteht ein beträchtlicher Unterschied zwischen der Betrachtungsweise durch Forscher und der Betrachtungsweise durch Menschen oder Gesellschaften. Während erstere die Risiken nach Wahrscheinlichkeiten beurteilen, reagieren Personen und Gesellschaften dergestalt, dass sie bestimmte Risiken abzuwehren versuchen, andere dagegen verdrängen und auf künftige Generationen verschieben, obwohl sie die gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit haben. Für Denkmalpflege und Konservierung bedeutet ein solches Verhalten, dass Fehler und Risiken für das kulturelle Erbe teilweise verdrängt, übersehen und jedenfalls auf künftige Generationen verschoben werden. Denkmalpflegern ist dieses Verhalten bei Baubehörden bestens bekannt, welche sich beharrliche gegen regelmäßige Kontrolle und Wartungsverträge wehren.

Ein Grund für dieses Verhalten liegt in der Kosten-Nutzen Betrachtung eines Problems. Eine solche Einstellung erweist sich immer als nur kurzzeitig nützlich gegenüber langfristig angelegten Maßnahmen. Die Kosten-Nutzen-Analyse ist intensiv mit der Nützlichkeits-theorie verbunden. Der sog. Grenznutzen beschreibt zum Beispiel, welchen zusätzlichen ideellen Gewinn eine Person durch den Besuch eines berühmten Kunstwerkes hat. Mit dem Besuch weiterer berühmter Kunstwerke nimmt der zusätzlich Nutzen für die Person immer weiter ab, bis eine Sättigung erreicht ist. Die Bekanntschaft mit 100 Kunstwerken wäre so beispielsweise der Grenznutzen für diese Per-

son. Wieviel diese Person für den Besuch dieser Zahl von Kunstwerken auszugeben bereit ist, ergibt sich aus dem Verhältnis von Grenznutzen zu Grenznutzen des Einkommens.

Willingness to pay = marginal utility/marginal utility of income

Der Grenznutzen des Einkommens ist derjenige Wert, bis zu dem der Person das zusätzlich verdiente Geld noch einen größeren Nutzen bereitet. So kann man zum Beispiel 1000 € monatlich zusätzlich gut ausgeben und daraus Nutzen ziehen. 100.000 € monatlich mehr bringen dagegen keinen zusätzlichen Nutzen hinsichtlich der Steigerung des Lebenskomforts. Das nicht verausgabte Geld ruht als totes Kapital auf dem Konto.

### 4. Risikoanalyse und Risikomatrix

Die nachfolgenden Ausführungen sind den Webseiten Caq4-Qualitätsmanagement (2010a, b, c, und d sowie 2011) entnommen, die ihrerseits auf den Publikationen von GEIGER (1994), GEIGER & KOTTE (2008) und VIERTLER (1999) fußen.

In der Praxis wird das Risiko eines Prozesses mit zwei oder drei Risikofaktoren berechnet. Risiko bedeutet in diesem Zusammenhang zum Beispiel die finanziellen Auswirkungen beim Auftreten eines Fehlers.

#### 4.1 Zwei-Faktoren-Risiko

Dieser Ansatz entspricht genau dem in der Einleitung beschriebenen Ansatz.

$$R = W * S$$

R = Risiko

W = Eintrittswahrscheinlichkeit eines möglichen Schadens

S = Schadensausmaß

Solcherart Risiken kann man in einer Matrix darstellen, deren eine Achse die Eintrittswahrscheinlichkeit W, die andere das Schadensausmaß wiedergibt. Dabei müssen keineswegs reelle Zahlenwerte eingesetzt werden. Es genügt, auf Grund von Erfahrungen qualitative Einschätzungen der Art

1 = gering,

2 = wenig

3 = mittel,

4 = hoch

5 = sehr hoch

### 3. Risikoziffer III: Was ist Risiko?

einzusetzen. Nachfolgend ist ein Beispiel gezeigt. Die Farben bezeichnen einfach die Zunahme des Risikos für den betrachteten Prozess. Zahlen größer 9 bedeuten mittleres bis sehr hohes Risiko. Maßnahmen zur Fehlervermeidung müssen eingeleitet werden.

Schadensausmaß Eintrittswahrscheinlichkeit	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10
3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20
5	5	10	15	20	25

Tab. 1: Matrix zur Veranschaulichung eines Zwei-Faktoren-Risikos. Zahlen größer 9 bedeuten mittleres bis hohes Risiko.

#### 4.2 Drei-Faktoren-Risiko

Das Drei Faktoren Risiko ist ein Baustein der FEMA – Fehler-Möglichkeit-Einfluss-Analyse, die in der industriellen Fertigung vielfache Anwendung findet (VIERTLER 1999). Betrachtet werden die Faktoren

A = Versagensrisiko. Mögliches Auftreten eines Fehlers nach Auslieferung der Ware.

B = Abschätzung der Auswirkungen auf den Kunden. Kundenzufriedenheit. Kulanzlösungen

E = Wahrscheinlichkeit der Nicht-Entdeckung des Fehlers

Für das in der FEMA Methode als Risikoprioritätszahl R bezeichnete Risiko gilt die Beziehung

$$RPZ = A * B * E$$

Jeder der drei Faktoren wird auf Grund von Erfahrungswerten mit einer Zahl zwischen 1 und 10 bewertet. Das Resultat lässt sich übersichtlich nur mehr in Tabellenform wiedergeben, nicht mehr als 2-dimensionale Matrix. Im Vergleich mit dem Zwei-Faktoren-Modell ergeben sich folgende möglichen Bereiche für RPZ:

A x B x E		A x B
A	1 ... 10	1 ... 10
B	1 ... 10	1 ... 10
E	1 ... 10	
RPZ minimal	1x1 = 1	1x1 = 1
RPZ mittel	5x5x5 = 125	5x5 = 25
RPZ maximal	10x10x10 = 1000	10x10 = 100

Tab. 2: Mögliche Bereiche der Risikoprioritätszahl RPZ im Drei-Faktoren-Modell und im Zwei-Faktoren-Modell.

Zum besseren Verständnis seien hier einige Beispiele für die Interpretation der Risikoprioritätszahl aufgeführt (SCHIMMEL 2016). Man erkennt, dass im Fall A = B = 10 mit E = 1 dadurch, dass der Fehler sicher zu entdecken ist, jedes Risiko vermieden werden kann, wenn an der Fehlerstelle eingegriffen wird (Tab. 3).

Ab einer Risikoprioritätszahl von 125 gilt als Regel, dass Maßnahmen zur Qualitätssicherung eingeleitet werden müssen, um Nachteile für das Unternehmen abzuwenden. Die Risikoprioritätszahl wird für jeden einzelnen Produktionsschritt ermittelt, so dass sich eine lange Reihe von Risikoprioritätszahlen ergibt. Diese können der Größe nach geordnet und als Balkendiagramm dargestellt werden, so dass man mit einem Blick übersehen kann, an welcher Stelle im Produktionsprozess eingegriffen werden muss. Dagegen werden die einzelnen RPZ nicht miteinander zu einer Gesamteinschätzung des Produktionsprozesses verbunden, was auch nicht nötig ist, weil man ja das Risikopotential jedes einzelnen Schrittes kennen möchte, so dass man gezielt eingreifen kann.

Anders ist das Bestreben im vorliegenden Projekt, wo es gerade das Ziel ist, die unterschiedlichen Teilrisiken zu einer Gesamt-Risikoziffer zu verbinden. Wie später gezeigt wird, eignet sich das Drei-Faktoren-Modell auch für die Berechnung der Risikoziffer.

5. **Der Inkompatibilitätsansatz nach Prodomea**  
Prodomea (Project on high compatibility technologies and Systems for conservation and Documentation of masonry works in archaeological sites in the Mediterranean Area) beschreibt ein Projekt, in dem ein System zur Beurteilung der Verträglichkeit bestimmter Maßnahmen und Produkte zur Natursteinbehandlung entworfen wurde (DELGADO & GROSSI 2007). Wiederum werden bestimmte Gesteinseigenschaften vor und nach der Behandlung miteinander verglichen. Im Gegensatz zu SASSE & SNETHLAGE (1997) wird jedoch ein einfacherer Ansatz gewählt, in dem die Eigenschaftsveränderungen mit einer Skala von 0 bis 10 Punkten bewertet werden. Null bedeutet keine Veränderung oder Erreichen eines Optimalwerts, 10 bedeutet starke Abweichung vom Idealwert. Die Einteilung der Bewertungszahlen fußt bislang auf den Erfahrungswerten der Autoren, sollte jedoch von einem Expertengremium bestätigt werden.

A	B	E	RPZ	A	B	E
1	1	1	1	Fehler tritt nie auf	Keine Auswirkung auf den Kunden	Fehler ist sicher zu entdecken
2	10	10	200	Fehler tritt selten auf	Fehler hat unangenehme Auswirkungen auf den Kunden	Fehler sehr schwer zu entdecken
10	10	1	100	Fehler tritt sehr häufig auf	Fehler hat unangenehme Auswirkungen auf den Kunden	Fehler ist sicher zu entdecken
10	10	10	1000	Fehler tritt sehr häufig auf	Fehler hat unangenehme Auswirkungen auf den Kunden	Fehler sehr schwer zu entdecken

Tab. 3: Interpretation der Risikoprioritätszahl (SCHIMMEL (2016))

Auch bei Prodomea gibt es vielfältige Verwandtschaften zur Risikoziffer. Der große Unterschied besteht jedoch darin, dass bei Prodomea von Beginn an nur qualitative Bewertungen in einer Skala von 0 bis 10 vorgenommen werden, während bei der Risikoziffer die tatsächlichen Messwertdifferenzen, immer normiert auf 1, zur Berechnung herangezogen werden. In der folgenden Tabelle 4 wird ein verkürztes Beispiel für die Einstufung (Ratings R) gegeben.

Die diversen Einstufungen (Ratings Ri) werden mit Hilfe der nachfolgenden Formel zum Inkompatibilitätsgrad (ID) zusammengefasst wird, wobei die Autoren nicht das arithmetische Mittel wählen sondern das quadratische Mittel anwenden, bei dem die höheren Werte, d.h. die inkompatiblen Werte stärker in das Endergebnis einfließen.

$$ID_n = \sqrt{\frac{R_1^2 + R_2^2 + \dots + R_n^2}{n}}$$

ID<sub>n</sub> = Incompatibility Degree  
 R<sub>1</sub>, ..., R<sub>n</sub> = Einstufungen (Ratings) der n ausgewählten Parameter  
 n = Anzahl der ausgesuchten Parameter

In der obigen Formel sind alle Parameter gleich gewichtet. Fügt man Gewichtungen für jeden Parameter ein, so gelangt man zu derselben Formel wie der bei SASSE & SNETHLAGE (1997).

$$ID_n = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n W_k R_k^2}{\sum_{k=1}^n W_k}}$$

ID<sub>n</sub> = Incompatibility Degree  
 W<sub>k</sub> = Gewichtung der ausgesuchten Parameter k  
 R<sub>k</sub> = Einstufung (Rating) der ausgesuchten Parameter k

Die Division durch W<sub>i</sub> hat den Vorteil, dass das Ergebnis immer zwischen 0 und 10 variiert, wodurch die Einschätzung des Ergebnisses im Vergleich zu anderen einfacher wird. 0 bedeutet eine optimal kompatibles, 10 ein vollständig inkompatibles, ungeeignetes Produkt. DELGADO & GROSSI (2007) haben Prodomea auch durch sogenannte weiche Eigenschaften wie Expertise der Anwender, Planungsschritte, Voruntersuchungen etc. erweitert, so dass Prodomea nicht nur für Produkte, sondern auch für Maßnahmenabläufe angewendet werden kann. Auf diesen Punkt soll hier aber nicht eingegangen werden.

### 6. Inkompatibilitätsindex (Risiko) ID bei Reinigungsmaßnahmen

REVEZ (2016) hat in ihrer Dissertation ein sehr detailliertes Konzept entwickelt, wie unterschiedliche Reinigungsmethoden hinsichtlich ihres Risikos, Schäden auf Natursteinoberflächen zu verursachen, zu beurteilen sind. Dazu hat sie die Einwirkungen

Kriterium	Eigenschaften	Einstufung Rating
Thermische Eigenschaften	Thermischer Ausdehnungskoeffizient des unbehandelten Gesteins = ε <sub>0</sub> des behandelten Gesteins = ε <sub>i</sub>	0,9 ε <sub>0</sub> < ε <sub>i</sub> < 1,1 ε <sub>0</sub> R = 0 1,1 ε <sub>0</sub> < ε <sub>i</sub> < 1,2 ε <sub>0</sub> R = 5 ε <sub>i</sub> > 1,2 ε <sub>0</sub> R = 10
Mechanische Eigenschaften	Biegezugfestigkeit Druckfestigkeit E-Modul	Überfestigung < 10% R = 0 Überfestigung 10 / 25% R = 5 Überfestigung > 25% R = 10

Tab 4: Einstufung der Inkompatibilität (Rating R) beispielhafter Gesteinseigenschaften. (Delgado & Grossi (2007))

### 3. Risikoziffer III: Was ist Risiko?

der Reinigungsmethoden auf magmatische, metamorphe und sedimentäre Gesteinsarten mit folgenden Parametern bewertet:

- A = Verletzlichkeit der Oberfläche gegenüber der Reinigungsmethoden
- B = Aggressivität der Reinigungsmethoden
- C = Synergieeffekte wie Ausbildung des Personals u.a.
- D = Auswirkungen auf die Signifikanz des Objekts durch einen Schaden

Die Faktoren A, B und C beschreiben die Wahrscheinlichkeit eines Schadens. Der Inkompatibilitätsindex wird mit folgender Formel berechnet:

$$ID = L * D = (A*B*C)*D$$

L = Likelyhood

Alle Faktoren werden mit Zahlenwerten von 1 bis 5 eingestuft.

Man erkennt auf den ersten Blick die Kongruenz mit den oben vorgestellten Berechnungen der Risikoprioritätszahl RPZ. REVEZ hat diesen Index, d.h. das Risiko eines Schadenseintritts, in einer zweidimensionalen Matrix übersichtlich abgebildet.

Risk		Consequences (D)				
		1	2	3	4	5
		Negligible	Moderate	High	Very high	Severe
Likelihood (L=AxBxC)	Very high L≥40	Low	Medium	High	Very high	Extreme
	High 20≤L<40	Low	Medium	High	High	Very high
	Moderate 10≤L<20	Very low	Low	Medium	High	Very high
	Low 5≤L<10	Very low	Low	Low	Medium	High
	Very low L<5	Very low	Very low	Low	Low	Medium

**Tab. 5:** Matrix für den Inkompatibilitätsindex ID (Risikowahrscheinlichkeit) von Reinigungsmaßnahmen.

Diese Matrix besagt, dass für ein bestimmtes Substrat das Reinigungsrisiko nur vermindert werden kann, wenn die Reinigungsmethode verändert wird.

Deshalb sollte bei Reinigungsmethoden, deren Risiko mehr als mittelhoch eingestuft ist, sofort mit Überlegungen nach einer Methodenänderung begonnen werden.

### 7. Produktbewertung auf messtechnischer Grundlage

SASSE & SNETHLAGE (1997) haben ein System von Messparametern vorgeschlagen, mit dessen Hilfe die Wirksamkeit von Konservierungsmitteln quantitativ bewertet werden kann. Dazu werden bestimmte Gesteinseigenschaften wie E-Modul, Wasseraufnahme, Wasserdampfleitfähigkeit und weitere ausgewählt und deren Veränderung vor und nach der Behandlung im Labor bestimmt. Aus der Differenz der Messwerte zu einem vorher durch Erfahrungswerte festgelegten, optimalen Sollwert kann die Wirksamkeit eines Produkts, zum Beispiel eines Steinfestigers, berechnet werden. Das Ergebnis gilt streng nur für die untersuchte Gesteinsorte und das untersuchte Produkt. Die Wirksamkeit unterschiedlicher Produkte kann auf diese Weise in Laborreihen mit Zahlenwerten hinterlegt und verglichen werden. Die nachfolgende Tabelle zeigt ein fiktives Anwendungsbeispiel (Tabelle 6).

Die Auswertung erfolgt nach Formel

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

E = Wirksamkeit (Effectiveness)

m<sub>i</sub> = Messwerte in Prozent des Optimalwerts für jeden Parameter i

w<sub>i</sub> = Gewichtung des Parameters i

Hierin eingeschlossen ist die unterschiedliche Gewichtung verschiedener Gesteinseigenschaften in Abhängigkeit vom Standort. So ist der Parameter Frostbeständigkeit für einen Standort wie Berlin von erheblicher Bedeutung, für einen Standort wie Lissabon dagegen kaum. Gleiches gilt für die Wasseraufnahme, die bei regenarmen Standorten als weniger wichtig eingestuft werden kann. Somit ergibt sich

$$\text{Wirksamkeit E (Berlin)} = (100 + 93 + 25) / 3 = 72\%$$

$$\text{Wirksamkeit E(Lissabon)} = (100 + 0,5 * 93 + 0,1 * 25) / 1,6 = 93\%$$

Gemäß der Berechnung erfüllt das Produkt die Anforderungen in Berlin zu 72%, in Lissabon sogar zu 93%. Der Ansatz von Sasse & Snethlage (1997) ist dem Konzept der Risikoziffer, das in diesem Projekt verfolgt wird, sehr verwandt. Eine Verwandtschaft besteht auch zur Modellierung des Risikopotentials, mit dem Unterschied, dass hier eine positive Größe wie die Wirksamkeit berechnet wird.

Eigenschaften	Dimesnsion	Wirksamkeit		Messwerte	
		Unbehandelt	Behandelt Zielwert	Absolut	Relativ
1 Eindringtiefe	mm	0	50	50	100%
2 Wasseraufnahme	Kg/m <sup>2</sup> √h	3,0	0,01	0,2	93%
3 Frostwiderstand sehr gut ... schlecht	Einstufung 1 ... 5	5	1	4	25%
Gewichtung W	Eigenschaft	1	2	3	Summe
Fall A Berlin	W	1	1	1	3
Fall B Lissabon	W	1	0,5	0,1	1,6

**Tab 6:** Wirksamkeit (Effectiveness E) eines fiktiven Produkts bei der Behandlung eines gedachten Natursteins. Beispiel für drei Eigenschaften.

### 8. Parallelisierung von Risikoberechnung und Risikoziffer

Der diesem Projekt zu Grunde liegende Ansatz zur Berechnung von Teilrisiken  $R_i$  und dem Gesamtrisiko  $R_{ges}$

$$R_i = M_i * B_i$$

$R_i$  = Risiko des Parameters  $i$

$M_i$  = Messwertzahl zum Parameter  $i$

$B_i$  = Bewertungszahl zum Parameter  $i$   
und

$$R_{ges} = (\sum R_i) / n$$

$R_{ges}$  = Gesamtrisiko

$n$  = Anzahl der Teilrisiken  $R_i$

kann mit der Definition von Risiko

$$R = W * S$$

$R$  = Risiko

$W$  = Eintrittswahrscheinlichkeit

$S$  = Schadensumfang

in Übereinstimmung gebracht werden. Dazu bedarf es einiger Überlegungen.

Im Entwurf für die Risikoberechnung gibt es zwei unterschiedliche Arten von Messwertzahlen  $M_i$ :

#### 8.1 Zahlenmäßige Einstufung der Messwertzahl $M_i$

Im Datenblatt Umwelt, exogene Umweltfaktoren sind zum Beispiel Messwertzahlen  $M(i)$  enthalten, die den betreffenden Parametern als Zahlenwerte vorgegeben werden. Sie definieren eine Einstufung des von ihnen ausgehenden Risikos. Zum Beispiel

Niederschlag	> 1000 mm/Jahr	$M(i) = 1$
	1000 – 800 mm/Jahr	$M(i) = 0,7$
	800 – 600 mm/Jahr	$M(i) = 0,5$
	< 600 mm/Jahr	$M(i) = 0,3$
Frostgefahr	hoch	$M(i) = 1$
	mittel	$M(i) = 0,7$
	niedrig	$M(i) = 0,5$
	keine	$M(i) = 0$

#### 8.2 Messtechnische Einstufung der Messwertzahl $M(i)$

In diesem Fall beruhen die Messwertzahlen  $M_i$  auf tatsächlich eingetretenen, messtechnisch bestimmten Eigenschaftsänderungen. Diese Messwertzahlen beschreiben zahlenmäßig den Grad, zu dem sich die betreffende Materialeigenschaft vom Ausgangswert im frischen Zustand, zum Beispiel zum Zeitpunkt der Erschaffung und Aufstellung einer Skulptur, entfernt hat. Zum Beispiel:

Wasseraufnahme W-Wert	$ w_i - w_0  / w_i$
Thermische Dehnung $\varepsilon$	$ \varepsilon_i - \varepsilon_0  / \varepsilon_i$

$w_0$  bzw.  $\varepsilon_0$  = Wert des Materials im frischen Zustand  
 $w_i$  bzw.  $\varepsilon_i$  = Wert des Materials im verwitterten Zustand. Aktueller Messwert.

Die messtechnische begründete Messwertzahl  $M(i)$  beschreibt eine Materialveränderung. Sie gibt an, wie weit sich die betreffende Eigenschaft im Lauf der Verwitterung des Gesteins vom Ausgangswert des unverwitterten Gesteins entfernt hat. Je höher  $M(i)$  ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit des Entstehens oder Fortschreitens eines Schadens, womit die inhaltliche Verwandtschaft mit der Eintrittswahrscheinlichkeit des allgemeinen Risikobegriffs nachgezeichnet ist.

#### 8.3 Betrachtung der Bewertungszahl B(i)

Als zweiter Faktor geht die Bewertungszahl B(i) in die Kalkulation von R(i) ein. B(i) gewichtet den Einfluss, den der betreffende Parameter auf das Schadensrisiko R(i) eines Objekts hat. Wird B(i) als hoch eingestuft, so ist sie von hoher Bedeutung für die Entstehung oder das Fortschreiten eines Schadens. So ist zum Beispiel die Ultraschallgeschwindigkeit bei Marmor ein gewichtiger Indikator für den Schadensfortschritt und wird mit B(i) = 10 gewertet. Die Bewertungszahl B(i) hat damit eine vergleichbare Bedeutung wie die Schadensschwere bei der Risikoversicherung. Sie verleiht der betreffenden Eigenschaft das Gewicht, mit dem sie in die Risikoberechnung eingeht.

Die Bewertungszahl B(i) ist keine messtechnisch erfassbare Größe. Sie wurde durch das Fachwissen, das im Fachbeirat des Projekts versammelt war, festgelegt.

Das Produkt  $R_i = M(i) * B(i)$  enthält somit eine Aussage über einen tatsächlich eingetretenen Schaden, dessen Umfang in dem Messwert M(i) und dessen Gewichtung im Verwitterungsprozess in der Bewertungszahl B(i) enthalten ist.

#### 9. Zusammenfassung

$R(i) = M(i) * B(i)$  kann, wie soeben gezeigt, inhaltlich mit der Definition von Risiko  $R = W * S$  in Einklang gebracht werden. Wie in der allgemeinen Definition für Risiko handelt es sich um einen Zwei-Faktoren-Ansatz.

M(i) beschreibt eine eingetretene Eigenschaftsänderung, die als größere oder geringere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines sichtbaren Schadens oder das Fortschreiten eines schon bestehenden Schadens gedeutet werden kann.

B(i) bewertet den betreffenden Parameter (Gesteinseigenschaft) in Bezug auf seinen Einfluss auf den Verwitterungsprozess. Ist seine Bewertung hoch, so ist der so gewichtete Parameter verantwortlich für die Entstehung oder den Fortschritt großer Schäden, deren Behebung mit hohem finanziellen Aufwand verbunden ist. B(i) kann somit inhaltlich mit der Schadensschwere in der allgemeinen Risikodefinition gleichgesetzt werden.

Für die Praxis sind in dem Datensatz der diversen Einzelrisiken R(i) wichtige Informationen enthalten. Die R(i) können als Säulendiagramm oder tabellarisch der Größe nach geordnet werden und verschaffen somit

eine Entscheidungshilfe, wo bei der Restaurierung zuerst eingegriffen werden muss.

Für die Berechnung der Gesamt-Risikoziffer R(ges) bieten sich zwei Alternativen an. Entweder das arithmetische Mittel,

$$R(\text{ges}) = (\sum R(i))/n$$

oder das quadratische Mittel, das von DELGADO RODRIGUES & GROSSI (2007) verwendet wurde,

$$R(\text{ges}) = \sqrt{[(\sum R(i)^2)/n]}$$

wobei die hohen Zahlenwerte stärker gewichtet und Schadensunterschiede zwischen einzelnen Objekten unter Umständen besser abgebildet werden. Grundsätzlich wird dadurch die Aussage, welche die Gesamt-Risikoziffer R(ges) liefert, nicht verändert.

Bei der Berechnung der Risikoziffer R(ges) werden in beiden Ansätzen die einzelnen Teilrisiken R(i) als gleichrangig behandelt und zu der Gesamtrisikoziffer zusammengefasst. Es böte sich an, bestimmte Teilrisiken R(i), die als besonders gravierend für die Schadensentwicklung angesehen werden, mehrfach zu werten. Wie später gezeigt wird, führt ein derartiger Rechenschritt sogar zu keiner verbesserten Betrachtung des Gesamtrisikos R(ges), weil durch einen höheren Quotienten (n+1) dividiert werden muss.

Es konnte gezeigt werden, dass sich das Konzept der Risikoziffer in allen Belangen mit der gültigen Definition von Risiko in Übereinstimmung bringen lässt. Die Risikoziffer ist damit eine wissenschaftlich fundierte Methode zur Risikobeurteilung von Denkmälern.

#### 10. Literaturverzeichnis

BAER NORBERT, SNICKARS FOLKE ED. (2000): Rational Decision-making in the Preservation of Cultural Property. Report of the 86th Dahlem Workshop. Dahlem University Press Berlin.

Caq4-Qualitätsmanagement (2010a): Die QME-FMEA Methode. <http://www.risikomangement-suchen.com/QMEFMEA/QMEFMEA.htm>.

Caq4-Qualitätsmanagement (2010b): Bewertungsfaktor A. Risiko einer Qualitätsminderung (Versagensrisiko). <http://www.risikomangement-suchen.com/QMEFMEA/A.htm>.

Caq4-Qualitätsmanagement (2010c):Das Risiko-Prioritätsprofil. <http://www.risikomangement-suchen.com/QMEFMEA./Risikoprofil.htm>

Caq4-Qualitätsmanagement (2010d): FMEA – Fehler Möglichkeits- und Einfluss-Analyse. <http://www.risikomangement-suchen.com/2Entwicklung/5Entwicklung.htm>

Caq4-Qualitätsmanagement (2011): Risikoanalyse (RA) Risikomatrix. <http://www.risikomangement-suchen.com/RAAllgemein.htm>

DELGADO RODRIGUES, J., GROSSI, A. (2007). Indicators and ratings for the compatibility assessment of conservation actions. *Journal of Cultural Heritage*, 8, 32-43. doi:101016/j.culher.2006.04.007

GEIGER, W. (1991): FMEA-Unentbehrlich für die Planung eines QS-Systems“ QZ 36 (1991) Heft 8, Seiten 4

GEIGER, W. (1994):Qualitätslehre, Einführung, Systematik, Terminologie, 2.Auflage. Vieweg Verlag

GEIGER, W., KOTTE, W.(2008): Handbuch Qualität, 5.Auflage. Vieweg Verlag. ISBN 978-3-8348-0273-6, S. 220 ff.

REVEZ MARIA JOAO (2016): Calculated Risk. The (In) compatibility of Built Heritage Cleaning Methods.

Dissertation Faculty of Chemistry and Technology New University of Lisbon

SASSE HANS-RAINER, SNETHLAGE ROLF (1997): Methods for the Evaluation of Stone Conservation Treatments. In: N S Baer & R Snethlage, eds., *Saving Our Architectural Heritage. The Conservation of Historic Stone Structures*. Report of the Dahlem Workshop March 3-8, 1996 FU Berlin. John Wiley & Sons, Chichester, New York.

SCHIMMEL, BERATUNG (2016): Risikoberechnung. [www.beratung-schimmel.de/files/risikoberechnung.pdf](http://www.beratung-schimmel.de/files/risikoberechnung.pdf)

VIERTLER, F. (1999): Die QME-FMEA Methode zur Einführung eines normenkonformen Lean-Quality-Management-System nach DIN ISO 9000 ff. Dissertation 1999, TU Graz

WAENTIG FRIEDERIKE, DROPMANN MELANIE, KONOLD KARIN, SPIEGEL ELISE, WENZEL CHRISTOPH (2014): Präventive Konservierung. Ein Leitfaden. *ICOM Deutschland - Beiträge zur Museologie Band 5*. 96 Seiten.

WIKIPEDIA (2016): Risiko. <http://de.wikipedia.org/wiki/Risiko>.



Carolin Pfeuffer

## 4. 3D-Modellierung von Skulpturen mit Laserscan und die quantitative Erfassung der 3D-Flächenmaße von Verwitterungsphänomenen

### Zusammenfassung

Im folgenden Artikel wird die dreidimensionale Kartierung zur exakten Bestimmung der flächenmäßigen Ausbreitung von Schadensphänomenen auf der Oberfläche von Skulpturen vorgestellt. Hierzu wird die Generierung von drei-dimensionalen Modellen, die als Kartierungsgrundlage dienen, beschrieben. Des Weiteren wird die dreidimensionale Kartierung erläutert und die ermittelten Werte mit denen der zwei-dimensionalen Kartierung anhand von drei Beispielen verglichen. Auf diese Weise wird die höhere Genauigkeit der 3D-Kartierung deutlich. In einem letzten Punkt werden die weiteren Möglichkeiten in Bezug auf 3D-Modelle von Skulpturen besprochen.

### Abstract

The following article presents the three-dimensional mapping as a tool for measuring the real distribution of damage phenomena on the surface of sculptures. The three-dimensional models of the sculptures that serve as the mapping basis were captured with a T Scan 2 from Fa. Steinbichler Optotechnik. Three-dimensional mapping is explained and the values determined on three examples are compared with the two-dimensional mapping. The comparison of 3D mapping with 2D mapping clearly proves the much higher accuracy of the 3D methodology. In a final point, further possibilities of using 3D models for assessing the state of sculptures are presented.

### 1. Einleitung

Für die Berechnung der Risikoziffer wird unter anderem die genaue flächenmäßige Ausbreitung von Schäden benötigt. Um diese Angaben zu erhalten, wurden Schadenskartierungen von 12 Objekten angefertigt. Die in der Konservierung, Restaurierung und Denkmalpflege übliche zweidimensionale Kartierung auf einem Foto erfordert jedoch viele unterschiedliche Ansichten eines Objekts, damit alle Bereiche erfasst werden. Die Flächen von Vertiefungen oder Hinterschneidungen können auf diese Weise gar nicht ermittelt werden, weshalb die genaue Ausbreitung des Schadens so nicht exakt bestimmt werden kann. Daher wird im Zuge des Forschungsprojektes „Risikoziffer“ auf die Möglichkeit des dreidimensionalen Kartierens zurückgegriffen, um die exakte

Ausbreitung des Schadens zu erfassen. Dazu müssen zunächst 3D-Modelle der Skulpturen angefertigt werden, welche als Kartierungsgrundlage dienen.

### 2. Gescannte Objekte

Im Projekt „Risikoziffer“ sind Skulpturen aus Sandstein und Marmor gescannt worden, die im Freien oder einem Depot stehen. Nachfolgend sind die gescannten Objekte aufgeführt:

- München: Schlosspark Nymphenburg
  - o Äolus, Sterzinger Marmor, Standort: im Freien
  - o Flora, Laaser Marmor, Standort: im Freien
- Baiersdorf: Jüdischer Friedhof
  - o Grabstein des Bernhard Ehrenbacher, Schilfsandstein, Standort: im Freien
  - o Grabstein des Sigmund Sulzberger, Schilfsandstein, Standort: im Freien
  - o Grabstein des Rabbi Löw Gans Nr. 935, Schilfsandstein, Standort: im Freien
  - o Doppelgrab Nr. 1091, Buntsandstein, Standort: im Freien
- Heidenau: Barockgarten Großsedlitz
  - o Hera/Juno (Kopie), Cottaer Sandstein, Standort: im Freien
  - o Hera/Juno (Original), Cottaer Sandstein, Standort: Depot
  - o Kybele/Rhea (Original), Cottaer Sandstein, Standort: Depot
- Dresden: Großer Garten
  - o „Die Zeit enthüllt die Wahrheit“, Carrara Marmor, Standort: im Freien
- Potsdam: Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg, Sammlung im Depot in Potsdam
  - o Apollo, Carrara Marmor, Standort: Depot
  - o Vestalin, Carrara Marmor, Standort: Depot

Insgesamt wurden sieben Skulpturen bzw. Grabsteine aus Sandstein und fünf Skulpturen aus Marmor gescannt (s. Abb. 1).

### 3. Durchführung der Laserscans

#### 3.1 Scanner

Um die drei-dimensionalen Modelle der ausgewählten Objekte zu erhalten, wurden diese mit Hilfe

#### 4. 3D-Modellierung und 3D-Flächenmaße



Abb. 1: Auswahl von 3D-Modellen der gescannten Skulpturen

des Laserscanners T-Scans 2 der Firma Steinbichler Optotechnik gescannt. Hierbei handelt es sich um einen handgeführten Laserscanner der Otto-Friedrich-Universität Bamberg. Der Scanner besteht aus zwei Teilen: einem IR-Kamerabalken, der den zweiten Teil, ein Handgerät mit Laserscanner, im Raum verortet.

Während des Scannens können die entstehenden Modelle am PC direkt gesehen werden. Es kann unmittelbar überprüft werden, ob alle Bereiche gescannt wurden, ob die Qualität stimmt usw. Bei dem fertigen Scan handelt es sich zunächst um eine Punktwolke. Diese rechnet die Software per Triangulation zu

einem Flächenmodell um, aus dem die Oberfläche des 3D-Modells generiert wird.

#### 3.2 Scanablauf

Der Kamerabalken wird drei bis fünf Meter vor dem Objekt positioniert. Oftmals ist ein Gerüst für den Balken und wiederum ein Gerüst für die scannende Person nötig, um bei größeren Objekten alle Bereiche erfassen zu können (s. Abb.2, 3).

Im Freien ist häufig eine Abdunkelung mit Planen nötig, da bei hellem Sonnenlicht der Balken das Handgerät nicht orten kann. Die Planen schützen



Abb. 2: Beim Scannen der Skulptur „Die Zeit enthüllt die Wahrheit“, Dresden



Abb. 3: Beim Scannen der Skulptur Äolus, München

die empfindlichen Elektrogeräte auch vor Regen. Der Scanprozess gestaltet sich so, dass alle Bereiche, die mit einer Kamerabalken-Position erfasst werden können, zusammenhängend aufgenommen werden. Der Kamerabalken verfügt über ein bestimmtes Messvolumen, in dem er das Handgerät orten kann. Außerhalb dieses Bereichs wird das Handgerät nicht erfasst und es werden keine 3D-Daten ermittelt. Ist das Objekt größer als das angegebene Messvolumen, muss der Kamerabalken teilweise mehrfach umgestellt werden, um alle Teile des Objektes zu erfassen. Hat man alle Flächen gemessen, ist die Scan-Arbeit vor Ort abgeschlossen. Jede Kamerabalken-Position ergibt ein Teilstück des Objektes. Die Einzelscans werden am PC zu einem vollständigen Modell zusammengefügt. Das nennt man Matchen.

**4. Nachbearbeitung**

Nach dem Zusammenlegen aller Einzelscans und der automatischen Nachbesserung des Scan-Programms muss der Scan am PC noch optimiert werden. Durch Hinterschneidungen, Bewuchs auf der Oberfläche und der Geometrie des Handgerätes können nicht immer alle Bereiche der Skulptur aufgenommen werden. So entstehen Löcher in der Modelloberfläche (s. Abb. 4).



Abb. 4: 3D Scan der Flora

Diese Fehlstellen werden in der Nachbearbeitung am PC geschlossen. Auf diese Weise wird ein komplett geschlossenes 3D-Modell generiert.

**5. Kartierung**

Die fertiggestellten 3D-Modelle der Skulpturen können nun als Grundlage für die Schadenskartierung genutzt werden.

**5.1 Kartierung vor Ort**

Zunächst ist eine Kartierung der vorhandenen Schäden des Objektes vor Ort auf einem Foto ausgeführt worden. Hierbei sind zwei Schadenskategorien aufgenommen worden: Formen der Verwitterung und Oberflächenrauheit (nach DAMJANOVIC 2013) des Objekts (s. Tab. 1 und 2).

Schadensphänomen	Kartierungsfarbe
Rückwitterung	Blau
Relief	Blaugrün
Kruste	Schwarz
Absanden	Gelb
Schuppen	Orange
Schale	Rot
Aufblättern / Aufspalten	Rosa
biologische Besiedlung	Grün
Riss	Weiß

**Tab.1:** Kartierungsvorlage: Verwitterungsphänomene

Rauheit	Kartierungsfarbe
P>1000	Grün
P1000-600	Blaugrün
P600-400	Grau
P400-300	Gelb
P300-200	Orange
P200-60	Rot
P>60	Blau

**Tab. 2:** Kartierungsvorlage: Rauheit der Oberfläche

**5.2 Dreidimensionale Kartierung**

Die Kartierung muss in einem nächsten Schritt am PC, allerdings nun dreidimensional digitalisiert werden. Die derzeit am Markt verfügbare 3D-Kartierungssoftware funktionierte für unsere Ansprüche noch nicht zufriedenstellend, wie eigene Tests gezeigt haben. Auf derartige Probleme hat auch schon ANSEL ET AL. (2016) hingewiesen. Deshalb wurde die

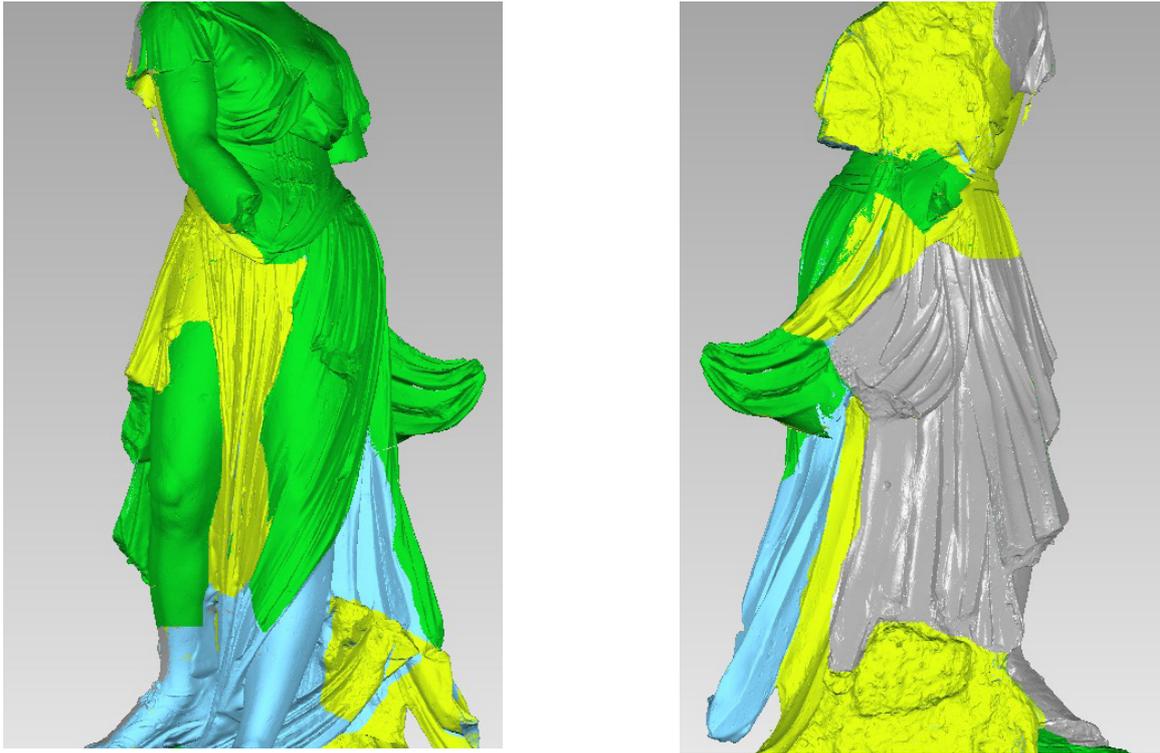


Abb. 5: 3D-Modell der Hera (Original) mit Kartierung der Oberflächenrauheiten

Ermittlung der Flächen mit Hilfe der Software Geomagic Studio 2013 durchgeführt. Hierbei handelt es sich um die Software, mit der schon die 3D-Modelle nachgearbeitet wurden, um beispielsweise Löcher zu schließen. Das Programm ist zur Bearbeitung von 3D-Modellen gedacht und damit eigentlich kein klassisches Kartierungsprogramm. Dennoch können Flächenmaße ermittelt werden.

### 5.3 Flächenmaße der Oberflächenrauheit am Beispiel der Hera

Im Folgenden wird die Ermittlung der flächenmäßigen Ausbreitung der Oberflächenrauheit am Beispiel der Hera (Original) aus dem Barockgarten Großsedlitz durch die 3D-Kartierung aufgezeigt (s. Abb. 5). Zunächst wird die Gesamtoberfläche bzw. die zu kartierende Fläche ermittelt (s. Tab. 3). Diese Flächen sind wichtig, da für die Risikoziffer die jeweiligen Werte in Bezug auf die Gesamtfläche benötigt werden.

	mm <sup>2</sup>	gerundete m <sup>2</sup>
Gesamtfläche	4627949,8319	4,63
Standfläche	1298320,8765	1,30
zu kartierende Fläche (Gesamtfläche minus Standfläche)	3329628,9554	3,33

**Tab. 3:** Ermittlung der Gesamtoberfläche der Skulptur Hera Original sowie der zu kartierenden Fläche.

In einem nächsten Schritt werden alle Flächen, die zu einer bestimmten Oberflächenrauheit gehören, zusammengefasst und mit der zugehörigen Farbe versehen (s. Abb. 5). Die Auswertung ergibt dann die in Tabelle 4 aufgeführten Flächenmaße.

Rauheit	mm <sup>2</sup>	gerundete m <sup>2</sup>	in Bezug auf Gesamtoberfläche
P<1000 (Grün)	1266661,6214	1,27	38,14%
P1000-600 (Hellblau)	610552,8248	0,61	18,32%
P600-400 (Grau)	513409,2141	0,51	15,32%
P400-300 (Gelb)	939005,2951	0,94	28,23%

**Tab. 4:** Ermittlung der einzelnen Oberflächenrauheiten an der Skulptur Hera Original

Das Ergebnis zeigt, dass 38 % der Gesamtoberfläche eine Rauheit von P <1000 besitzen, 18 % eine Rauheit von 1000 – 600 und 15 % eine Rauheit von 600 – 400.

Das bedeutet, dass die Oberfläche des Sandsteins zu fast 75 % immer noch eine sehr feine Rauheit besitzt und somit praktisch trotz der fast dreihundert Jahre währenden Exposition im Freien kaum Schaden genommen hat. Die berechneten Flächenwerte werden dann für die Berechnung der Risikoziffer genutzt.



Abb. 6: 3D-Modelle der Skulpturen Apoll, Hera (Kopie), Flora (v. links n. rechts)

### 6. Vergleich 2D-/3D-Kartierung

Um die höhere Genauigkeit der 3D-Kartierung zu demonstrieren, wurde die flächenmäßige Ausbreitung der Oberflächenrauheit an drei ausgewählten Skulpturen (Apoll, Hera (Kopie) und Flora (s. Abb. 6)) durch eine zwei- und eine drei-dimensionale Kartierung bestimmt (s. Abb. 7). Die jeweiligen Ergebnisse werden im Folgenden verglichen.

#### 6.1 Zweidimensionale Kartierung

Für die zwei-dimensionale Kartierung mit AutoCAD 2018-Software wurden die vier Ansichten der aus-

gewählten Skulptur – hier gezeigt am Beispiel des Apoll - auf die reale Größe des Objekts skaliert und die Flächen entsprechend ihrer Rauheit in verschiedenen Farben markiert (s. Abb. 8). Sodann erfolgte die Messung der Gesamtoberfläche der Skulptur und der unterschiedlichen Rauheiten.

#### 6.2 Vergleich der mit 2D und 3D bestimmten Gesamtoberfläche

In einem ersten Schritt wird die Gesamtoberfläche der Skulpturen in beiden Varianten bestimmt (siehe Tab. 5). Da beim 3D-Scan nahezu die exakte Oberflä-

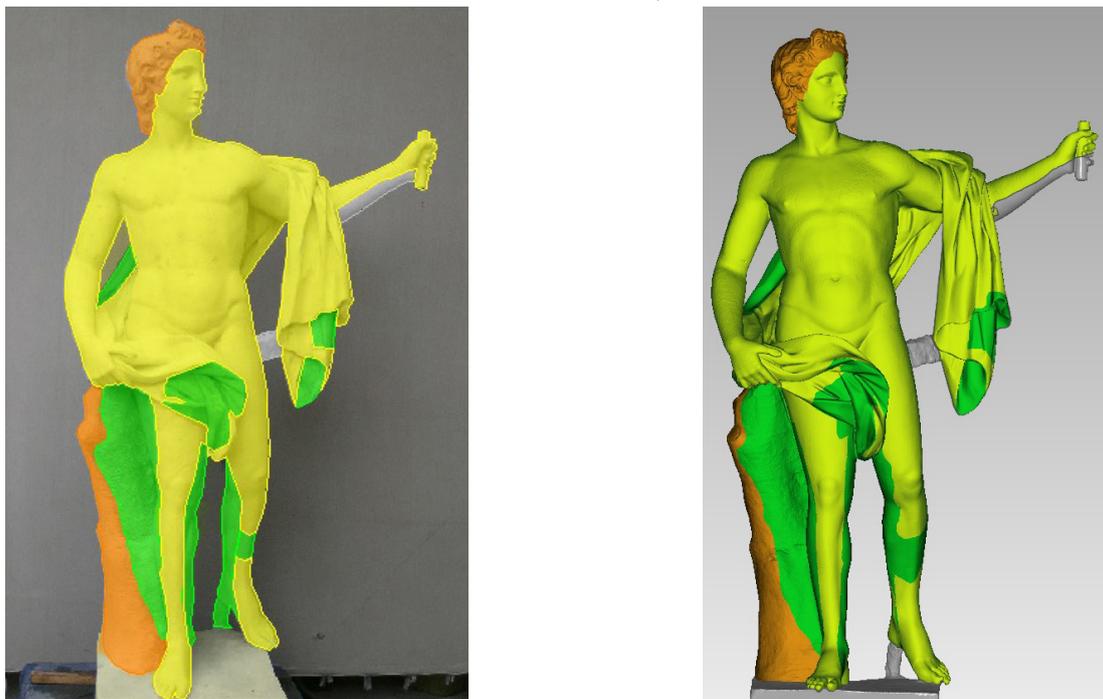


Abb. 7: Kartierung der Oberflächenrauheit der Apoll-Skulptur; links zwei-dimensional, rechts drei-dimensionale Kartierung



	Oberflächenrauheit	2D-Kartierung		3D-Kartierung	
		Fläche	% Gesamtoberfläche	Fläche	% Gesamtoberfläche
	>P1000 (Grün)	0,51 m <sup>2</sup>	22,33%	0,69 m <sup>2</sup>	19,98%
	P600-400 (Grau)	0,12 m <sup>2</sup>	5,38%	0,48 m <sup>2</sup>	13,78%
	P400-300 (Gelb)	1,17 m <sup>2</sup>	51%	1,74 m <sup>2</sup>	50,45%
P300-200 (Orange)	0,49 m <sup>2</sup>	21,4%	0,54 m <sup>2</sup>	15,78%	
<b>Tab. 6:</b> Die Flächenanteile der Oberflächenrauheit im Vergleich. Skulptur Apoll.					

Will man die Werte miteinander vergleichen, ist es notwendig, die ermittelten Flächenangaben der 2D-Kartierung mit denen der 3D-Kartierung ins Verhältnis zu setzen.

Oberflächenrauheit	% der 3D-Kartierung
>P1000 (Grün)	73,91%
P600-400	25%
P400-300	67,24%
P300-200	90,74%

**Tab. 7:** Flächenanteile der Oberflächenrauheit in 2D-Kartierung in Bezug auf die Werte der 3D-Kartierung

Gut zu sehen ist, dass beim Oberflächenphänomen P600-400 durch die 2D-Kartierung lediglich 25% der tatsächlichen Fläche erfasst wurde. Betrachtet man die Fläche, bei der diese Rauigkeit an der Skulptur vorkommt, wird ersichtlich, dass es zu diesen Unterschieden kommt, weil die Beininnenflächen und die Armunterseiten betroffen sind. Diese Bereiche sind auf den 2D-Aufnahmen der Skulptur nicht zu sehen und werden bei der zweidimensionalen Kartierung nicht erfasst.

### 6.3.2 Hera (Kopie)

Die Werte, die bei der 2D-Kartierung der Hera (Kopie) ermittelt wurden, unterscheiden sich nicht sehr stark von denen der 3D-Kartierung. Die Reihenfolge der ermittelten Flächenwerte ist gleich, Jedoch ist der prozentuale Anteil an der Gesamtfläche leicht verschoben. Der Flächenwert des der Oberflächenrauigkeit P1000-600 ist bei der zwei-dimensionalen Kartierung im Vergleich zur 3D-Kartierung leicht erhöht.

Um die Werte der zwei- mit denen der dreidimensionalen Kartierung vergleichen zu können, müssen diese wieder miteinander in Relation gesetzt werden. Erkennbar ist, dass der leicht höhere prozentuale Anteil, der oben beschrieben wurde, sich auch auf den in Tab. 9 dargestellten Werten niederschlägt. So sind ca. 94% der Oberflächenrauigkeit von P1000-600 auch bei der zweidimensionalen Kartierung erfasst worden.

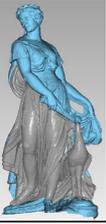
Oberflächenrauheit	% der 3D-Kartierung
P1000-700 (Blau)	94,21%
P700-500 (Grau)	82,52%

**Tab. 9:** Flächenanteile der Oberflächenrauheit in der 2D-Kartierung in Bezug auf die Werte der 3D-Kartierung

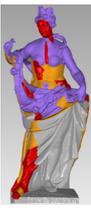
### 6.3.3 Flora

Erwartungsgemäß unterscheiden sich auch die Werte der 2D-Kartierung bei der Skulptur Flora von denen der 3D-Kartierung. Interessant hierbei ist, dass sogar die Reihenfolge der ermittelten Flächenwerte verschieden ist (Oberflächenrauheit P240, P120). So ist bei der 3D-Kartierung die Oberflächenrauigkeit P240 deutlich öfter erfasst. Das liegt daran, dass diese Bereiche v.a. an der Armunterseite bzw. an verdeckten Flächen vorkommen, die bei der 2D-Kartierung mit den nur vier Ansichten nicht ermittelt werden können.

Will man die Werte wieder miteinander vergleichen, ist es notwendig, die ermittelten Werte der 2D-Kartierung mit denen der 3D-Kartierung ins Verhältnis zu setzen (s. Tab. 10).

	Oberflächenrauheit	2D-Kartierung		3D-Kartierung	
		Fläche	% Gesamtoberfläche	Fläche	% Gesamtoberfläche
	P1000-600 (Blau)	2,44 m <sup>2</sup>	54,71%	2,59 m <sup>2</sup>	51,29%
P600-400 (Grau)	2,03 m <sup>2</sup>	45,52%	2,46 m <sup>2</sup>	48,71%	
<b>Tab. 8:</b> Die ermittelten Werte der Flächenanteile der Oberflächenrauheit im Vergleich. Skulptur Hera Kopie.					

#### 4. 3D-Modellierung und 3D-Flächenmaße

	Oberflächenrauheit	2D-Kartierung		3D-Kartierung	
		Fläche	% Gesamtoberfläche	Fläche	% Gesamtoberfläche
	P600-400 (Grau)	1,02 m <sup>2</sup>	26,42%	1,55 m <sup>2</sup>	31,33%
	P300-200 (Orange)	0,29 m <sup>2</sup>	7,48%	0,67 m <sup>2</sup>	13,58%
	P200-60 (Rot)	0,37 m <sup>2</sup>	9,52%	0,42 m <sup>2</sup>	0,42%
	P<60 (Lila)	2,09 m <sup>2</sup>	54,22%	2,3 m <sup>2</sup>	46,63%

**Tab. 10:** Flächenanteile der Oberflächenrauheit im Vergleich. Skulptur Flora

Die Daten der Oberflächenrauigkeit P<60 sind auch bei der 2D-Kartierung gut erfasst. Diese sind v.a. in Bereichen anzutreffen, die auf den Aufnahmen gut zu sehen sind. Anders verhält es sich bei der Rauigkeit von P300-200, wo lediglich 43% ermittelt wurden.

Oberflächenrauheit	% der 3D-Kartierung
P600-400 (Grau)	65,81%
P300-200 (Orange)	43,28%
P200-60 (Rot)	88,1%
P<60 (Lila)	90,87%

**Tab. 11:** Flächenanteile der Oberflächenrauheit der 2D-Kartierung in Bezug auf die Werte der 3D-Kartierung

#### 6.4 Gesamtbetrachtung

Insgesamt kann nachvollzogen werden, dass die 3D-Kartierung eine genauere Angabe der flächenmäßigen Ausbreitung der Oberflächenphänomene liefert. Damit kann sie beispielsweise als Methode zur Erfassung von nahezu exakten Werten für die Planung einer Konservierungsmaßnahme äußerst effektiv sein. Zum Beispiel zeigt die Kartierung des Apoll bei der Oberflächenrauigkeit P600-400, dass nur 25% der tatsächlichen Oberfläche mit Hilfe der zwei-dimensionalen Kartierung erfasst und damit 0,3 m<sup>2</sup> nicht ermittelt werden konnten. Müsste dieser Bereich aufwendig konservatorisch behandelt werden, würde es bei einer Ausführung zu einer nicht geplanten Mehrarbeit kommen.

#### 7. Ausblick

Die Methode der Kartierung auf einem drei-dimensionalen Modell ist momentan noch nicht weit verbreitet. Den Restauratoren fehlen die teure Ausrüstung und die Erfahrung mit den Scannern. Die aufwändige 3D-Kartierung, bei der zuvor 3D-Modelle erstellt werden müssen, ist zeitintensiv und damit teuer. Doch diese Vorgehensweise lohnt sich, wie die Ergebnisse zeigen. Somit kann beispielsweise bei der Erstellung der Konservierungsmaßnahmen genauer und ressourcenschonender geplant werden.

Ein weiterer Vorteil der 3D-Daten-Erfassung ist neben der höheren Genauigkeit, dass mit dem 3D-Modell der momentane Zustand des Objektes exakt festgehalten wird. Löcher, Risse und sogar die Rauheit der Oberfläche werden genauestens und objektiv erfasst (RAHRIG, LUIB 2017). So können diese Daten unverfälscht für spätere Analysen genutzt und der Verwitterungsfortschritt festgestellt werden. Des Weiteren ist eine digitale Retusche an den 3D-Modellen möglich (HORN 2006), um so die unterschiedlichen Resultate alternativer Restaurierungsziele demonstrieren zu können.

Ebenso vorteilhaft ist, dass man mit Hilfe des 3D-Modells einen 3D-Druck erstellen kann. Aus dem virtuellen 3D-Modell wird ein physikalisches. So können beispielsweise Modelle mit unterschiedlichen Rekonstruktionsstufen erstellt und ausgewertet werden, ohne direkt am Original etwas verändern zu müssen. In naher Zukunft werden sich in diesem Bereich viele Veränderungen und Entwicklungen ergeben. Im Forschungsprojekt „Risikoziffer“ konnten mit Hilfe der 3D-Kartierung genauere Werte des Gesamtrisikos der ausgewählten Skulpturen ermittelt und somit das Risiko künftiger Schäden besser eingeschätzt werden.

#### 8. Literaturverzeichnis

ANSEL JOCHEN, GERLING CHRISTINE, HOFMEISTER SABINE, SCHLICK SILKE (2016): Zwei Heiligenfiguren aus der katholischen Marienkirche in Bad Mergentheim – ein außergewöhnliches Restaurierungsprojekt und der Testlauf für eine 3-D-Dokumentation; in: Denkmalpflege in Baden-Württemberg – Nachrichtenblatt der Landesdenkmalpflege, 3/2016, Jahrgang 2016, S.157 – 163.

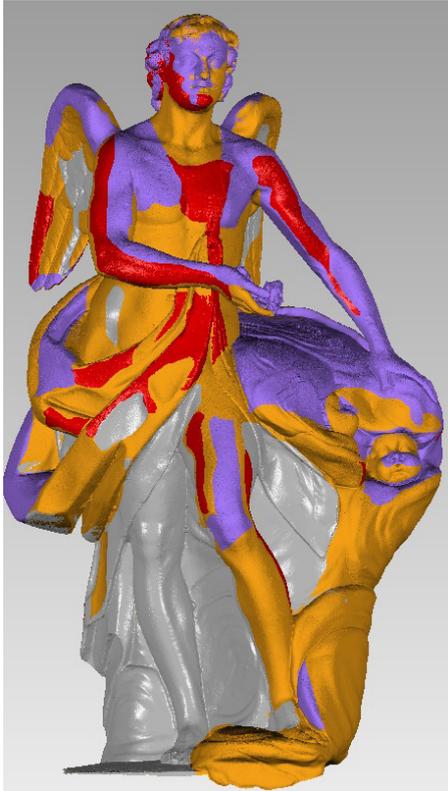
DAMJANOVIC SANDRA (2013): Sehen, fühlen, Messen. Erprobung der Profilemssmethode zur Einschätzung der Kantenabwitterung und der Beurteilung von Oberflächenrauheiten mit Hilfe von Sandpapieren sowie die messtechnische Ermittlung von Rauheitskenngrößen mit Hilfe des TRACEIT Systems an Carrara Marmorproben. Bachelor Thesis Studiengang Restaurierung FH Potsdam.

HORN FELIX (2006): Die virtuelle Retusche - Rekonstruktion verlorener Farbschichten am 3D Modell. In: Xi'an. Kaiserliche Macht im Jenseits. Kunst- und Ausstellungshalle der Bundesrepublik Deutschland Bonn. 21. April bis 23. Juli 2006. S. 180-183.

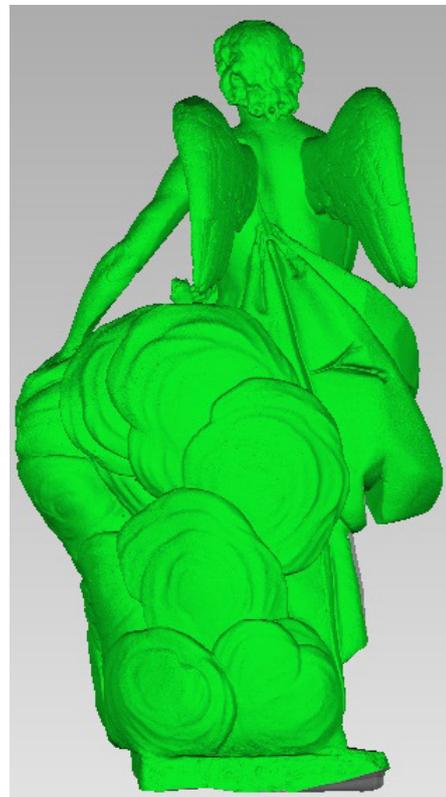
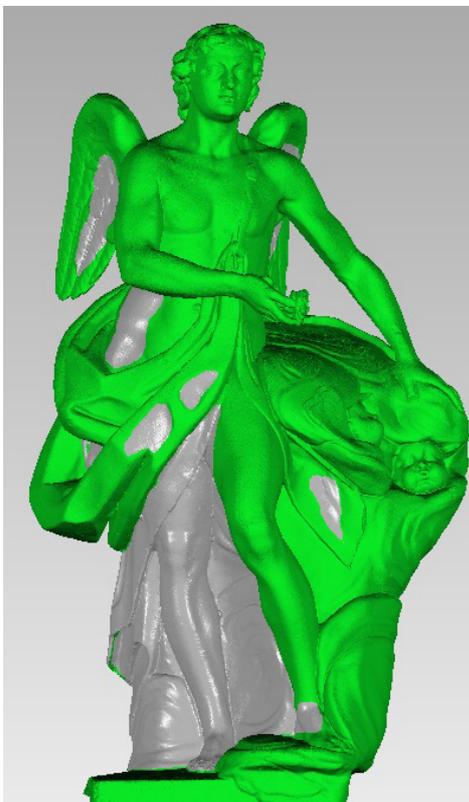
RAHRIG MAX, LUIB ANNA (2017): Sri Dalada Maligawa – 3D-Scanning and Documentation of the Temple of the Sacred Tooth Relic at Kandy, Sri Lanka, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., IV-2/W2, 229-236, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-229-2017>, 2017.

9. Anhang

9.1 Kartierung von Äolus, Schlosspark Nymphenburg, München



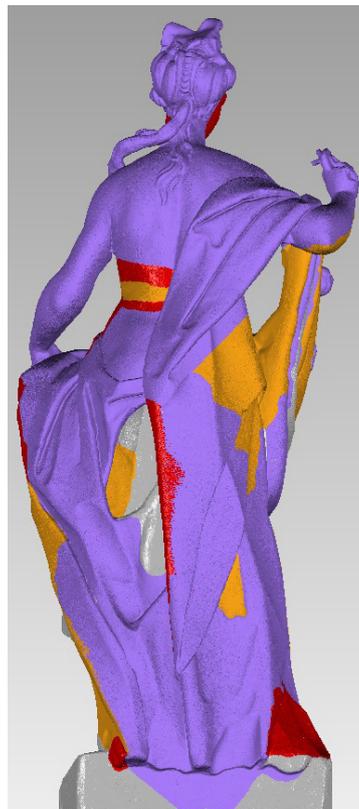
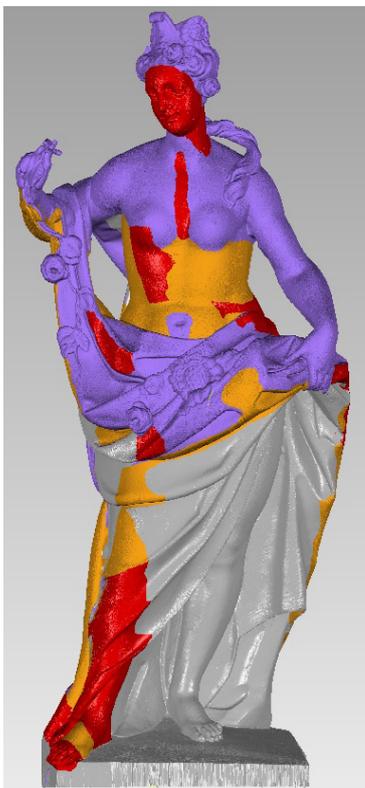
Kartierung der Rauheit



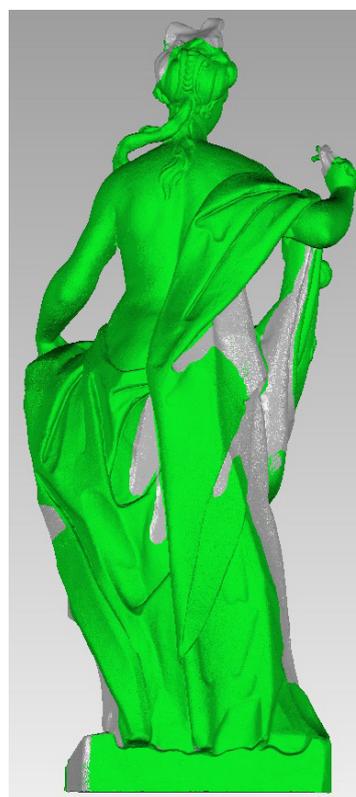
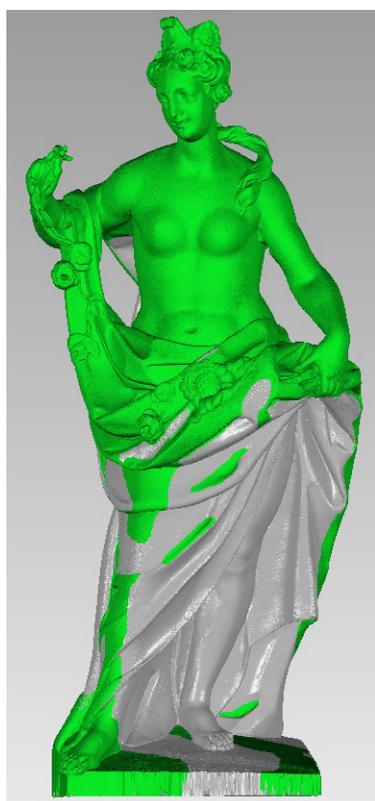
Kartierung der Verwitterungsphänomene

#### 4. 3D-Modellierung und 3D-Flächenmaße

##### 9.2 Kartierung von Flora, Schlosspark Nymphenburg, München

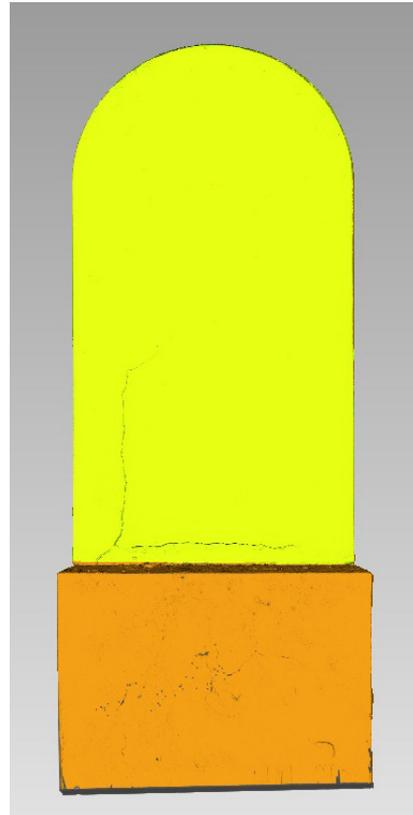
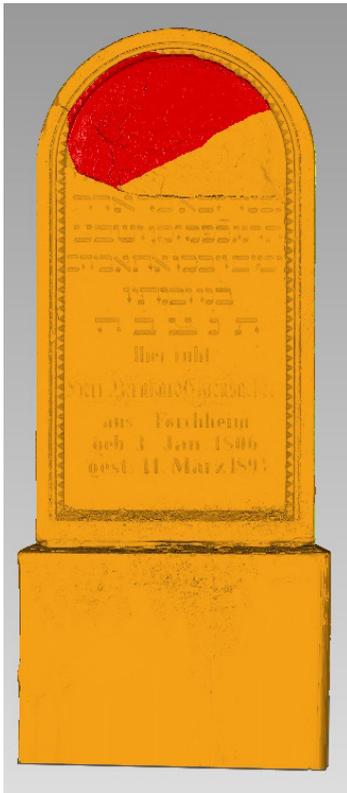


Kartierung der Rauheit

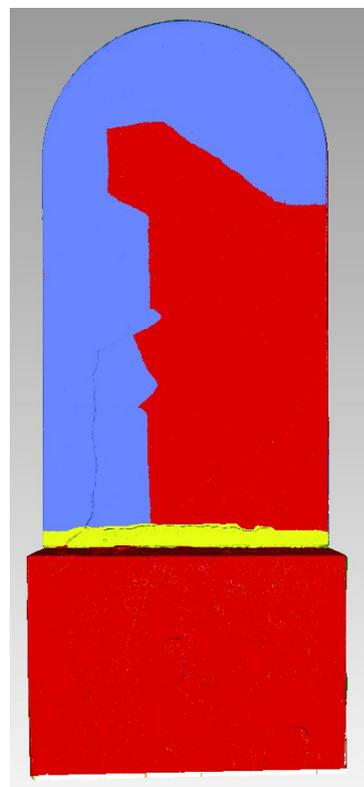
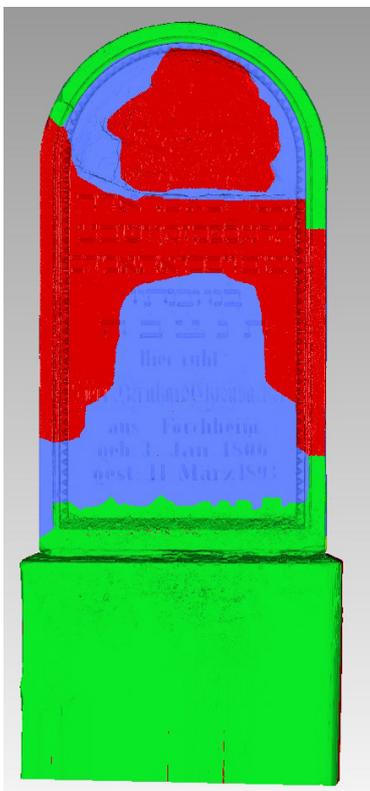


Kartierung der Verwitterungsphänomene

9.3 Kartierung des Grabsteins des Bernhard Ehrenbacher, Jüdischer Friedhof, Baiersdorf



Kartierung der Rauheit



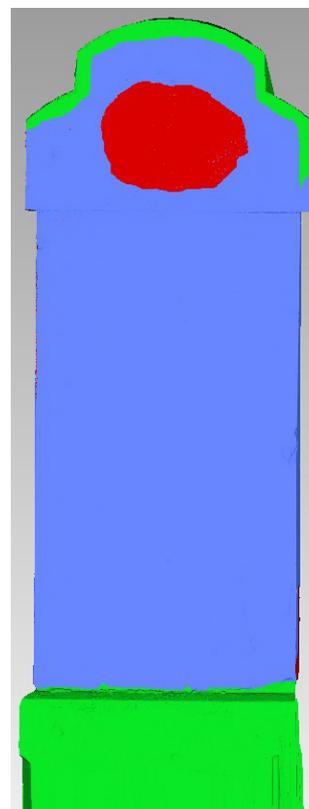
Kartierung der Verwitterungsphänomene

#### 4. 3D-Modellierung und 3D-Flächenmaße

##### 9.4 Kartierung des Grabsteins des Sigmund Sulzberger, Jüdischer Friedhof, Baiersdorf

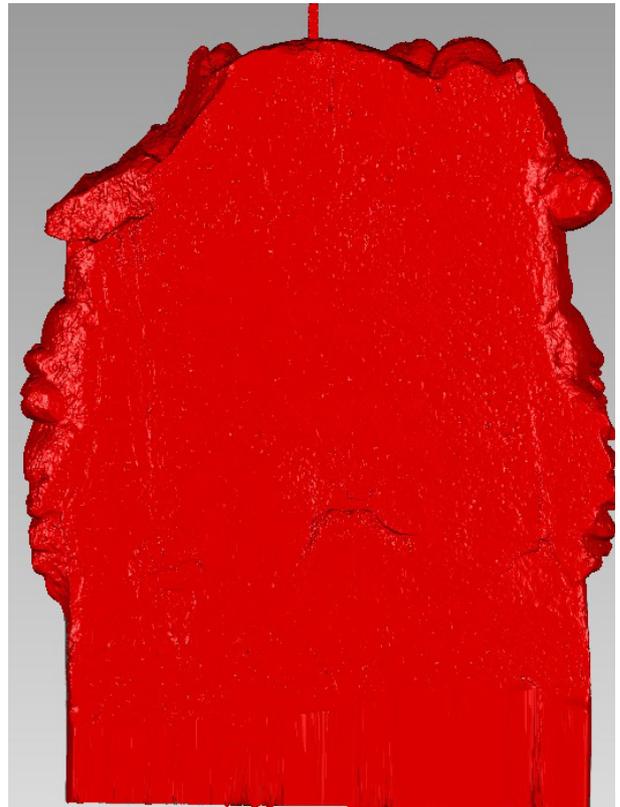
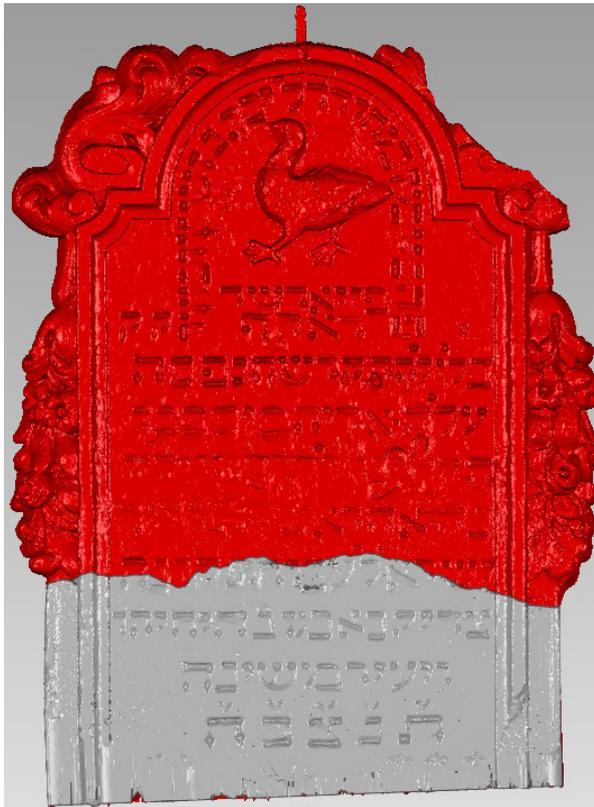


Kartierung der Rauheit

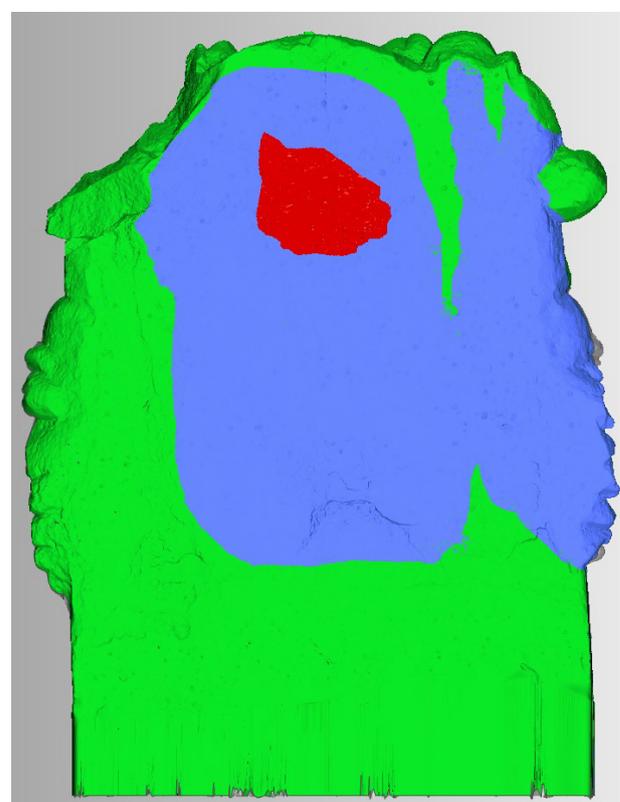
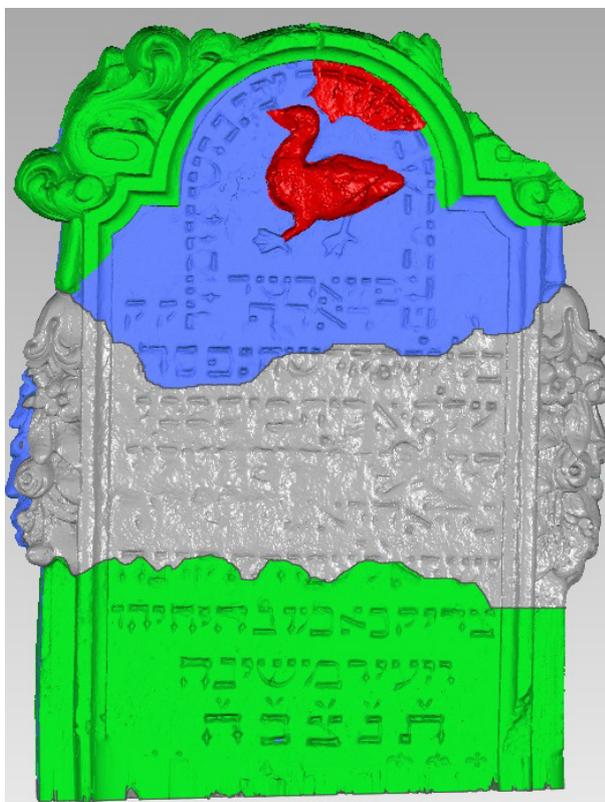


Kartierung der Verwitterungsphänomene

9.5 Kartierung des Grabsteins des Rabbi Löw Gans,  
Jüdischer Friedhof, Baiersdorf



Kartierung der Rauheit



Kartierung der Verwitterungsphänomene

#### 4. 3D-Modellierung und 3D-Flächenmaße

##### 9.6 Kartierung des Doppelgrabes, Jüdischer Friedhof, Baiersdorf

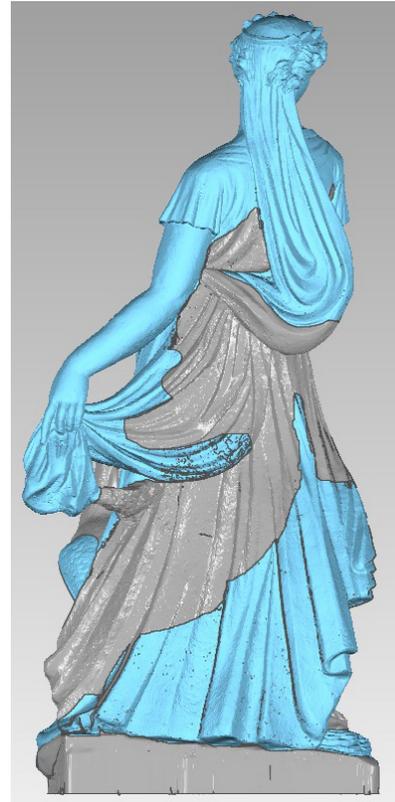
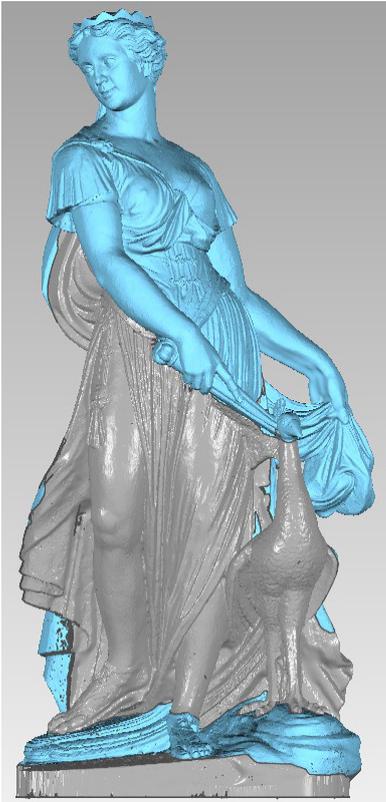


Kartierung der Rauheit

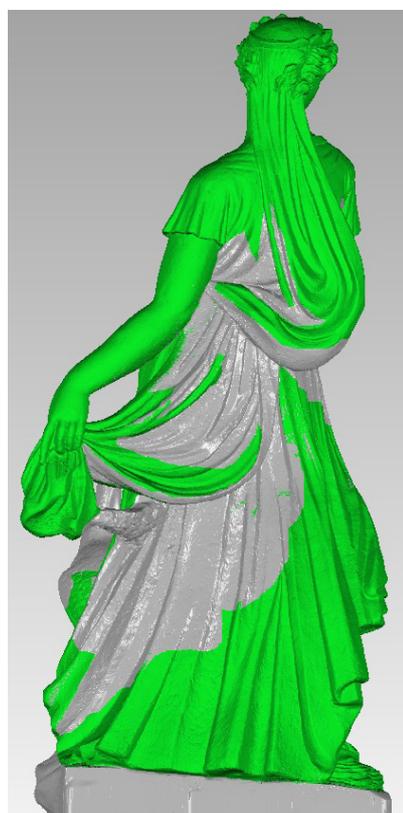
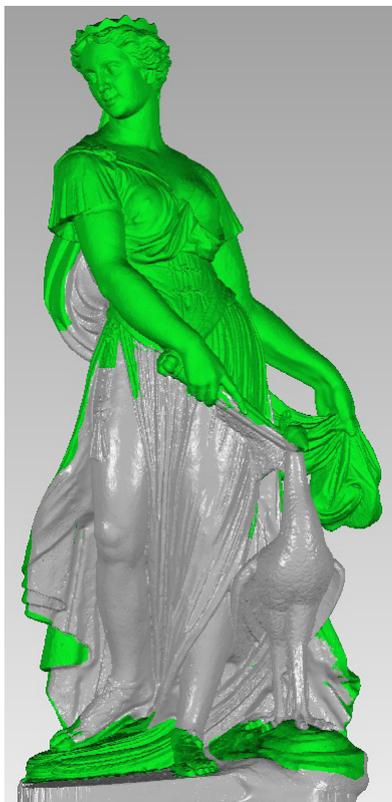


Kartierung der Verwitterungsphänomene

9.7 Kartierung Hera (Kopie), Barockgarten Großsedlitz, Heidenau

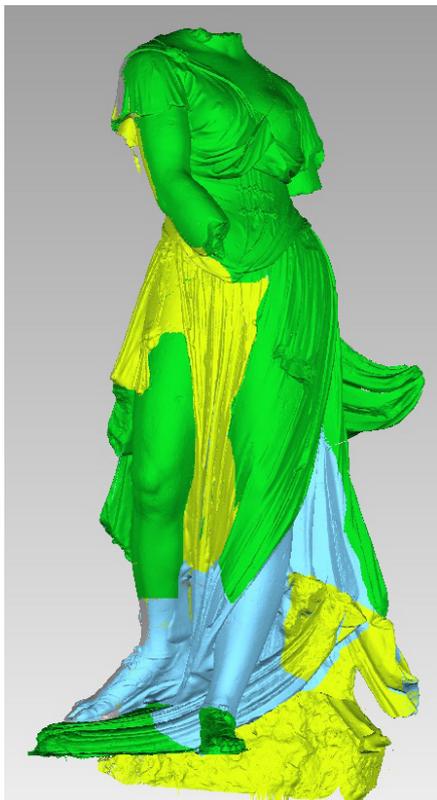


Kartierung der Rauheit

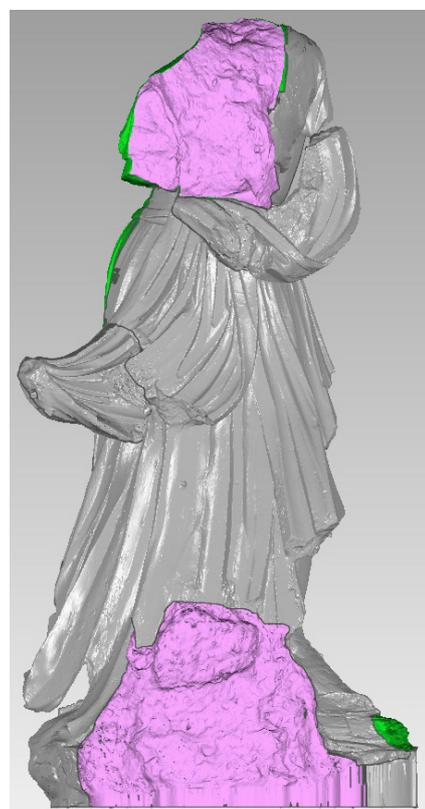
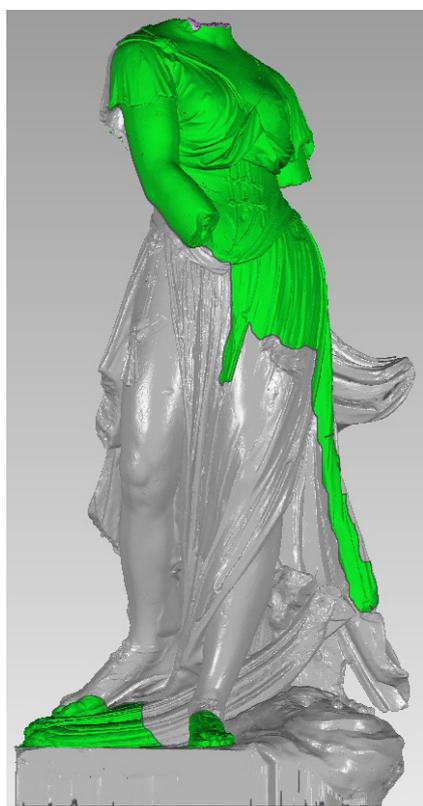


Kartierung der Verwitterungsphänomene

9.8 Kartierung Hera (Original), Barockgarten Großsedlitz, Heidenau

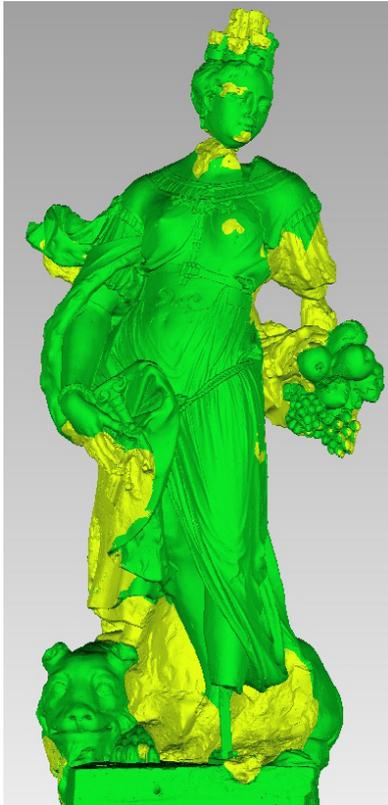


Kartierung der Rauheit

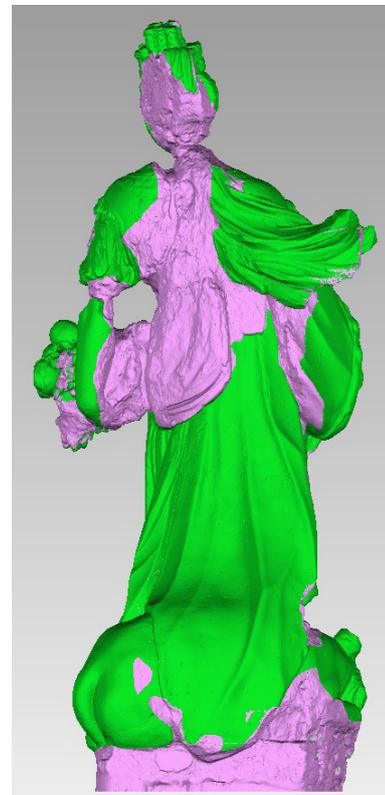
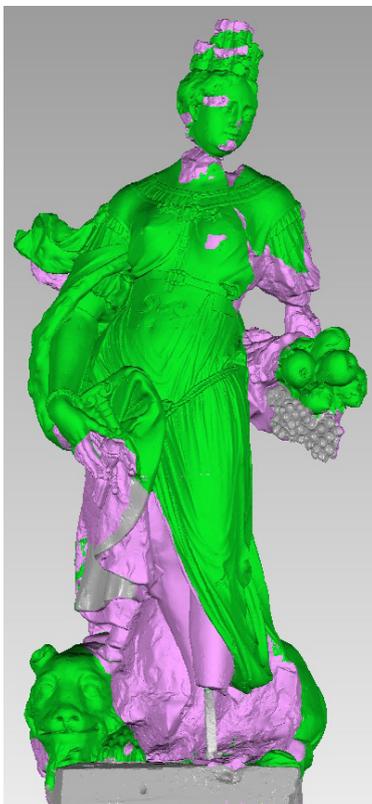


Kartierung der Verwitterungsphänomene

9.9 Kartierung Rhea (Original), Barockgarten Großsedlitz, Heidenau



Kartierung der Rauheit



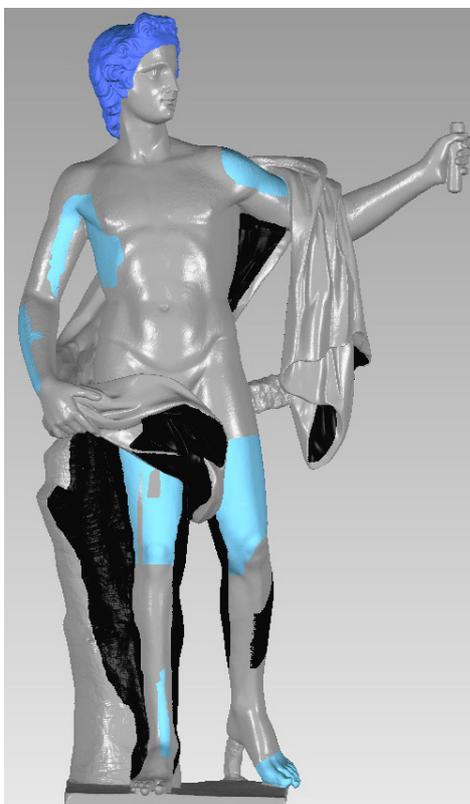
Kartierung der Verwitterungsphänomene

#### 4. 3D-Modellierung und 3D-Flächenmaße

##### 9.10 Kartierung von Apoll, Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg, Sammlung im Depot in Potsdam

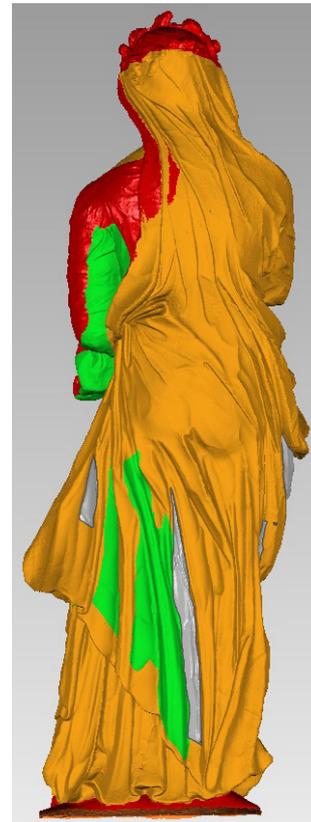


Kartierung der Rauheit



Kartierung der Verwitterungsphänomene

9.11 Kartierung von Vestalin, Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg, Sammlung im Depot in Potsdam



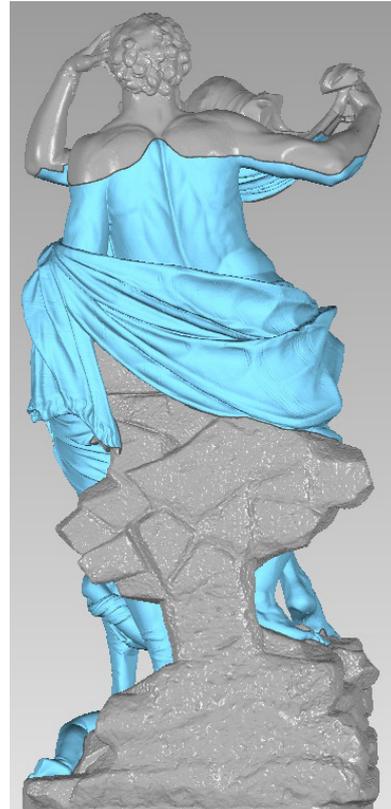
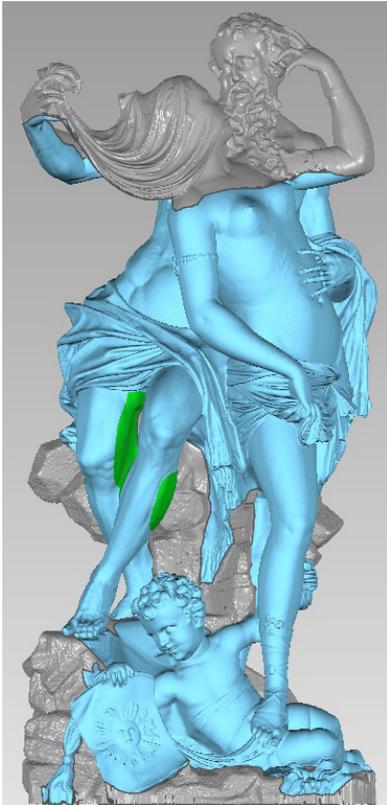
Kartierung der Rauheit



Kartierung der Verwitterungsphänomene

#### 4. 3D-Modellierung und 3D-Flächenmaße

##### 9.12 Kartierung von „Die Zeit enthüllt die Wahrheit“, Großer Garten, Dresden



Kartierung der Rauheit



Wolfram Köhler

## 5. Ultraschalldiagnostik - ein essentieller Bestandteil bei der Berechnung der Risikoziffer

### Zusammenfassung

Ultraschallmessungen sind ein wichtiger Bestandteil bei der Beurteilung des Verwitterungszustands von Marmor- und Sandsteinskulpturen. Die Messungen erfolgten an 6 Marmorskulpturen im Großen Garten in Dresden (2 Kentaurengruppen), im Schlosspark Nymphenburg (Äolus und Flora) und im Park Sanssouci (Apoll und Vestalin). Weiterhin wurden Ultraschallmessungen an 4 Grabmälern auf dem jüdischen Friedhof in Baiersdorf/Erlangen durchgeführt. Die Ultraschallgeschwindigkeiten aller Marmorskulpturen liegen weit unterhalb des Vergleichswerts für unverwitterten Marmor und zeigen einen hohen Grad an Gefügezerstörung an. Die Skulpturen im Barockgarten Großsedlitz weisen Ultraschallgeschwindigkeiten auf, die weit über den Literaturwerten für Elbsandstein liegen. Es liegt die Vermutung nahe, dass für deren Herstellung Steinblöcke aus Steinbrüchen gewonnen wurden, die heute nicht mehr bekannt sind.

### Abstract

Ultrasonic velocity is an important parameter for assessing the state of weathering of marble and sandstone sculptures. Measurements were carried out on six marble sculptures in the Great Garden (Großer Garten) in Dresden (2 centaur sculpture groups), in the park of Nymphenburg Castle (Munich) (Aeolus and Flora) and in the park of Castle Sanssouci (Potsdam). Further four sandstone tombstones in the Jewish Cemetery in Baiersdorf/Erlangen were undertaken. The ultrasonic velocities of the marble sculptures lie far below the value of fresh marble thus indicating a high degree of structure deterioration. The ultrasonic velocities of the sandstone sculptures in the Baroque Garden in Großsedlitz near Dresden by far exceed the values of Elbe Sandstone found in the literature. Probably for their production stone blocks of quarries which are unknown today had been used.

### 1. Risikoziffer und Gesteinskennwerte

Die Berechnung der Risikoziffer von Naturstein- und Kunstdenkmalen basiert auf der Quantifizierung von verschiedenen Eigenschaften dieser Denkmale. Neben kunstwissenschaftlichen Merkmalen sind dies haupt-

sächlich die Materialeigenschaften, die den aktuellen Erhaltungszustand der Denkmale beschreiben. Der Denkmalcharakter der Objekte verbietet jegliche Materialentnahmen, was die Auswahl der zur Verfügung stehenden Gesteinskennwerte auf die Messgrößen einschränkt, die zerstörungsfrei gewonnen werden können. Unter diesen nimmt die Ultraschallgeschwindigkeit besonders bei Marmor eine herausragende Stellung ein.

### 2. Ultraschallgeschwindigkeit in mineralischen Baustoffen

#### 2.1 Ultraschallwellentypen, Elastizitätsmodul und Poissonzahl

Neben der Messung der Wasseraufnahme und der Oberflächenrauheit stehen für die Erfassung des Materialzustandes nur die unterschiedlichen elastischen Konstanten (Schubmodul  $G$ , Elastizitätsmodul  $E$ , Kompressionsmodul  $K$  und Poissonzahl  $\mu$ ) zur Verfügung, die mittels mechanischer Wellen zerstörungsfrei gemessen werden können.

Lässt man auf den Festkörper einen Verformungsimpuls einwirken, so kehrt der Festkörper, abhängig von  $E$ -Modul und Poissonzahl unterschiedlich schnell in seinen Ausgangszustand zurück. D.h., ein Schallimpuls wird im Festkörper, abhängig von  $E$ -Modul und Poissonzahl, unterschiedlich schnell weitergeleitet.

Da diese Impulse nicht nur als direkte Schwingungen auf kürzestem Weg durch das Material geleitet werden, entstehen auch Schwingungen, deren Schwingungsebene senkrecht auf den direkten Schwingungen stehen. Die direkten Schwingungen werden als Stoßwellen, Longitudinalwellen (nach ihrer Schwingungsrichtung) oder Primärwellen bezeichnet, da sie in der Regel die schnellsten Wellen sind und zuerst gemessen werden. Die zweiten Wellenformen werden als Scherwellen, Transversalwellen (nach ihrer Schwingungsrichtung) oder Sekundärwellen bezeichnet.

Der Zusammenhang zwischen den Elastizitätskonstanten und den unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten lässt sich theoretisch herleiten. Dabei be-

## 5. Ultraschalldiagnostik

deutet  $\rho_R$  die Rohdichte des Festkörpers in  $\text{g/cm}^3$ . Es existieren folgende Zusammenhänge:

Primärwelle, Longitudinalwelle, Stoßwelle, Kompressionswelle, P-Welle in  $\text{m/s}$  oder  $\text{km/s}$ :

$$/1/ \quad v_P = \sqrt{\frac{E}{\rho_R} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

Sekundärwelle, Scherwelle, Transversalwelle, S-Welle in  $\text{m/s}$  oder  $\text{km/s}$ :

$$/2/ \quad v_S = \sqrt{\frac{E}{\rho_R} \frac{1}{2(1+\mu)}}$$

Dynamischer E-Modul in  $\text{N/mm}^2$  oder  $\text{Pa}$ :

$$/3/ \quad E = v_P^2 \rho_R \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu}$$

Poissonzahl  $\mu$  (dimensionslos):

$$/4/ \quad \mu = \frac{v_P^2 - 2v_S^2}{2(v_P^2 - v_S^2)}$$

Diese Zusammenhänge gelten sowohl bei sehr großen Dimensionen, wie bei Erdbeben, als auch bei kleinen Dimensionen, wie in der zerstörungsfreien Materialprüfung. Unterschiede gibt es jedoch bei den auftretenden Schallfrequenzen und Schallamplituden. Während bei Erdbeben sehr niedrige Frequenzen und hohe Amplituden anzutreffen sind, werden für Materialprüfungen sehr geringe Amplituden mit relativ hohen Frequenzen, meist im Ultraschallbereich von 20kHz bis 1MHz, eingesetzt.

Der E-Modul kann zerstörungsfrei aus den unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten als Edyn oder in der Druckpresse aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm als Estat ermittelt werden. Edyn ist meist höher als Estat, wobei diese Abweichung sich mit zunehmender Porosität eines mineralischen Baustoffs vergrößert.

In der denkmalpflegerischen Praxis hat für Objektuntersuchungen nur der dynamische E-Modul Bedeutung, da er zerstörungsfrei durch Ultraschallmessungen ermittelt werden kann.

### 2.1 Messung der P-Wellengeschwindigkeit

Die Messungen der P-Wellengeschwindigkeit  $v_P$  erfolgen mit Ultraschallwandlern, deren Spitzen trocken auf die Materialoberfläche aufgesetzt werden. Die Ultraschallfrequenzen liegen in der Regel, je nach Materialstärke, zwischen 20kHz und 250kHz. Größere Schallwege, über 1m und mehr, benötigen oft Frequenzen von 20kHz, während bei geringeren Schallwegen meist 250kHz ausreichend sind.

Die P-Wellengeschwindigkeit für Durchschallungs- oder Transmissionsmessungen berechnet sich wie folgt:

$$/5/ \quad v_P = \frac{l}{t}$$

$v_P$  - P-Wellengeschwindigkeit [ $\text{m/s}$ ;  $\text{km/s}$ ]

$l$  - Messstrecke [ $\text{cm}$ ]

$t$  - P-Wellenlaufzeit [ $\mu\text{s}$ ]

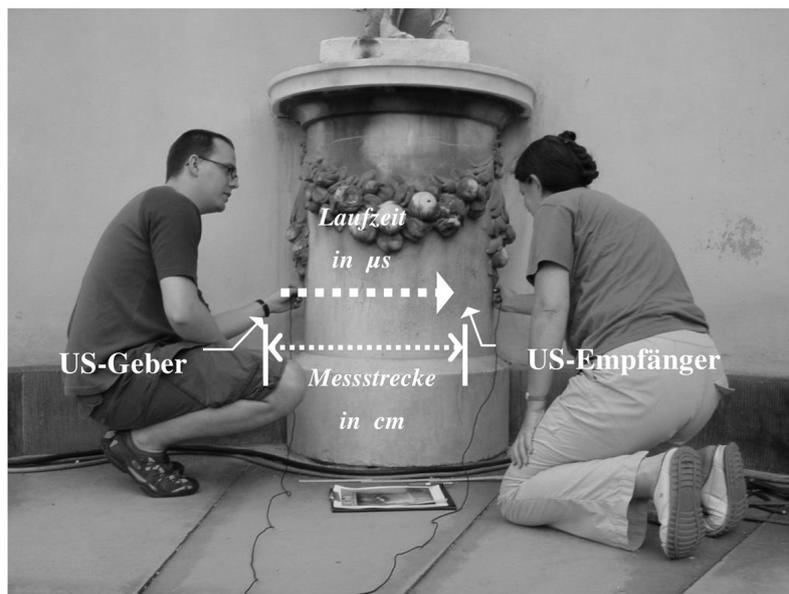


Abb. 1: Messung der Ultraschallgeschwindigkeit an einem Marmorpostament

Der Messvorgang am Denkmal besteht demnach aus einer Streckenmessung mittels Greifzirkel und Gliedermaßstab sowie einer Laufzeitmessung mittels eines geeigneten Ultraschalllaufzeitmessgerätes. Dessen wichtigste Bestandteile sind in der Regel ein Ultraschallgenerator, ein Ultraschallgeber, ein Ultraschallempfänger und ein Oszilloskop zur Zeitmessung. [1]. Die Gesamtmessgenauigkeit liegt bei Objektmessungen bei  $\pm 5\%$  und ist oft sogar schlechter, was besonders bei Monitoringmessreihen beachtet werden muss.

Da sich die P-Welle als Ersteinsatz der Wellenfront relativ leicht und sicher erkennen lässt, ist dies für die S-Welle bei Objektmessungen nur selten möglich. Daher werden in der Praxis meist nur die P-Wellen vermessen. Ihre Geschwindigkeit wird bei Objektuntersuchungen als Maß für den relativen Zustand eines mineralischen Baustoffs verwendet. Dieses kann durch den von Schön vorgeschlagenen Destruktionsparameter  $D$  beschrieben werden, der alle Störungen zusammenfasst [2]:

$$/6/ \quad D = 1 - \left( \frac{v_P}{v_M} \right)^2$$

$v_M$  – Matrixschallgeschwindigkeit der P-Welle  
 $v_P$  – gemessene P-Wellengeschwindigkeit

Die Matrixschallgeschwindigkeit der P-Welle  $v_M$  entspricht der P-Wellengeschwindigkeit des poren- sowie rissfreien mineralischen Baustoffes und ist bei Gesteinen varietätsspezifisch. Sie wird auch als

intrinsische Schallgeschwindigkeit bezeichnet und dient bei einzelnen Gesteinen als Referenzwert zur Zustandsbeurteilung von Natursteindenkmälern.

### 3. Referenzwerte für die Zustandsbewertung von Natursteindenkmälern

#### 3.1 Bedeutung der Referenzwerte bei Ultraschallmessungen

Der Messwert bei Ultraschallmessungen an Natursteindenkmälern, die P-Wellengeschwindigkeit, ist ein absoluter Messwert, der allein wenig aussagefähig ist. So ist z.B. eine Schallgeschwindigkeit von 2500m/s bei einem Cottaer Sandstein als „gut“ zu bewerten, während der gleiche Wert bei einem Carrara Marmor schon „bedenklich“ ist. Die konkreten Messwerte müssen daher bei ihrer Interpretation immer in Bezug zu den Werten gesetzt werden, die für dieses Gestein maximal möglich sind. Daher kommt der Bestimmung der varietätsspezifischen Referenzwerte eine zentrale Rolle bei der Interpretation von Ultraschallmessungen an Natursteindenkmälern zu.

Natursteine sind meist poröse Mehrkomponentensysteme, deren Bestandteile miteinander verbunden sind. Alle Komponenten und die Poreninhalte, Luft, Wasser oder Salzlösungen, haben unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten. Diese lassen sich isoliert voneinander in reiner Form oft gut messen.

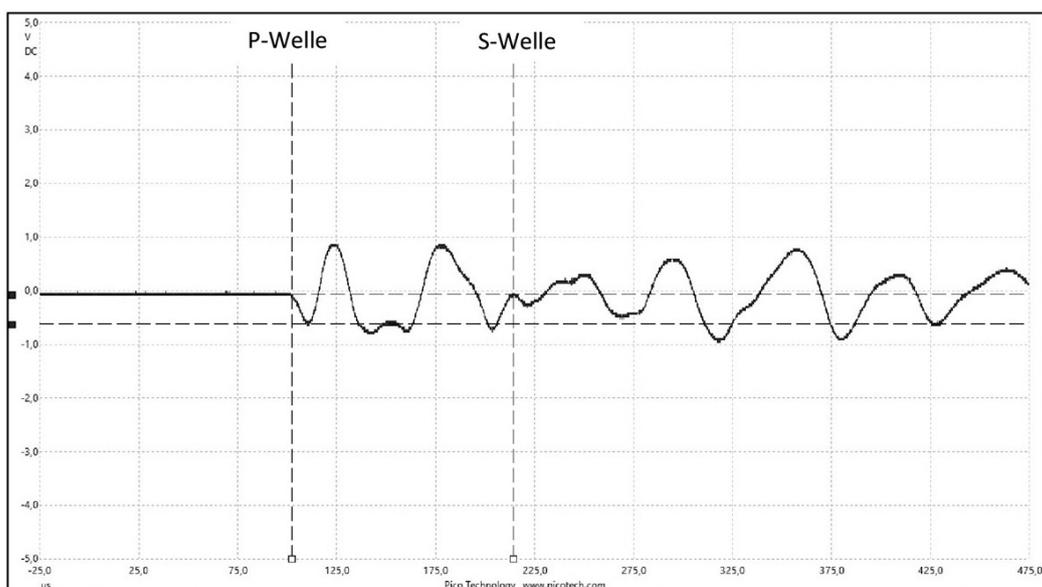


Abb. 2: Ultraschallsignal mit P- und S-Welle

Stoff	P-Wellengeschwindigkeit (m/s)
Luft	319
Wasser	1440
Eis	3200
Calcit parallel c-Achse	7730
Calcit senkrecht c-Achse	5710
Quarz	5930
Ton	1500

**Tab. 1:** P-Wellengeschwindigkeiten von exemplarischen Gesteinskomponenten und Porenfüllungen

Zahlreiche geophysikalische Modelle beschreiben den Zusammenhang zwischen den Einzelkomponenten, den Poren, den Porenhalten und der Schallgeschwindigkeit. Die Mannigfaltigkeit der auftretenden Natursteine lässt eine Modellierung der Referenzwerte nur annähernd zu. Diese können selbst innerhalb einer Gesteinsart sehr unterschiedlich sein.

Muschelkalk	Thann	3500 m/s
	Kirchheim	3800 m/s
	Esslingen	3900 m/s
	Halberstadt	4300 m/s
Savonnières	Potsdam	2500 m/s
	Zwickau	2200 m/s
	Köln	2500 m/s
Kalkstein	Kleinasien	5200 m/s
Kalkarenit	Hainburg	2300 m/s
Oolith	Hainburg	2400 m/s
	Frankfurt/O.	6800 m/s
Biomikrit	Norditalien	5600 m/s

**Tab. 2:** P-Wellengeschwindigkeiten unterschiedlicher Kalksteine

Daher bleiben nur direkte Messungen, um diese Vergleichswerte zu ermitteln. Gut sortierte petrographische Sammlungen verfügen über viele Gesteinsproben, an denen Referenzwerte ermittelt werden können. In zahlreichen Forschungsarbeiten sind Untersuchungsergebnisse zu finden, aus denen Referenzwerte für P-Wellengeschwindigkeiten einzelner Gesteine oder Gesteinsgruppen abgeleitet werden können. Sucht man jedoch Werte für regional verwendete Natursteine, wird man nur selten verwertbare Referenzwerte finden.

Ein weiteres Problem stellen Natursteine dar, die in der Vergangenheit verwendet wurden und deren Abbauorte unbekannt oder nicht mehr zugänglich sind. Als Ausweg bleiben dann Vergleichsmessungen an

identischen Gesteinen, die im Innenraum verwendet wurden und dort nur geringen Verwitterungseinflüssen ausgesetzt waren.

### 3.2. Referenzwerte für Marmor

Marmor ist das sicher weltweit am besten untersuchte Denkmalgestein. Dabei nehmen neben den griechischen Marmoren die italienischen Marmore in Mitteleuropa eine kulturhistorisch bedingte Sonderrolle ein, da sie in den vergangenen vierhundert Jahren bevorzugt im Außenbereich verwendet wurden und so den sich verändernden Klima- und Umwelteinflüssen direkt ausgesetzt waren und noch sind.

Die Abbauregionen der in Deutschland vorwiegend anzutreffenden Marmore befinden sich in der Region von Carrara (Toskana) sowie in Laas und Sterzing (Oberitalien). Diese Marmore sind nahezu 100%ig calcitisch und fein- bis mittelkristallin. Sie wurden bevorzugt für Bildhauerarbeiten verwendet und sind in vielen Schlossparkanlagen und auf Friedhöfen zu finden.

Obwohl diese Marmore nahezu vollständig aus Calcit bestehen, können sie nicht als Einkomponentensystem betrachtet werden, da die Anisotropie der Calcitkristalle ein wichtiger Faktor im Verwitterungsprozess dieser Gesteine ist.

Calcit	v(p)	$\alpha$ (thermisch)
parallel c-Achse	7730 m/s	$26 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
senkrecht c-Achse	5710 m/s	$-6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Mittelwert	6720 m/s	$10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

**Tab. 3:** Anisotropie der Calcitkristalle [3]

Daher ist die Verwendung des gerundeten Mittelwertes von 6700 m/s als Referenzwert zu diskutieren. Tatsächlich lagen die Messungen an bruchfrischen Marmorblöcken in Carrara nur in einem Fall knapp über diesem Wert. Diese Abweichung ist auf Anisotropien zurückzuführen. Auch bei Objektmessungen können daher P-Wellengeschwindigkeiten über 7000 m/s auftreten (s. Abb. 3).

Der Verwitterungsprozess beginnt schon mit der Entnahme des Rohblocks aus dem Gesteinsverband und der Einwirkung wechselnder Temperaturen auf den frischen Marmor. In Abbildung 3 ist dieser Effekt sehr gut zu erkennen. Für die Kopien der Skulpturen rund um die große Fontäne im Schlosspark Sanssouci wurden in Carrara Marmorblöcke ausgewählt und deren

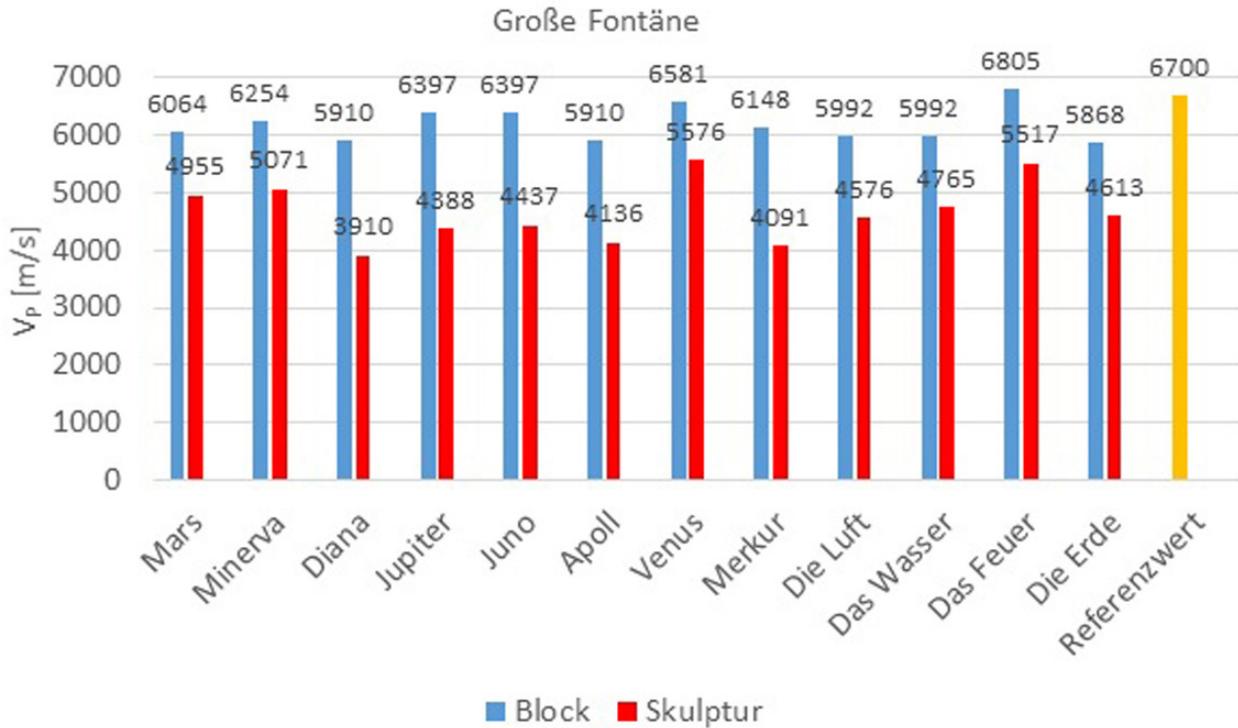


Abb. 3: Vergleich von Marmorrohblöcken und daraus für die große Fontäne im Park Sanssouci gearbeiteten Skulpturen

Ultraschallgeschwindigkeit bestimmt. Im frischen Zustand liegen die Werte nahe beim Referenzwert für den reinen Calcitkristall. Nach Fertigstellung der Skulpturen und kurzer Expositionszeit sind die Ultraschallgeschwindigkeiten an den Objekten erneut gemessen worden. Der Unterschied beträgt bis zu 2000 m/s, was in Anbetracht der kurzen Zeit eine beträchtliche Abnahme darstellt.

Im weiteren Verwitterungsverlauf nehmen die Mikrorissbildung und die langsame Füllung dieser Spaltporen mit Wasser zu, bis der Marmor zu Einzelkristallen, „Zuckermarmor“ genannt, zerfällt. Der zeitliche Verlauf dieses Prozesses kann wenige Jahrhunderte bis mehrere Jahrtausende dauern und ist von Gesteinseigenschaften, wie Kristallgrößen, Kristallgrößenverteilungen und Verzahnung der Kristalle untereinander, sowie der Bearbeitungstechnik von Steinmetzen und Bildhauern und der Wirkung von Klima- und Umwelteinflüssen abhängig. Praxiserfahrungen haben zu einem Bewertungssystem geführt, mit dessen Hilfe der Zustand eines Marmorobjektes mit Hilfe von Ultraschallmessungen beurteilt werden kann.

Diese Werte gelten für Messungen bei längerfristigen mittleren Umgebungsbedingungen, absoluter Feuchtigkeit von  $11,0\text{g/m}^3$  bei  $T=17,0^\circ\text{C}$  und  $rH=75\%$ .

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

Tab. 4: P-Wellengeschwindigkeit vp und Schadensklassen von mittel- und feinkristallinen weißen Marmoren [4]

Der Feuchtegehalt bewitterter Marmore beeinflusst die gemessenen P-Wellengeschwindigkeiten erheblich. Dabei spielt der Gehalt an flüssigem Wasser im Porenraum, die absolute Feuchte, eine entscheidende Rolle. So trocknen die Marmore im Winter aus, was mit sinkenden Schallgeschwindigkeiten einhergeht. Im Sommer findet eine Wiederbefeuchtung des Gesteinsinneren statt, verbunden mit steigenden Schallgeschwindigkeiten. Dieser Prozess ist gegenüber den äußeren Klimabedingungen um mehrere Wochen verzögert. Im Spätsommer können die Schallgeschwindigkeiten dieser Marmore 20% und mehr über den Schallgeschwindigkeiten im Winter liegen. [3]

Die mittleren Werte mit den geringsten Schwankungen liegen in den Monaten Juni bis September, was diese Monate zu den bevorzugten Monaten für Messungen im Außenbereich macht. Bei Messungen

## 5. Ultraschalldiagnostik

außerhalb dieses Zeitfensters oder in Innenräumen muss eine Feuchtekorrektur der Ultraschallmessungen erfolgen, will man Fehlinterpretationen vermeiden.

Probenbezeichnung	Ultraschallgeschwindigkeit $v_p$ [m/s]		Gesamtporosität [Vol-%]
	wassergesättigt	trocken	
Anröchte blau	3968	3735	7,8
Anröchte grün	4194	4249	5,7
Ruhrsandstein	3436	2892	5,6
Wesersandstein rot	3179	2792	7,4
Wesersandstein grau	3604	3281	6,7
Schluffstein grün	3678	3490	3,1
Schluffstein rot	3619	3468	2,6
Dietenhan	2950	2308	13,6
Aacher oben	2784	2334	16,3
Ibbenbüren I	3283	2971	15,7
Obernkirchen	2834	2519	20,3
Aacher unten	2737	2240	20,2
Ibbenbüren III	3012	2964	15,2
Ebenheid rot	2699	2041	15,7
Sand	2860	2523	17,2
Ibbenbüren II	3125	2579	17,3
Kordel	2582	2104	19,5
Burgprepprach	2576	2463	19,0
Schönbach	2931	2464	17,9
Udelfang	2469	2099	24,0
Medlitz	2860	2603	22,5
Lichtenstein	2863	2808	22,1
Seßlach	2556	2418	22,9
Heilgersdorf	2829	2651	22,0

**Tab. 5:** Ultraschallgeschwindigkeit und Gesamtporosität ausgewählter Sandsteinproben nach [7]

### 3.3. Referenzwerte für Sandstein

Die Vielfalt der vorkommenden Sandsteine in Bezug auf ihre Komponenten, Bindungen und Porenräume ist sehr groß. Sie unterscheiden sich regional, lokal und auch historisch erheblich. Entsprechend vielfältig sind ihre Ultraschallgeschwindigkeiten. Nur wenige Sandsteine, wie z.B. die Elbsandsteine, sind von überregionaler Bedeutung. In der Literatur findet man viele Ultraschallmessungen an Sandsteinen, die meist auf Laboruntersuchungen an bruchfrischen Sandsteinproben beruhen [7]. In der Regel haben auch bei den Sandsteinen die trockenen Steine niedrigere Schallgeschwindigkeiten als die nassen (s. Tab. 5).

Für die Elbsandsteine gibt es ähnliche Angaben bei [6].

Sandstein	Ultraschallgeschwindigkeit $v_p$ [m/s] luft-trocken		
	parallel zur Schichtung	senkrecht zur Schichtung	Mittelwert
Cottaer	2766	2689	2728
Postaer	2936	3039	2988
Reinhardsdorfer	2903	2743	2823

**Tab. 6:** Arithmetisches Mittel der Schallgeschwindigkeiten von Elbsandsteinproben

An diesen Messwerten erkennt man, dass neben der Gesteinsfeuchte die Anisotropie der Schichtung die Messung stark beeinflusst.

### 3.4. „90%-Regel“ für unbekannte Referenzwerte

Diese Referenzwerte wurden alle an Proben gewonnen, die aus aktiven Brüchen stammen. An Baudenkmalern sind häufig Steine zu finden, die vor mehreren Jahrhunderten abgebaut wurden und deren Eigenschaften erheblich von denen der bisher untersuchten Proben abweichen. Sind die historischen Brüche nicht mehr zugänglich, sind sie unbekannt und findet man auch in Innenräumen oder in petrographischen Sammlungen keine Vergleichsmaterialien, ist man darauf angewiesen, den Referenzwert abzuschätzen.

Ausgehend von der Überlegung, dass bei Außenexpositionen Skulpturenteile mit einer geringen Verwitterung, aber keine gänzlich unverwitterten Bereiche anzutreffen sind, hat die Messpraxis gezeigt, dass die höchsten, an einem Objekt gemessenen Schall-

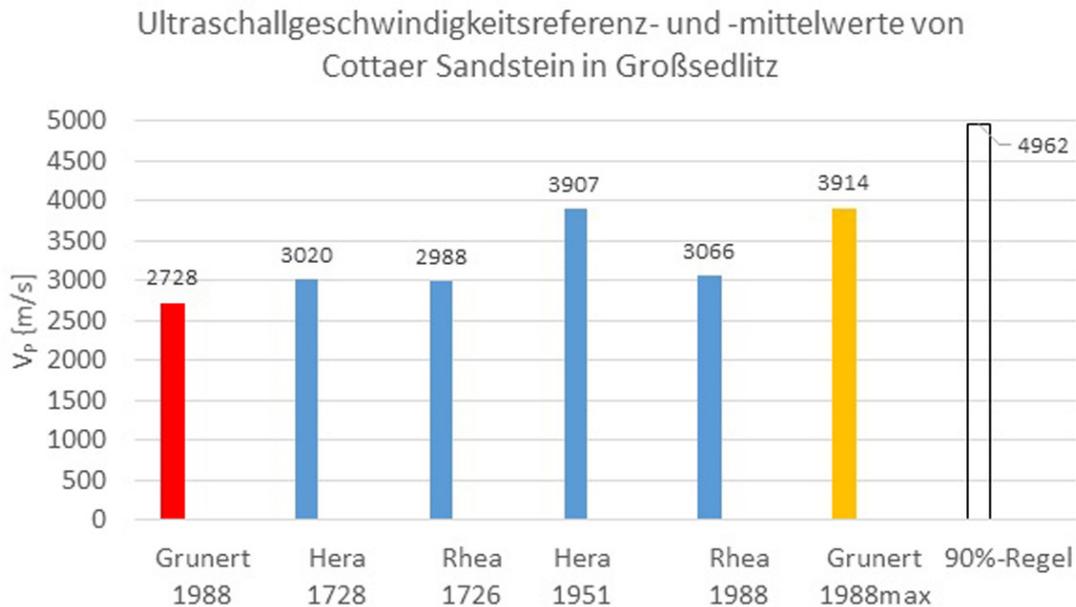


Abb. 4: „90%-Regel“ für Cottaer Sandstein

geschwindigkeiten, etwa 90% des Referenzwertes (unverwitterter Zustand) entsprechen, der für eine Zustandsbeurteilung Verwendung finden kann (s. Abb. 4).

Alle Mittelwerte der im Barockgarten von Großsedlitz untersuchten Skulpturen aus Cottaer Sandstein liegen deutlich über dem 1988 [6] im Labor gemessenen Wert von 2728m/s. Die höchste von Grunert [6] gemessene Schallgeschwindigkeit liegt mit 3914m/s knapp über dem Mittelwert der Herakopie von 1951. Der Maximalwert bei dieser Skulptur liegt bei 4466m/s und dient als Basis für die 90%-Regel, die zu einem Referenzwert für Cottaer Sandstein von 4962m/s führt. Man kann also vermuten, dass es historische Abbausituationen gab, in denen Sandsteinqualitäten gewonnen wurden, die sich deutlich von denen unterscheiden, die uns aktuell zur Verfügung stehen.

#### 4. Ultraschallmessungen im DBU-Projekt Risikoziffer

##### 4.1. Untersuchungen an Marmordenkmälern in Potsdam-Sanssouci, in München-Nymphenburg und im Großen Garten in Dresden

Im Rahmen des Projekts wurden sechs Marmordenkmäler mit Ultraschall untersucht:

- Die beiden Kentaurengruppen „Nessos und Deianira“ (Süd) und „Eurytos und Hippodameia“ (Nord) im Großer Garten von Dresden wurden in der 1. Hälfte des 18. Jahrhunderts aus Carrara Marmor gearbeitet.
- An der Kaskade im Schlosspark Nymphenburg in München befinden sich zwei Skulpturen aus der

1. Hälfte des 18. Jahrhunderts. Die „Flora“ wurde aus Laaser Marmor und der „Äolus“ aus Sterzinger Marmor gearbeitet (Abb. 6 und 7).

- Von der Fassade der Neuen Kammern im Park von Potsdam- Sanssouci stammen die beiden Skulpturen „Apoll“ und „Vestalin“. Sie entstanden in der 2. Hälfte des 18. Jahrhunderts aus Carrara Marmor und befinden sich z.Z. im Depot.

Ultraschalluntersuchungen an Skulpturen werden, je nach Aufgabenstellung, unterschiedlich durchgeführt.

Für orientierende Untersuchungen zur Feststellung des allgemeinen Erhaltungszustandes sind 20 bis 30 Messpunkte notwendig. Attribute und sonstige Details werden nicht mituntersucht. Aussagen zu Gesteinsanisotropien sind nur in Ausnahmen möglich.

Bei allgemeinen Zustandsuntersuchungen werden typische Attribute und einzelne Faltenwürfe mit einbezogen. Hierfür sind 50 bis 60 Messungen an einer Skulptur notwendig, die auch Aussagen über Gesteinsanisotropien zulassen.

Systematische Zustandsuntersuchungen dienen der Vorbereitung und Planung von Restaurierungsmaßnahmen. Hierfür sind objektdeckend mindestens 80 bis 100 Einzelmessungen notwendig. Werden im Verlauf der Messungen spezielle Probleme, wie z.B. Risse, erkannt, wird versucht, diese genauer zu untersuchen.

## 5. Ultraschalldiagnostik

Im Rahmen des Risikoziffernprojektes wurden orientierende Ultraschalluntersuchungen nach einem vorgegebenen Messschema vorgenommen, deren Ergebnisse in die Bewertungsbögen übernommen werden konnten. Die Messpunkte wurden kartiert, wie an den Skulpturen aus Nymphenburg exemplarisch dargestellt ist (s. Abb. 6 und 7).

Die Zusammenstellung der Messungen vermittelt einen Eindruck vom Zustand der einzelnen Skulpturen (s. Abb. 5).

### 4.2. Untersuchungen an Sandsteindenkmälern im Barockgarten Großsedlitz und auf dem Jüdischen Friedhof in Baiersdorf

Während im Barockgarten von Großsedlitz vier Skulpturen aus Cottaer Sandstein untersucht wurden, erfolgten die Messungen auf dem Jüdischen Friedhof in Baiersdorf an vier Grabmalen aus Bunt- und Schilfsandsteinen. Die beiden Originalskulpturen in Großsedlitz stammen aus der 1. Hälfte des 18. Jahrhunderts und befinden sich augenblicklich in einer Ausstellung in der Oberen Orangerie, also im Innenraum. Statt der Originale stehen deren Kopien „Hera“ (1951) und „Rhea“ (1988) an deren ursprünglichen Standorten im Park. An allen vier Skulpturen wurden orientierende Untersuchungen vorgenommen und die Messpunkte kartiert (s. Abb. 8)

Die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen an den Figuren von Großsedlitz wurden in der Abbildung 4 zusammengefasst.

Die Ultraschallmessungen auf dem Jüdischen Friedhof in Baiersdorf fanden an vier Grabsteinen statt. Die

Grabsteine „Sulzberger“, „Ehrenbacher“ und „935“ bestehen aus Schilfsandstein, während der Grabstein „1091“ aus Buntsandstein gearbeitet wurde. Da alle Steine deutliche Schichtungen aufwiesen, wurde in zwei Richtungen gemessen, um die damit zusammenhängenden Gesteinsanisotropien zu erfassen.

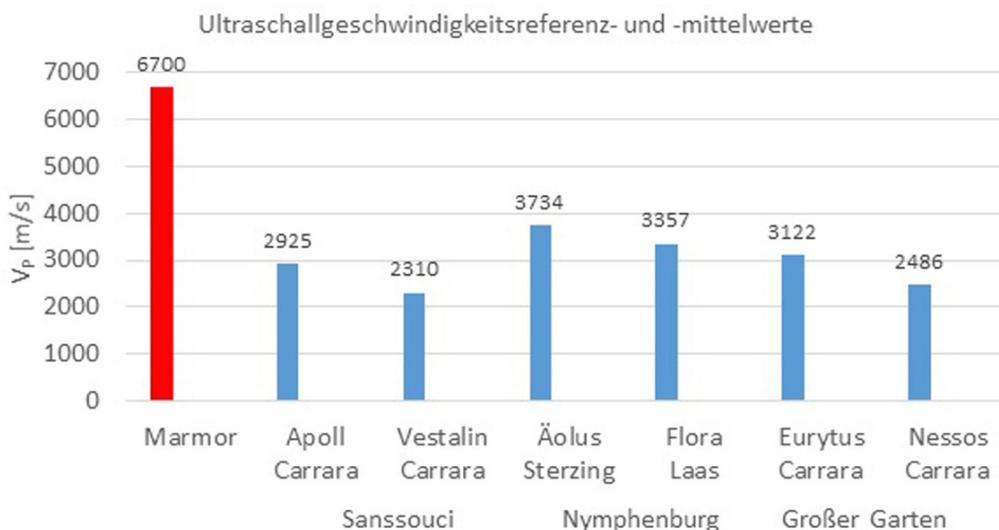
Grabmal	Gestein	P-Wellengeschwindigkeit $v_p$ [m/s]		
		vorne-hinten gegen Lagerung	rechts-links mit Lagerung	Mittelwert
Sulzberger	Schilfsandstein	1875	2572	2107
Ehrenbacher	Schilfsandstein	2248	2644	2485
935	Schilfsandstein	1829	2033	1863
1091	Buntsandstein	2570	3299	2778

**Tab. 7:** Lagerungsabhängige P-Wellengeschwindigkeiten

Die Messpunkte wurden genau nach ihrer Lage auf den Grabsteinen in die Abbildungen 9 und 10 kartiert.

Wenn man diese Ergebnisse mit anderen Schilf- und Buntsandsteinen vergleicht und, da keine Vergleichsmaterialien zur Verfügung stehen, den Referenzwert nach der „90%-Regel“ ermittelt, ergibt sich folgendes Bild (Abb. 11).

Diese Ergebnisse können in das Formular zur Berechnung der Risikoziffer übernommen werden.



**Abb. 5:** Vergleich der mittleren Ultraschallgeschwindigkeiten der untersuchten Skulpturen

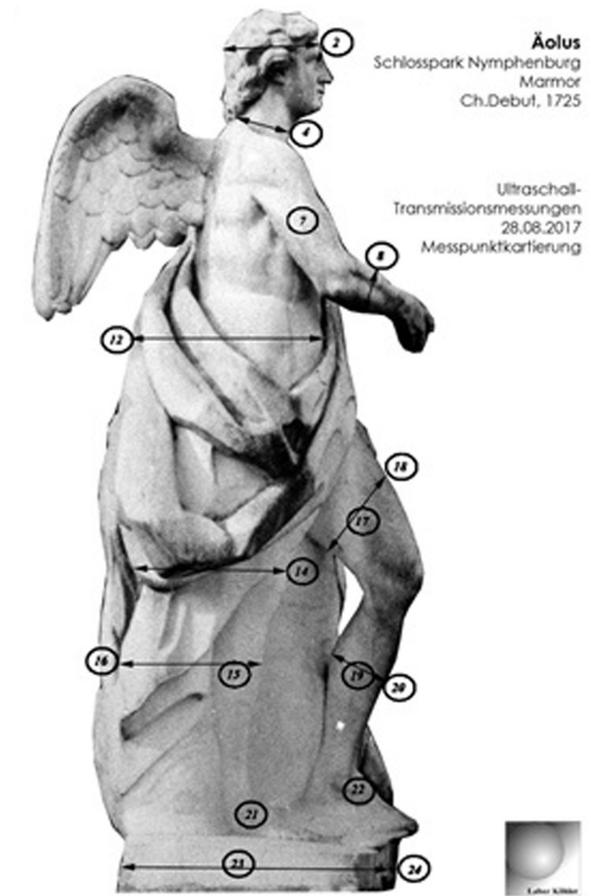


Abb. 6: Kartierung der Ultraschallmesspunkte an der Skulptur „Äolus“ im Schlosspark Nymphenburg

5. Ultraschalldiagnostik



Abb. 7: Kartierung der Ultraschallmesspunkte an der Skulptur „Flora“ im Schlosspark Nymphenburg

Juno/ Hera (Original)  
Großsedlitz, Orangerie  
Cottaer Sandstein  
Nr.30

Rauheitsmessungen  
21.04.2017  
Messpunktkartierung



Juno/ Hera (Kopie)  
Großsedlitz, Park  
Cottaer Sandstein

● Ultraschall-Transmissionsmessungen und  
● Rauheitsmessungen  
21.04.2017  
Messpunktkartierung



Kybele/ Rhea (Original)  
Großsedlitz, Orangerie  
Cottaer Sandstein  
Nr.23

Rauheitsmessungen  
21.04.2017  
Messpunktkartierung



Kybele Rhea (Kopie)  
Großsedlitz, Park  
Cottaer Sandstein

● Ultraschall-Transmissionsmessungen und  
● Rauheitsmessungen  
21.04.2017  
Messpunktkartierung

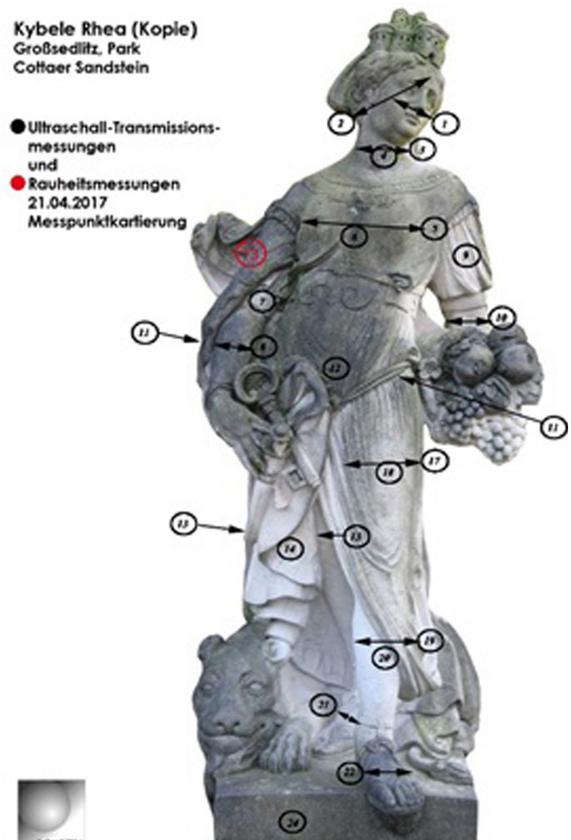


Abb. 8: Kartierung der Ultraschall- und Rauheitsmessungen an den Originalen (links) und Kopien (rechts) der Sandsteinskulpturen „Hera“ (oben) und „Rhea“ (unten)



Abb. 9: Messpunktkartierungen der Grabsteine „Sulzberger“ und „Ehrenbacher“



Abb. 10: Messpunktkartierungen der Grabsteine „935“ und „1091“

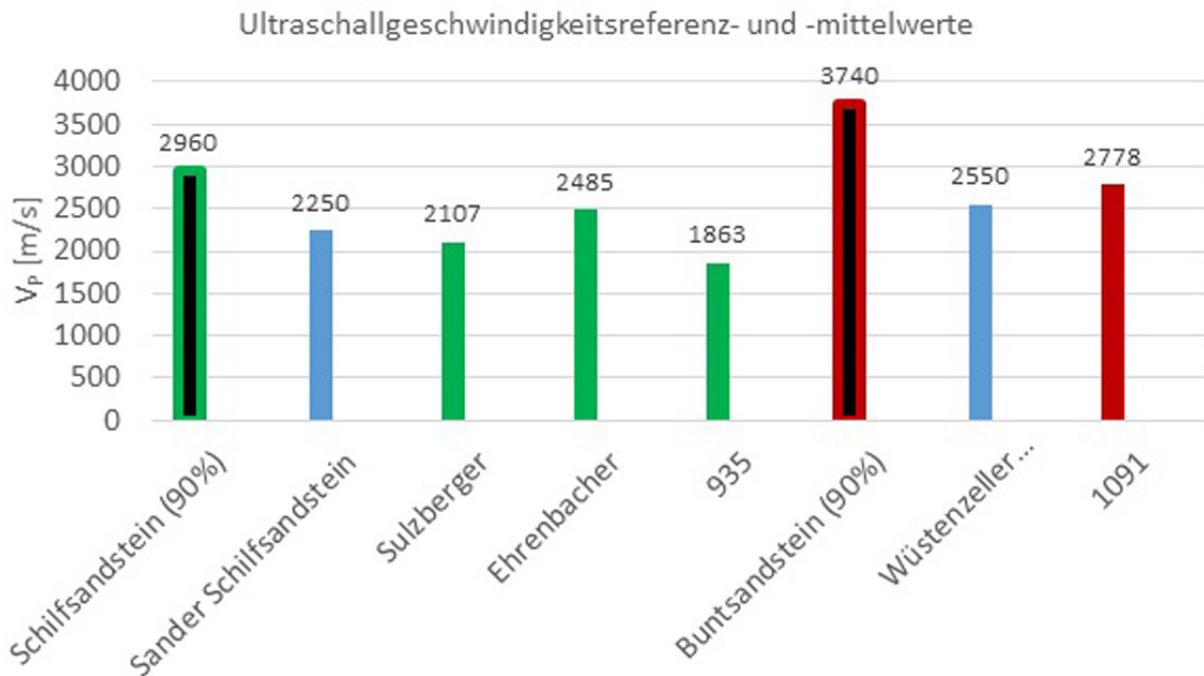


Abb. 11: Referenz- und Vergleichswerte zu den Messungen an den vier Grabsteinen in Baidersdorf

## 5. Zusammenfassung

Zerstörungsfreie Ultraschallmessungen an Natursteindenkmälern liefern genaue Informationen über deren aktuellen Gefügestand. Durch den Vergleich mit gesteinspezifischen Referenzwerten lässt sich der Verwitterungszustand der jeweiligen Objekte quantifizieren. Ultraschallmessungen sind daher ein essentieller Bestandteil für die Berechnung der Risikoziffer.

## 6. Literaturverzeichnis

[1] KÖHLER, W. (2014): Leitfaden für Ultraschallmessungen an Marmorskulpturen. In Erhaltung von Marmorskulpturen unter mitteleuropäischen Umweltbedingungen. Beiträge des 8. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin / Brandenburg am 17. Oktober 2014 in Potsdam. Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums Nr. 32: S.37-44.

[2] SCHÖN, J. H. (2004): Physical Properties of Rocks. Elsevier Amsterdam, Volume 18, Handbook of Geophysical Exploration; S.239

[3] RÜDRICH, J.M. (2003): Gefügekонтроllierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore, Dissertation, Göttingen, S.69

[4] KÖHLER, W. (1989): Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara Marmor in Potsdam- Sanssouci; Kulturabkommen, Dresden, S. 50-54, (Veröffentlichung: 1991 durch LDA Hannover)

[5] FITZNER, B. (1988): Untersuchung der Zusammenhänge zwischen dem Hohlraumgefüge von Natursteinen und physikalischen Verwitterungsvorgängen; Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrologie; Heft 29: Aachen

[6] GRUNERT, S. (1986): Der Sandstein der Sächsischen Schweiz; Abhandlungen des Staatlichen Museums für Mineralogie und Geologie zu Dresden; Band 34; Leipzig



Wolfram Köhler

## 6. 3D-Rauheitsmessungen für das Monitoring von Natursteinoberflächen

### Zusammenfassung

An Skulpturen aus Marmor und Sandstein ist die Zunahme der Oberflächenrauheit ein sicherer Indikator für die fortschreitende Verwitterung. Die Rauheit kann mittels mechanischer Abtastverfahren (Perthometer), optischer Verfahren (TRACEiT) oder einfach durch haptischen Vergleich mit genormten Schleifpapieren gemessen werden. Jede dieser Methoden ist für ein Langzeitmonitoring oder zur Bestimmung des Reinigungsgrades geeignet. Von den im Projekt untersuchten Marmorskulpturen weisen Äolus und Flora aus grobkörnigem Laaser und Sterzinger Marmor im Schlosspark Nymphenburg die höchsten Rauheitswerte auf. Die Oberflächen von Apoll und Vestalin aus Carrara Marmor in Potsdam sind weniger aufgeraut. Die Anwendung für die Beurteilung des Reinigungsgrades wird am Beispiel des Denkmals für Schulze-Delitzsch aufgezeigt.

### Abstract

Increasing surface roughness is an appropriate indicator for advancing deterioration of marble and sandstone sculptures. To measure surface roughness mechanical scanning (Perthometer), optical scanning (TRACEiT) or simply manual scanning in comparison with standardized sandpaper can be used. Each method is appropriate for long term monitoring or for assessing the degree of cleaning. Among the sculptures investigated within the current research project the figures Aeolus and Flora in the Park of Nymphenburg Castle made out of Sterzinger and Laas marble show the highest roughness values. The surfaces of Apoll and Vestalin in Potsdam made from Carrara marble show lesser degree of roughness. Measurements carried out on the Schulze-Delitzsch monument in Berlin demonstrate the possibility of measuring the degree of cleaning of marble surfaces.

### 1. Einleitung

Natursteindenkmale sind an ihrem Aufstellungsort, neben Klima- und Umwelteinflüssen, zahlreichen anthropogen bedingten Schadfaktoren ausgesetzt. Die dadurch ausgelösten Verwitterungsprozesse sind sehr komplex und führen neben Rissbildungen und Auflockerungen im Gesteinsinneren zu Lösungsvorgängen

und Materialverlusten an der Denkmaloberfläche. Da damit auch der Verlust der künstlerisch wertvollen Oberfläche einhergeht, kommt deren Erhaltung eine hervorragende Bedeutung zu.

Voraussetzung dafür ist die genaue Beschreibung der Veränderung der Oberfläche, die meist mit einer Zunahme ihrer Rauheit einhergeht. Daher ist eine objektive quantitative Messung hilfreich, wenn diese leicht, schnell und zerstörungsfrei durchzuführen ist. Die infrage kommenden Mess- und Auswertungsmethoden wurden ursprünglich für die Metallbearbeitung entwickelt. Es muss untersucht werden, ob sie auch zur Beurteilung von Natursteinoberflächen geeignet sind und wieweit sie dafür modifiziert werden können.

### 2. Rauheitsmessungen an Natursteinoberflächen

#### 2.1. Rauheit und Topographie von Festkörperoberflächen

Die Rauheit (oder veraltet und nicht mehr normgerecht Rauigkeit oder Rauigkeit) ist ein Begriff aus der Oberflächenphysik, der die Unebenheit der Oberflächenhöhe bezeichnet. Zur quantitativen Charakterisierung der Rauheit gibt es unterschiedliche Berechnungsverfahren, die jeweils auf verschiedene Eigenheiten der Oberfläche Rücksicht nehmen. [1]

Der Begriff Rauheit bezeichnet eine Gestaltabweichung dritter bis fünfter Ordnung bei technischen Oberflächen nach DIN 4760. [2]

Gestaltabweichung	Bezeichnung
1. Ordnung	Formabweichungen
2. Ordnung	Welligkeit
3. Ordnung	Rauheit in Form von Rillen
4. Ordnung	Rauheit in Form von Riefen, Schuppen, Kuppen
5. Ordnung	Rauheit der Gefügestruktur
6. Ordnung	Gitteraufbau des Werkstoffs

**Tab. 1:** Gestaltabweichungen von Festkörperoberflächen nach DIN 4760

## 6. 3D-Rauheitsmessungen

Bei der Beurteilung von Natursteinoberflächen sind Gestaltabweichungen der 3. und 4. Ordnung von besonderem Interesse. Die Form von Oberflächen bezeichnet man als Topografie einer Oberfläche. Die verfügbaren Methoden zu Messung der Rauheit können in drei Kategorien eingeteilt werden:

- Manuelle Methoden (Rugotest, Schleifpapiervergleich)
- Profilbasierte Methoden (Tastschnittverfahren)
- Flächenbasierte Methode (Konfokalmikroskopie, konoskopische Holografie, Fokusvariation, Weißlichtinterferometrie, 3D-Laser scanningmikroskopie, 3D-Schattentriangulation)

Mit Hilfe unterschiedlicher Messungen und sehr differenzierter Auswertungen können unterschiedlichste Oberflächenformen beschrieben, differenziert und quantifiziert werden. Es lassen sich etwa 20 unterschiedliche Parameter ermitteln, die je nach Problemstellung, einzeln oder in verschiedenen Kombinationen Verwendung finden.

### 2.2. Messung der Oberflächenrauheit

Die Messungen und deren Auswertungen sind in zahlreichen DIN- und ISO-Vorschriften geregelt, die nahezu ausschließlich aus dem Bereich der Metallbearbeitung stammen. Für einfache Praxismessungen werden manuelle Methoden eingesetzt, die auf dem optischen und haptischen Vergleich von realen Oberflächen mit definierten Rauheitsnormalen beruhen. In metallverarbeitenden Betrieben ist diese Methode als „Rugotest“ weit verbreitet. Zahlreiche Rauheitsnormale aus Nickellegierungen stehen für alle denkbaren Oberflächenbearbeitungsformen mit definierten Rauheitsabstufungen zur Verfügung. Für die Beurteilung von verwitterten Natursteinoberflächen werden definierte Schleifpapiervergleichsmuster eingesetzt. [3]

Die moderne Oberflächenmesstechnik begann mit den Arbeiten von Johannes Perthen in den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts. Er entwickelte das erste Tastschnittgerät, das sogenannte Perthometer und legte die mathematischen Grundlagen für die Auswertung der Messungen. [4]

Das Tastschnittverfahren ist eine Methode zur messtechnischen Beschreibung von Oberflächen. Bei der Rauheitsmessung mit mechanischen Tastschnittgeräten wird eine Tastspitze aus Diamant mit konstanter

Geschwindigkeit über die Oberfläche gezogen. Das Messprofil ergibt sich aus der vertikalen Lageverschiebung der Tastspitze, die in der Regel durch ein induktives Wegmesssystem erfasst wird. Zur messtechnischen Beschreibung einer Oberfläche werden aus dem Messprofil genormte Rauheitskenngrößen gewonnen. [5]

Beim mechanischen Tastschnitt tritt die Tastspitze direkt mit der Oberfläche in Kontakt, weshalb dieses Verfahren auch als taktiles bzw. berührendes Messverfahren bezeichnet wird.

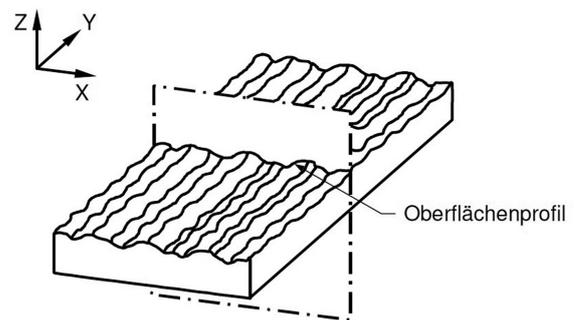


Abb. 1: Oberflächenschnitt [6]

Das gemessene Rauheitsprofil hat folgende Form (Abbildung 2):

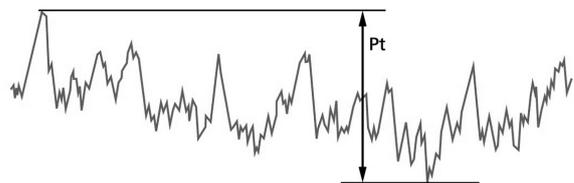


Abb. 2: Ungefiltertes Rauheitsprofil

Dieses Profil enthält neben der eigentlichen Oberflächenrauheit noch die Welligkeit der Oberfläche. Diese muss mit Hilfe geeigneter Filterfunktionen herausgerechnet werden, ehe die Rauheitskenngrößen berechnet werden können. Die wichtigsten Rauheitskenngrößen sind:

- $R_a$  – arithmetischer Mittelrauwert [ $\mu\text{m}$ ]
- $R_z$  – gemittelte Rautiefe [ $\mu\text{m}$ ]
- $R_t$  – Gesamthöhe des Rauheitsprofils [ $\mu\text{m}$ ]

Die Berechnungsformeln sind in der DIN EN ISO 4287 festgelegt.

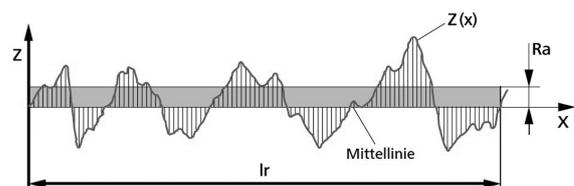


Abb. 3: arithmetischer Mittelrauwert  $R_a$

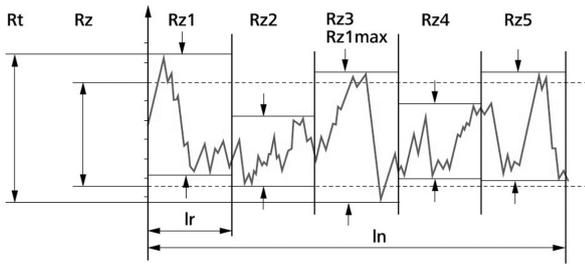


Abb. 4: gemittelte Rautiefe  $R_z$  und Gesamthöhe des Rauheitsprofils  $R_t$

Häufig beschreibt die gemittelte Rautiefe  $R_z$  den Zustand einer Oberfläche recht gut. In der DIN ISO 1302 erfolgt eine Unterteilung in zwölf Rauheitsklassen. Ein  $R_a$ -Wert von  $80 \mu\text{m}$  entspricht etwa einem  $R_z$ -Wert von  $200 \mu\text{m}$ , wie er bei verwitterten Natursteinoberflächen auftreten kann.

Rauheitsklasse N	Rauheitswert		Rauheitsklasse N	Rauheitswert	
	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$		$R_a [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$
1	0,025	0,29	7	1,6	7,87
2	0,05	0,55	8	3,2	15,6
3	0,1	0,91	9	6,3	40
4	0,2	1,74	10	12,5	63
5	0,4	2,60	11	25	100
6	0,8	4,65	12	50	160

**Tab. 2:** Zuordnung der Rauheitsklassen N zu den Rauheitswerten  $R_a$  und  $R_z$  (DIN ISO 1302)

Der Nachteil dieser Messmethode besteht darin, dass sich die Auswertung auf fünf Teilstrecken beschränkt, so dass die Gefahr besteht, keine für den Gesamtzustand des Objekts repräsentativen Messstrecken ausgewählt zu haben. Diesen Nachteil kann man nur durch mehrere Messungen an unterschiedlichen Positionen ausgleichen. Darüber hinaus benötigen die entsprechenden Handgeräte eine relativ große und ebene Auflagefläche, auf der sie kippstabil positioniert werden können. Diese Situation ist bei Natursteinendenkmälern selten gegeben. Kleinere Tastschnittgeräte mit kleineren Auflageflächen haben einen begrenzten Messbereich, der nur bis  $R_z = 50 \mu\text{m}$  reicht und damit gröbere Rauheiten nicht erfassen kann.

### 2.3. 3D-Messung der Oberflächenrauheit

In den letzten Jahren wurden mehrere optische Messsysteme entwickelt, die eine berührungslose 3D-Oberflächenrauheitsmessungen ermöglichen. Nahezu alle

3D-Methoden erstellen eine Oberflächentopographie, aus der die Rauheitskenngrößen berechnet werden können, die in der ISO 25178 beschrieben sind.

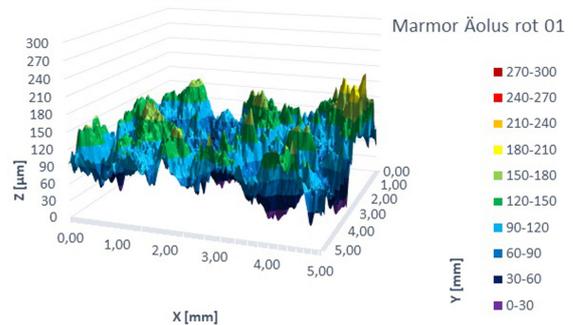


Abb. 5: Topographie einer Marmoroberfläche

Die wichtigsten 2D-Kenngrößen  $R_a$ ,  $R_z$  und  $R_t$  werden bei 3D-Messungen zu  $S_a$ ,  $S_z$  und  $S_t$ . Die Berechnungsvorschriften ähneln sich, beziehen sich aber auf die gesamte Messfläche. Die große, bei 3D-Messungen anfallende Datenmenge erlaubt, neben den Amplitudenkenngrößen die Berechnung weiterer Kennwerte, mit denen sich die Oberflächen charakterisieren lassen.

- Amplitudenkenngrößen
- Räumliche Kenngrößen
- Hybride Kenngrößen
- Funktionsorientierte Kenngrößen
- Strukturorientierte Kenngrößen

Hierbei kommt besonders den funktionsorientierten Kenngrößen eine besondere Bedeutung zu, da sie es möglich machen, Oberflächen, die durch Erhebungen (Schleifpapier) gekennzeichnet sind, von denen zu unterscheiden, die durch Rillen (Schleifspuren) geprägt werden. Beide Formen haben oft gleiche oder ähnlich  $S_a$ - und  $S_z$ -Werte. Hier ist die Konstruktion der Flächenmaterialanteilkurve, der Abbot-Kurve hilfreich.

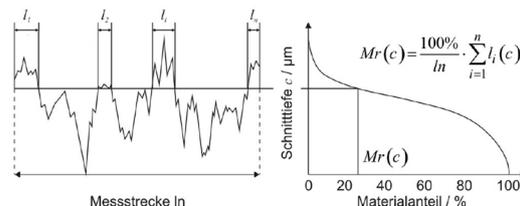


Abb. 6: Konstruktion der Abbot-Kurve [7]

Die einzelnen Oberflächenformen unterscheiden hinsichtlich ihrer Abbot-Kurven erheblich.

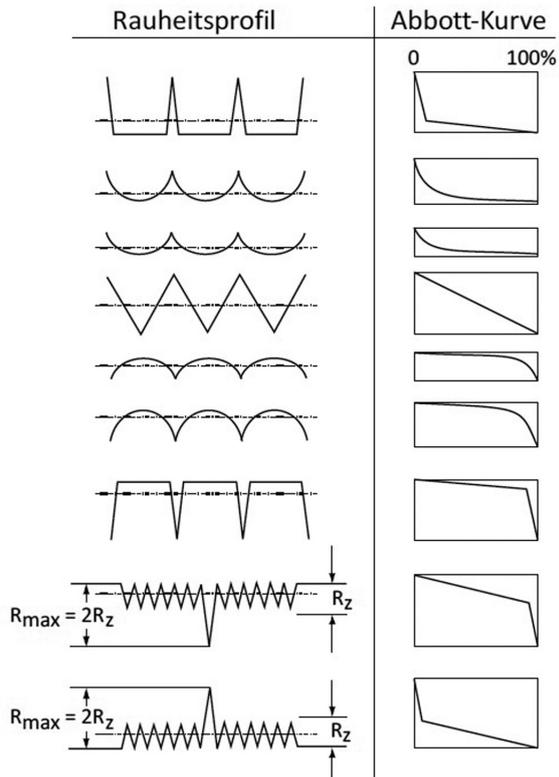


Abb. 7: Oberflächenformen und Abbot-Kurven [8].

Die zur Verfügung stehenden Untersuchungsmethoden liefern alle, für eine Oberflächenbeurteilung notwendigen Kenngrößen. Diese Geräte sind für den Werkstatt- und Laborbereich gut geeignet, aber nur in Ausnahmefällen für insitu-Untersuchungen an Denkmälern einsetzbar.

#### 2.4. Rauheitsmessungen mit 3D- Schattentriangulation

Eines der wenigen mobilen Messgeräte, das auch unter komplizierten Außenbedingungen eingesetzt werden kann, ist das TRACEiT der Firma INNOWEP in Würzburg. Das TRACEiT®-System berechnet mit Hilfe der „shape from shading“-Technologie (3D-Schattentriangulation) aus den Schattenwürfen dreier Schräglichtaufnahmen der Objekt Oberfläche deren Topographie auf einer 5 mm x 5 mm großen Fläche mit einer Ortsauflösung von wenigstens 10 µm (optional 3µm) und einer Höhenauflösung von 1,5 µm (s. Abb. 8).

Das Messsystem besteht aus einem Notebook und einem Messkopf, der mit einem USB-Kabel angeschlossen ist und mehrere Stunden netzunabhängig betrieben werden kann (s. Abb. 9).

Die Messung ist absolut zerstörungsfrei. Der Messkopf wird auf die zu untersuchende Oberfläche für etwa 30 Sekunden aufgesetzt (s. Abb. 10).

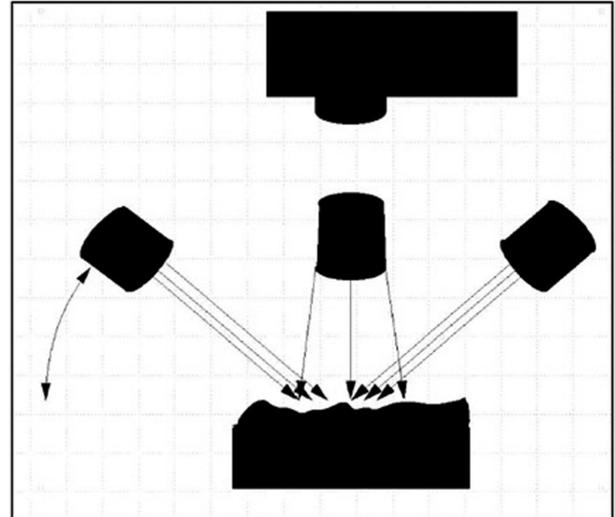


Abb. 8: Messprinzip von TRACEiT® (INNOWEP GMBH) [9]

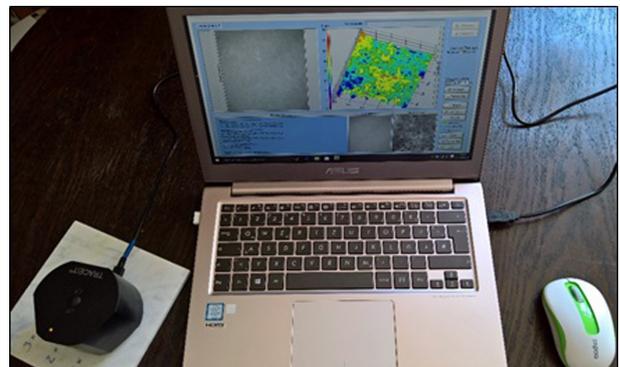


Abb. 9: TRACEiT®-System mit Messkopf (links) (Foto: Irene Köhler 2016)



Abb. 10: Messung der Rauheit einer Marmoroberfläche durch Aufsetzen des Messkopfes (Foto: Irene Köhler 2016)

Das Messfenster zeigt die wichtigsten Ergebnisse und die 3D-Topographie der Oberfläche (s. Abb. 11).

In der Regel beruht die Auswertung auf einem Datensatz von 500 x 500 Messpunkten, der optional auf 1000 x 1000 oder 1536 x 1536 Messpunkte erhöht werden kann. Für eine statistische Absicherung der

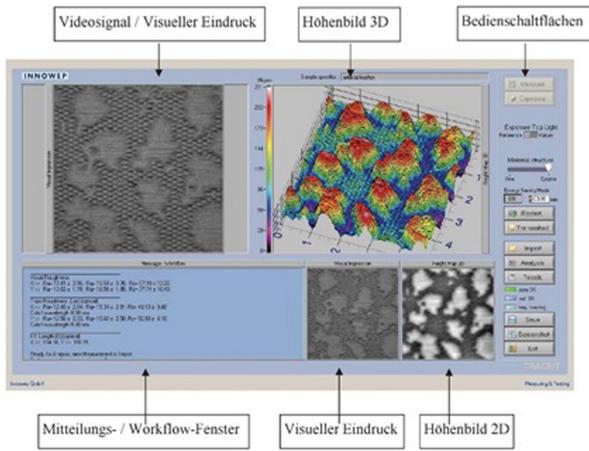


Abb. 11: Messfenster der TRACEiT®-Software (INNOWEP GMBH) [9]

Ergebnisse sind mindestens fünf Einzelmessungen empfehlenswert. Es können  $S_t$ -Werte bis 750  $\mu\text{m}$  gemessen werden.

### 3. Aussagemöglichkeiten der Rauheitsmessungen

#### 3.1. Rauheit von Schleifpapieroberflächen

In Analogie zum Rugotest in der Metallbearbeitung hat SNETHLAGE 2012 haptische Vergleichsuntersuchungen von verwitterten Natursteinoberflächen mit Hilfe von Schleifpapieren angeregt. [10]. Die untersuchten Papiere eines Herstellers mit den Körnungen P40 bis P1200 zeigten, dass nicht alle Sandpapiere in eine gemeinsame Klassifizierung einzuordnen waren und grundlegende Unterschiede zwischen groben und feineren Papieren bestehen (s. Abb. 12).

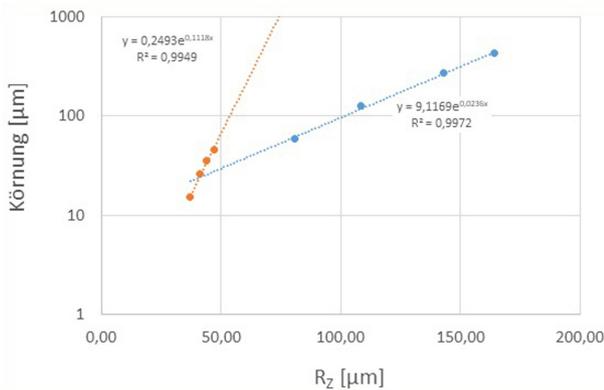


Abb. 12: Unterschied zwischen „grobere“ Papieren (blau) und „feinere“ Papieren (rot)

Korreliert man dies mit den in der DIN ISO 1302 vorgeschlagenen Rauheitsklassen N7 bis N12, so findet man folgende Einteilung:

Rauheitsklasse N	Rauheitswert		Taktile Rauheit N	Rauheit $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Schleifpapier P
	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]			
7	1,6	7,87		...20	
8	3,2	15,6	0	20...35	1200
9	6,3	40	1	35...50	400
10	12,5	63	2	50...80	240
11	25	100	3	80...120	120
12	50	160	4	120...	60

Tab. 3: Zuordnung der Rauheitsklassen N7 bis N12 zu den Rauheitswerten  $R_a$ ,  $R_z$  und zu den taktilen Rauheiten 0 bis 4 mit ihren Rauheitsbereichen und Schleifpapierkörnungen

Praxistests werden zeigen, ob diese, an die DIN ISO 1302 angelehnte Einteilung ausreicht oder ob sie feiner gewählt werden muss, um die Realzustände von verwitterten Natursteinoberflächen gut beschreiben zu können.

#### 3.2. Referenzwerte der Rauheitsmessungen an Natursteinoberflächen

Für die Beurteilung des Zustandes von Natursteinoberflächen sind Bezugs- oder Referenzwerte notwendig, mit denen man die gemessenen Werte vergleichen kann. Die Verwitterung führt in der Regel zu einer Rauheitszunahme der Oberfläche. Diese Zunahme geht mit einem zunehmenden Materialverlust einher. Dies führt zu einer Rückwitterung bei gleichbleibender maximal möglicher Oberflächenrauheit.

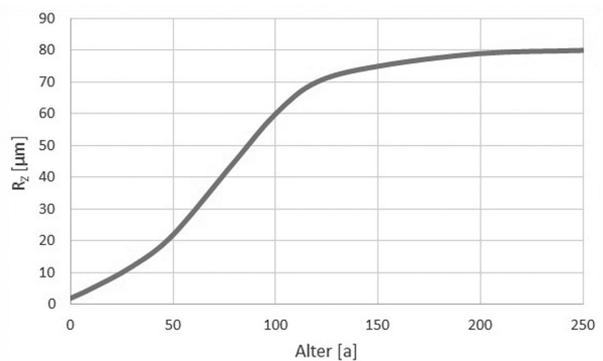


Abb. 13: Schematische Entwicklung der  $R_z$ -Werte im Laufe der Gesteinsverwitterung

Messerfahrungen haben gezeigt, dass Gesteinskörner ihren Halt im Gesteinsverband verlieren, wenn sie 1/4 bis 1/3 ihrer Größe freigewittert sind. Daraus lassen sich bei bekannten Korngrößen zu erwartende maximale  $R_z$ -Werte ableiten und als Referenzwerte verwenden. Dieser Zusammenhang gilt jedoch nicht bei Verwitterungsprozessen, die mit Krustenbildungen verbunden sind.

Gestein	Korngrößen [ $\mu\text{m}$ ]	maximale Rauheit RZ [ $\mu\text{m}$ ]
Carrara Marmor	100...500	25...150
Laaser Marmor	300...2500	75...800
Sterzinger Marmor	800...4500	200...1500
Cottaer Sandstein	80...200	20...70
Postaer Sandstein	250...500	65...160
Sander Schilfsandstein	80...180	20...60
Wüstenzeller Buntsandstein	80...150	20...50

**Tab. 4:** Größenordnungen der möglichen größten R<sub>Z</sub>-Werte von Oberflächen einiger verwitterter Gesteine

### 3.3. Interpretationsmöglichkeiten

In der Regel werden nur die Veränderung der RZ-Werte und der Oberflächentopographiegrafiken zur Beurteilung von Denkmaloberflächen verwendet. Damit können sehr unterschiedliche Oberflächenbeurteilungen vorgenommen werden:

- Erhaltungszustand
- Reinigungszustand
- Oberflächenbeschichtung
- Oberflächenstruktur
- Risscharakterisierung
- Langzeitmonitoring

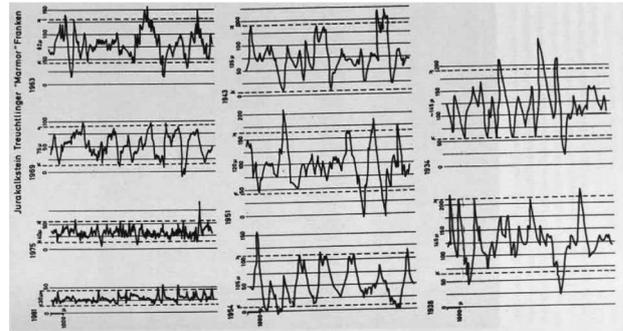
Zustandsänderungen gehen bei Erosionsvorgängen mit Rauheitszunahmen einher, während Krustenbildungen weitaus komplexer sind und auch zu Rauheitsreduzierungen führen können. Reinigungsprozesse verändern gleichfalls die Oberflächenstrukturen und können so durch Wiederholungsmessungen überprüft werden. [11] Gleiches gilt auch für Beschichtungen, die meist zur Glättung der Oberfläche und damit zu einer R<sub>Z</sub>-Wert Verringerung führen. Darüber hinaus ist es auch möglich, auf Gemälden den Pinselduktus zu charakterisieren und Hinzufügungen festzustellen. Weitere Anwendungen betreffen Messungen der Rissweiten und des Rissverlaufs (glatte oder verzahnte Risse).

Eine besondere Anwendung betrifft das Langzeitmonitoring von Oberflächenveränderungen. Voraussetzung dafür sind Wiederholungsmessungen in hinreichend großen Zeitabständen an identischen Messflächen. Es müssen aber mehrere Messungen an der identischen Messfläche durchgeführt werden, um statistisch relevante Messwerte miteinander vergleichen zu können.

## 4. Rauheitsmessungen an Denkmälern

### 4.1. Rauheitsmessungen an Kunstwerken

Anfang der 1980er Jahre erfolgten durch W.-D. GRIMM die ersten systematischen Rauheitsmessungen mittels Perthometer an Grabsteinen auf verschiedenen Münchner Friedhöfen [12]. Ziel dieser Untersuchungen war die Messung des Verwitterungsfortschrittes an bewitterten Natursteinoberflächen.



**Abb. 14:** Rauheitsmessungen an Münchner Grabsteinen [12].

Diese Arbeiten wurden durch SNETHLAGE und SIMON in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts an Marmorproben fortgesetzt [13]. Es folgten die ersten systematischen Flächenuntersuchungen mittels optischer Methoden durch GORETZKI und WEINHOLD [14].

Neben der Kontrolle von Reinigungsmethoden an Oberflächen verschiedenster Kunstwerke kam das TRACiT auch bei der Untersuchung von Gemälden zum Einsatz. [15, 16, 17] Seit 2016 wird das TRACiT durch KÖHLER routinemäßig für unterschiedliche Fragestellungen bei Untersuchungen an Denkmälern eingesetzt und gemeinsam mit INNOWEP im Rahmen von Forschungsprojekten für diesen Anwendungsbereich weiterentwickelt [18].

### 4.2. Rauheitsmessungen an Marmordenkmälern

In den vergangenen Jahren wurden an einer Reihe von Marmordenkmälern Oberflächenmessungen durchgeführt, um unterschiedliche Marmore und ihre Verwitterungszustände miteinander zu vergleichen. Im Folgenden sind die Ergebnisse der Messungen an Denkmälern in Potsdam-Sanssouci, in München Nymphenburg und im Großen Garten in Dresden exemplarisch dargestellt (s. Abb 15).

Weitere Untersuchungen fanden 2016 am Marmordenkmal Schulze-Delitzsch in Berlin-Mitte statt. Das Denkmal wurde 1899 eingeweiht. Es steht auf einer Verkehrsinsel auf einem viel befahrenen Platz (s. Abb. 16).

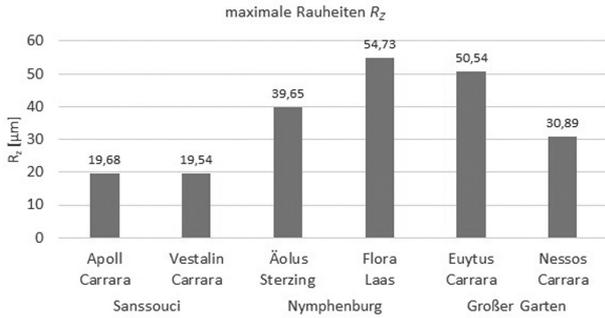


Abb. 15: Gegenüberstellung der Rauheitsmessungen an Marmor-  
denkmälern in Potsdam, München und Dresden.

Vor 25 Jahren erfolgte eine Acrylharzvolltränkung und 2016 eine Reinigung, begleitet durch Ultraschall- und Oberflächenuntersuchungen. Dabei wurden die unterschiedlichen Oberflächenzustände und die Reinigungsergebnisse untersucht und bewertet (s. Tab. 5 und Abb. 17).

Die Topographiediagramme bestätigen diese Ergebnisse (s. Abb. 18).

Auch bei der Beurteilung von Reinigungsmaßnahmen ergibt sich ein eindeutiges Topographiebild. Auffällig ist die notwendige Vergrößerung der Z-Skalierung auf 300  $\mu\text{m}$ , da die vorliegende biogene Krustenbildung zu einer starken Erhöhung der Oberflächenrauheit geführt hat (s. Abb. 19).

Solcherart Untersuchungen gestatten eine Optimierung der Reinigungsmethoden zur Vermeidung von Oberflächenverlusten.

Messung	Beschreibung	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]			Rauheitsklasse N
		X	Mittel	Y	
SD10	geringe Erosion	17,42	18,33	19,24	7
SD04	mittlere Erosion	26,56	25,16	23,76	8
SD11	größere Erosion	33,23	30,71	28,18	8
SD09	Gefü- geauf- locke- rung	39,41	36,37	33,32	9
SD01	bio- gene Kruste unge- reinigt	42,59	46,67	50,75	9
SD02	bio- gene Kruste gerei- nigt	12,95	13,07	13,12	7
SD06	bio- gene Kruste unge- reinigt	58,05	59,79	61,53	10
SD07	bio- gene Kruste gerei- nigt	19,50	19,48	19,46	7

**Tab. 5:** Ergebnisse der Messungen der Oberflächenrauheit



Abb. 16: Schulze-Delitzsch-Denkmal in Berlin-Mitte (Fotos: Burkhard Bluhm 2016)

## 6. 3D-Rauheitsmessungen

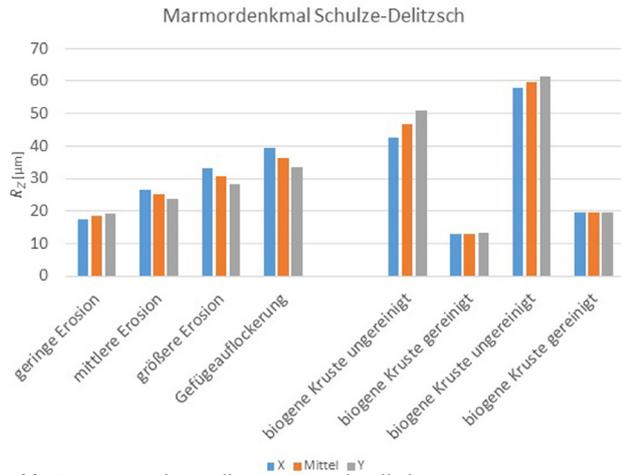


Abb. 17: Gegenüberstellung unterschiedlicher Verwitterungszustände und der Reinigungsergebnisse anhand von RZ-Messungen

### 4.3. Rauheitsmessungen an Sandsteindenkmälern

Im Rahmen dieses DBU-Projekts erfolgten auch Rauheitsuntersuchungen an verschiedenen Sandsteinfliguren und Grabsteinen [19]. Die vier Figuren im Barockgarten von Großsedlitz wurden im 18. Jahrhundert aus Cottaer Sandstein geschaffen und im 20. Jahrhundert im Park durch Kopien ersetzt.

Drei Grabsteine „Sulzberger“, „Ehrenbacher“ und „935“ auf dem Jüdischen Friedhof in Baiersdorf in Mittelfranken sind aus Schilfsandstein, während der Grabstein „1091“ aus Buntsandstein besteht. Sie stammen alle aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts (s. Abb. 20).

## 5. Ausblicke und Perspektiven

Die Methoden der flächenhaften optischen Rauheitsmessungen stellen eine wertvolle Ergänzung der zerstörungsfreien Monitoringmethoden für Oberflächen von Denkmälern dar. Das betrifft sowohl die Bewertung von Restaurierungsmaßnahmen als auch die Langzeitkontrolle des Erhaltungszustandes von Denkmälern. Eine wesentliche Voraussetzung für die Eignung der zur Verfügung stehenden Messsysteme ist die Möglichkeit, diese für insitu-Messungen einsetzen zu können, wie es mit dem TRACEiT-System machbar ist.

Die weiteren Messerfahrungen müssen zeigen, welche Auswertungsmethoden für diesen Einsatzbereich besonders geeignet sind und gegebenenfalls optimiert werden müssen. Dabei sollte man sich

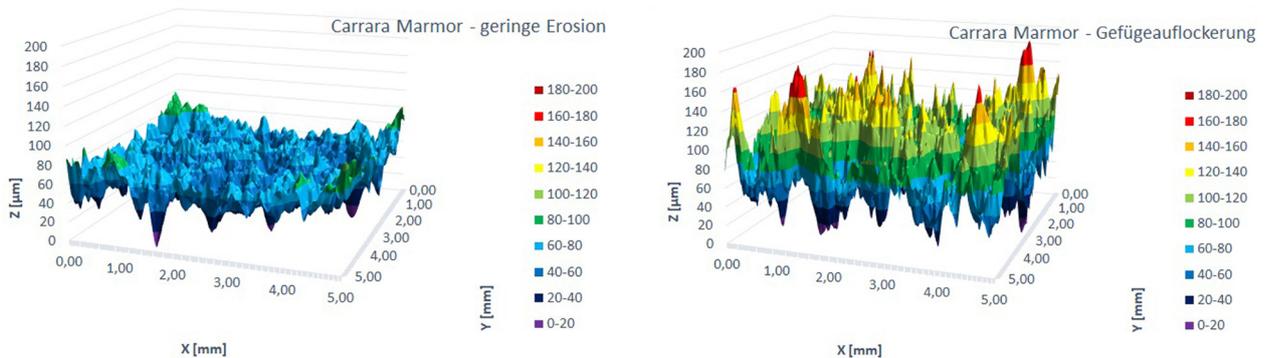


Abb. 18: Gegenüberstellung der Topographien einer gering verwitterten Marmoroberfläche und einer Oberfläche mit Gefügauflockerung

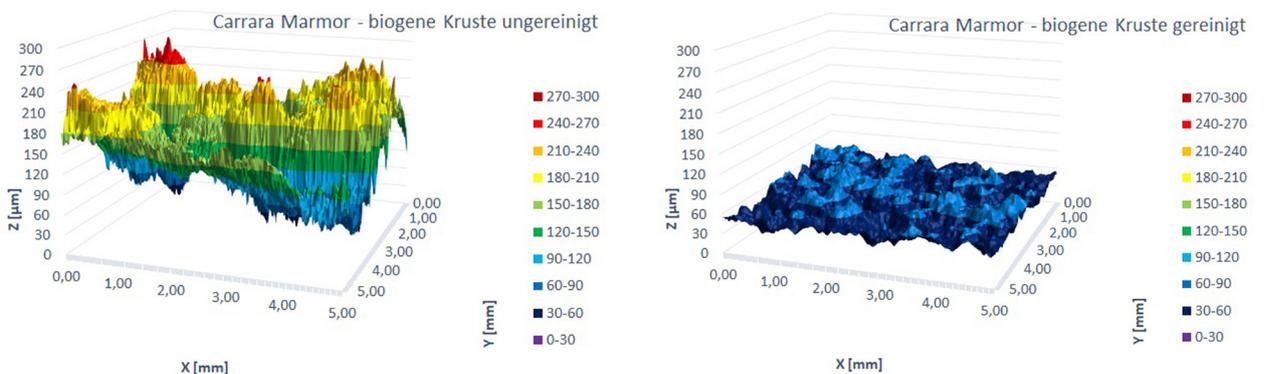
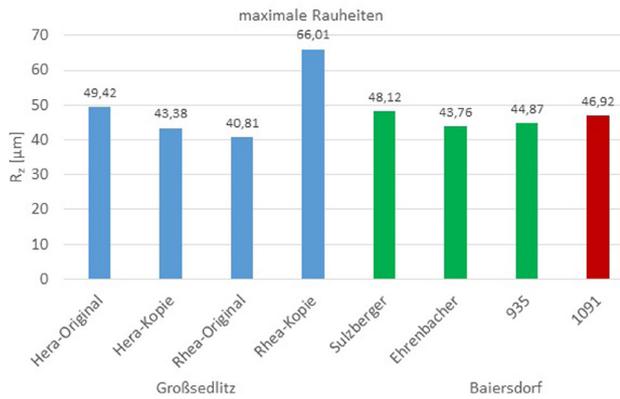


Abb. 19: Topographievergleich vor und nach der Reinigung einer biogenen Kruste.



**Abb. 20:** Maximal gemessene  $R_z$ -Werte an ausgewählten Sandsteinkmalern

weitgehend an die DIN-Vorschriften anlehnen, die für den Bereich der Metallbearbeitung existieren, ohne sie unbedingt unverändert zu übernehmen. Ein Weg könnte die Weiterentwicklung der bestehenden WTA-Merkblattes 3-9-95/D „Bewertung von gereinigten Werksteinoberflächen“ sein. Für die Qualifizierung dieser Methode als Monitoringwerkzeug ist die Erarbeitung eines Leitfadens für ihre Anwendung in der Denkmalpflege sinnvoll, der auch geeignete Messstrategien empfiehlt.

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] <https://de.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/Rauheit>
- [2] DIN 4760; DIN 4760:1982 Gestaltabweichungen, Begriffe Ordnungssystem
- [3] SNETHLAGE R. (2014): Marmorkonservierung: Maßnahmen mit einer Risikoziffer begründen und entscheiden – Realistischer Wunsch oder Fiktion? In: Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege Hrsg. Erhaltung von Marmorskulpturen unter mitteleuropäischen Umweltbedingungen. Arbeitsheft Nr. 32. S. 51-70.
- [4] KEIDEL TH., SEIDEL R, HINZ U, STRÜMPEL J. (2016): Messen mit Mahr: Geschichte eines Familienunternehmens seit 1861 Vandenhoeck & Ruprecht; 304 Seiten
- [5] <https://de.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/Tastschnittverfahren>
- [6] GRÖGER S. (2007): Beitrag zur ganzheitlichen Bewertung von geometrischen Strukturen mit Tastschnittgeräten bis in den Nanobereich; Dissertation TU Chemnitz; 133 Seiten
- [7] SEEWIG J., WIEHR C., GRÖGER S. (2012): Charakterisierung technischer Bauteiloberflächen; TU Kaiserslautern
- [8] JUNG S.; Oberflächenbeurteilung-Rauheitsmessung (Versuchsbeschreibung); Uni Stuttgart
- [9] TRACEIT-Handbuch (2015): INNOWEP GMBH; Würzburg
- [10] DAMJANOVIC S. (2013): Sehen, Fühlen, Messen - Erprobung der Profilmessmethode zur Einschätzung der Kantenabwitterung und der Beurteilung von Oberflächenrauheiten mit Hilfe von Sandpapieren sowie die messtechnische Ermittlung von Rauheitskenngrößen mit Hilfe des TRACEIT-System, an Carrara-Marmorproben; Bachelorthesis; FH-Potsdam
- [11] WEINHOLD W P, WORTMANN A., DIEGELMANN C., PUMMER E., PASCUA N., BURKHARDT TH R., AND GORETZKI L. (2005) On Surfaces of Historic Buildings and Monuments Cleaned by Laser. LACONA VI Proceedings, Vienna, Austria, Sept. 21--25, 2005
- [11] WEINHOLD W.P., DIEGELMANN C., TIANO P., PUMMER E., GORETZKI L. (2007): Mobile Measuring and Documentation of Visual Impression and Surface Topography; Proceedings of the International Conference Lacona VII, Madrid, Spain, 17 - 21 September 2007
- [12] GRIMM, W.-D. VÖLKE J. (1983): Rauheitsmessung zu Kennzeichnung der Natursteinverwitterung; in: Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Band 34, S. 387-411
- [13] SNETHLAGE R., SIMON S. (1993): The first stages of marble weathering. Preliminary results after short-term exposure of nine months. Paper presented at the International RILEM/UNESCO Congress on Conservation of Stone and Other Materials, Paris 29June – 1July.
- [14] GORETZKI L., WEINHOLD W.P. (1996): Characterization of weathered layers on mineral based building materials using a combination of microstructural analysis MISTAN and SEM investigation, International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, 2, 3, 223-242
- [15] WEINHOLD W.P., PUMMER E. (2008): Documentation and measurement of visual impression and sur-

## 6. 3D-Rauheitsmessugen

face topography. In situ Monitoring of Monumental Surfaces; Florence; pp. 107-112

[16] ALVAREZ DE BUERGO M., VAZQUEZ-CALVO C., FORT R. (2011): The measurement of surface roughness to determine the suitability of different methods for stone cleaning; Geophysical Research Abstracts; Vol. 13. EGU2011, EGU General Assembly 2011

[17] STEIN M., HAUGEN A. (2010): Topography registration of surfaces on canvas paintings with a mobile non-contact profilometer; Restauro no6; 396-401

[18] DBU-Projekt „Entwicklung von zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden für biogene Oberflächenveränderungen von Marmoroberflächen“; Aktenzeichen: 32866/01-45; 2015-2018

[19] DBU Projekt „Messen und Bewerten: Eine Risikoziffer als Werkzeug, anthropogene Umweltschäden an Marmor- und Sandsteinskulpturen zu erfassen und rational begründete Entscheidungen zu deren Konservierung zu treffen“; Aktenzeichen: 33162; 2016-2018

Rolf Snethlage

## 7. Risikoziffer IV: Ausfüllen der Datenblätter

### Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden die Vorschriften dargestellt, die beim Ausfüllen der Datenblätter eingehalten werden müssen. Die Messwerte, die in die Zellen einzutragen sind, müssen als bloße Zahlenwerte eingefügt werden. In den Zellen dürfen keine Formeln hinterlegt sein. Rote Ecken an den Zellen zeigen an, dass hier in einem Kommentar Vorgaben zum Ausfüllen dieser Zellen zu finden sind. Alle Rechenfunktionen, die zur Berechnung der Risikoziffer erforderlich sind, werden von dem Excel Arbeitsblatt automatisch ausgeführt.

### Abstract

The article presents the instructions for correctly filling in data into a data sheets of an Excel workbook. The data have to be filled in as mere values; no formula should be active in the cells of the data sheet. Pressing the red mark in a cell's corner opens a window with a commentary how to fill in the cells. All necessary functions for calculating the Risk Number are generated completely automatically.

### 1. Allgemeine Angaben

Als Lieferumfang werden ein **leerer Datensatz** zur Berechnung der Risikoziffern für **Marmor- und Sandsteinobjekte** sowie jeweils ein **ausgefülltes Beispiel** bereitgestellt. In dem leeren Datensatz sind alle Parameter  $M(i)$  auf null gesetzt. Die Felder füllen sich automatisch, wenn Messwerte eingetragen werden. **Vor dem Ausfüllen soll die leere Vorlage in einer Kopie abgespeichert werden**, damit sie weiterhin zur Verfügung steht, falls Fehler passieren sollten. Die Beispieldatensätze sollten ebenfalls nicht verändert werden.

Die Bewertungsziffern  $B(i)$  sind fest vorgegeben und dürfen nicht verändert werden, weil sonst keine Vergleiche zwischen Standorten und Skulpturensammlungen mehr gezogen werden können. Weil alle  $M(i)$  Parameter in dem leeren Datensatz null gesetzt sind, erscheint in Excel in manchen Zellen der Hinweis „DIV Null“. Diese Hinweise verschwinden, sobald das Datenblatt ausgefüllt ist.

Ein Datensatz zur Berechnung der Gesamt- Risikoziffer  $R(\text{ges})$  besteht aus 12 Datenblättern:

1. Objektbeschreibung
2. Kunstwissenschaftliche Bewertung (KB)
3. Restaurierungsgeschichte (RGS)
4. Umwelt Exogene Risikofaktoren (U)
5. Naturstein Endogene Risikofaktoren Marmor (N)
6. Naturstein Endogene Risikofaktoren Sandstein (N)
7. Gefahr durch Menschen Vandalismus (V)
8. Mechanische Schäden Materialverlust (M)
9. Veränderungen der Oberfläche (OF)
10. Ultraschalldiagnostik I (US)
11. Ultraschalldiagnostik II (US)
12. Gesamtbewertung Gesamt Risikoziffer  $R(\text{ges})$

Bevor der Inhalt der einzelnen Datenblätter näher erläutert wird, sind einige allgemeine Hinweise angebracht.

Für die Berechnung der Risikoziffern werden nur die Datenblätter 3 bis 11 berücksichtigt. Datenblatt 1 mit den allgemeinen Angaben dient allein der Information über das Objekt. Die kunstwissenschaftliche Bewertung in Datenblatt 2 hat den Zweck, unter den Objekten, die zu einer Sammlung gehören, eine Rangfolge hinsichtlich des künstlerischen Wertes herzustellen, um eine Entscheidungshilfe zu erhalten, welches Objekt auf Grund seiner Bedeutung und seines Schadenszustands bevorzugt zu behandeln sei.

Das System der Risikoziffer hat zum Ziel, die messtechnisch verfügbaren Informationen nicht nur qualitativ und damit subjektiv gefärbt für die Entscheidungsfindung zu verwerten, sondern in quantitative Zahlenwerte zu überführen, die sich dann in eine einzige Risikoziffer zusammenfassen lassen. Um das zu erreichen, wird zu jedem Parameter eine Messwertziffer  $M(i)$  und eine Bewertungszahl  $B(i)$  vergeben. Die Messwertziffer  $M(i)$  gibt den Grad an, wie stark dieser Parameter bei dem betreffenden Objekt ausgebildet ist. Sie ist auf 1 normiert und ist deshalb stets kleiner als 1.

Die Bewertungsziffer  $B(i)$  ist bestimmt als das Maß, wie stark der Parameter für die Schadensentwicklung

## 7. Risikoziffer IV: Ausfüllen der Datenblätter

von Bedeutung ist. Sie beträgt zwischen 0 bis 10, ist fest vorgegeben und darf nicht verändert werden, weil sonst keine gültigen Vergleiche zwischen Objekten und Standorten gemacht werden können. Das Produkt von  $M(i) * B(i)$  ist die individuelle Risikoziffer  $R(i)$  für den betreffenden Parameter in einem Datenblatt:

$$R(i) = M(i) * B(i)$$

In den Datenblättern finden sich zwei verschiedene Arten der Transformationen von messtechnischen Informationen  $M(i)$  in Zahlenwerte:

### Typ 1: Skalierte Messwertzahlen

Zu den absoluten Messwerten gehört zum Beispiel eine Reihe von Klimadaten oder die mineralogische Zusammensetzung. Die Niederschlagsmenge ist eine absolute Messgröße, die in mm Niederschlag pro Jahr angegeben wird. Hohe Niederschlagsmengen gefährden Skulpturen im Freien mehr als geringe Niederschlagsmengen. Es findet aus diesem Grund eine Klassifizierung von  $M(i)$  statt gemäß

$$\begin{aligned} > 1000 \text{ mm/y} &= 1 \\ 1000 - 800 \text{ mm/y} &= 0,7 \\ 800 - 600 \text{ mm/y} &= 0,5 \\ < 600 \text{ mm/y} &= 0,3 \end{aligned}$$

Der Bearbeiter wählt die zum Standort passende Niederschlagsmenge und trägt die zugehörige Messwertziffer  $M(i)$  in die betreffende Zelle des Datenblattes ein. Die dazugehörige Bewertungsziffer, in diesem Fall 10, liegt fest und die Verlinkung der Zellen berechnet automatisch das Produkt  $M(i) * B(i) = R(i)$ .

### Typ 2: Auf Messungen basierte Messwertzahlen

Zu den relativen Messwerten gehört Eigenschaften, die sich im Lauf der Zeit verändern, so dass sich ein Unterschied zwischen Vormessungen und den aktuellen Messungen messen lässt. Zu diesen Eigenschaften gehört zum Beispiel die Ultraschallgeschwindigkeit. Sie hat sich im Verlauf der Verwitterung von einem Ausgangswert im frischen Zustand  $vp(o)$  zu dem zum Untersuchungszeitpunkt gemessenen Istwert  $vp(i)$  verändert. Der Grad der Veränderung kann somit als Differenz des Ausgangswerts  $vp(o)$  und des Istwerts  $vp(i)$  beschrieben werden. Da die Messwertziffer aber immer eine Zahl zwischen Null und Eins sein muss, wird durch Division durch den Ausgangswert  $vp(o)$  normiert, so dass keine negativen Werte auftreten.

$$M(i, vp) = [vp(o) - vp(i)] / vp(o)$$

Wieder rechnet das Programm automatisch mit der vorgegebenen Bewertungsziffer  $B(i)$  die individuelle Risikoziffer  $R(i)$  aus (siehe oben).

Wie schon gesagt, finden sich Informationen zur Vergabe der Messwertziffern  $M(i)$  hinterlegt bei den betreffenden Datenblattzellen, jeweils zu erkennen an einem kleinen roten Dreieck rechts oben an der Zelle. Der sich öffnende Kommentar enthält die nötigen Informationen. Besonders wichtig ist der Hinweis, dass alle Parameter eines Datenblattes mit einer Messwertziffer  $M(i)$  belegt werden. Parameter, zu denen keine Messwerte vorliegen, müssen mit  $M(i) = 0$  belegt werden, damit sie aus der Bewertung herausfallen.

Sollte sich das Kommentarfenster nicht ausreichend öffnen, muss mit rechtem Mausklick der Menüpunkt „Kommentar bearbeiten“ angeklickt werden. Nachfolgend lässt sich das Fenster mit der Maus hinreichend weit aufziehen, so dass alle Informationen sichtbar werden. Ein besonderes Problem stellen die Angaben zu den Anteilen der betroffenen Oberflächen im Bezug zur Gesamtoberfläche der Figur dar:

$$OF(i) / OF(\text{ges})$$

Im Projekt wurden auch zu diesem Zweck die Figuren als 3D Modelle mit dem T-Scan Laser eingescannt, damit die Gesamtoberfläche und die Teiloberflächen der Verwitterungsphänomene als exakte Zahlenwerte eingegeben werden konnten. Diese aufwendige Technik wird man sich nicht immer leisten können. Für die Abschätzung der Gesamtoberfläche einer Skulptur gibt es aber Näherungswerte, die sich an der menschlichen Gestalt orientieren. Laut Wikibooks beträgt die Oberfläche eines durchschnittlich großen und schweren Menschen  $1,8 - 2,0 \text{ m}^2$ . Für einen Menschen von  $1,75 \text{ m}$  Körpergröße und  $70 \text{ kg}$  Gewicht findet sich die Angabe  $1,84 \text{ m}^2$  Hautoberfläche. Die Umrechnung auf andere Körpergrößen erfordert die Überlegung, dass eine Figur nicht nur in der Länge wächst, sondern auch im Durchmesser. Nach Mach (persönliche freundliche Mitteilung) liegt der Radius des menschlichen Körpers bei etwa 11% der Körperlänge. Legt man ein einfaches Zylindermodell zugrunde, dann resultiert gemäß

$$OF = 2 r \pi h \text{ (m}^2\text{)}$$

für die Oberfläche einer Skulptur:

"Körperradius"	Größe	Oberfläche
0,17	1,50	1,57
0,22	2,00	2,79
0,28	2,50	4,37
0,33	3,00	6,28

**Tabelle 1:** Näherung für die Oberfläche einer menschlichen Figur. Alle Angaben in m. Nach Mach (pers. Mittlg.)

Diese Näherung zieht aber nicht in Betracht, dass die meisten Bildwerke durch Schleier und Faltenwürfe sowie Girlanden und Attribute eine wesentliche größere Oberfläche erhalten. Man kann sich in grober Näherung auch damit behelfen, dass man die betroffenen Oberflächenanteile in Prozent der Gesamtfigur nach optischem Erscheinungsbild abschätzt. Wichtig für die Risikoziffer ist ja nicht die absolute Fläche, sondern der Oberflächenbruch (Prozentwert). Schätzt man die Anteile für alle 4 Ansichten, summiert die Oberflächenbrüche und teilt deren Summe durch 4, so erhält man den Gesamt-Oberflächenanteil.

Nachdem alle individuellen  $R(i)$  auf einem Datenblatt berechnet sind, erfolgt automatisch die Summation zu  $\Sigma R(i)$ . Diese Zahl ist größer als 1 und muss ebenfalls auf eine Zahl zwischen Null und Eins normiert werden. Das geschieht dadurch, dass alle vorgegebenen  $B(i)$  zu  $\Sigma B(i)$  addiert werden. Die Division von  $\Sigma R(i)$  durch  $\Sigma B(i)$  ergibt die Risikoziffer  $R(n)$  für das gesamte Datenblatt:

$$R(n) = \Sigma R(i) / \Sigma B(i)$$

Diese Zahl ist wiederum kleiner oder gleich 1. Sie wird automatisch auf das Datenblatt „Gesamtbewertung“ übertragen und dort weiter verarbeitet. Je näher die Risikoziffer  $R(n)$  bei eins liegt, desto größer ist der Einfluss dieses Datenblattes auf das Gesamtrisiko. Mitunter kann der Fall auftreten, dass nicht alle Parameter eines Datenblattes in die Berechnung einbezogen werden können, weil Informationen fehlen oder Messwerte nicht zugänglich sind. In diesen Fällen wird nur durch die Summe der betroffenen  $B(i)$  dividiert. Dies geschieht automatisch, indem die betroffenen  $B(i)$  mit Hilfe einer „= wenn - dann“ Funktion ausgefiltert werden. In den nachfolgenden Ausführungen wird dieser Sachverhalt näher erläutert. In diesem Fall dann also:

$$R(n) = \Sigma R(i) / \Sigma B(i \text{ wenn - dann})$$

Noch eine weitere Spalte ist von Bedeutung, die Spalte „Anzahl Hochrisiken“. In dieser Spalte werden diejenigen Parameter gezählt, deren Messwertziffer  $M(i) > 0,75$  ist. Die Höhe dieser Messwertziffer ist im Grunde willkürlich festgesetzt, wird im Datenblatt „Veränderungen der Oberfläche“ aber auf  $> 0,1$  festgelegt, was einem Befall der Oberfläche durch das betreffende Schadensphänomen von mindestens 10 % der Gesamtoberfläche bedeutet.

Der Zweck dieser Hochrisiken ist es, auf die besonderen Gefahrenschwerpunkte hinzuweisen, die ein sofortiges Handeln oder zumindest eine stetige Kontrolle benötigen. Als Hochrisiko wird ein Parameter gezählt, wenn sein  $R(i) > 0,75$  liegt. In manchen Fällen wird die Einstufung als Hochrisiko auf den Wert  $> 0,5$  oder  $> 0,1$  herabgesetzt.

Jeder Parameter mit Hochrisiko wird in einer gesonderten Spalte mit 1 gezählt, so dass der Bearbeiter nur nach den Zellen auf jedem Datenblatt zu suchen braucht, um die besonders risikobehafteten Eigenschaften zu identifizieren. Die Hochrisiken werden pro Datenblatt addiert und automatisch auf das Datenblatt „Gesamtbewertung“ übertragen, wo sie dann zu einer Gesamtzahl addiert werden. Neben der Gesamt Risikoziffer  $R(\text{ges})$  entsteht damit ein zweites Beurteilungskriterium zum Zustand eines Objekts.

Der bisherige Umgang mit dem System der Risikoziffer hat gezeigt, dass für die persönliche Einschätzung die Risikoziffer gemessen an dem subjektiv sichtbaren Schaden zu niedrig liegt. Es scheint so, dass die Anzahl der Hochrisiken besser mit dem persönlichen Eindruck zusammenpasst. Das ist im Grunde nicht verwunderlich, weil bei der persönlichen Einstufung die nicht unmittelbar an Schäden orientierten Risikoziffern  $R(i)$  wie Klima, Vandalismus oder Gesteinseigenschaften nicht mitgedacht werden.

## 2. Spezielle Angaben zu den Datenblättern

### Datenblatt 1: Objektbeschreibung

Dieses Datenblatt enthält Kurzinformationen zum Objekt. Es findet keine Bewertung statt. Das Datenblatt ist nicht mit den anderen vernetzt. Um das Blatt ausfüllen zu können, sind Recherchen zur Objektgeschichte erforderlich. Zur Illustration sollte eine Gesamtansicht des Objekts eingebaut werden.

### Datenblatt 2: Kunstwissenschaftliche Bewertung (KB)

Das Objekt wird nach kunstwissenschaftlichen Kriterien bewertet, um seine künstlerische Qualität

und Bedeutung festzustellen. Zu den vorgegebenen Kriterien werden in den Kommentaren zu den Zellen Vorgaben gemacht. Die hier errechnete Bewertungsziffer dient nur zur Einstufung des Objekts innerhalb eines Kollektivs mehrerer Objekte, zum Beispiel eine Anzahl von Parksulpturen innerhalb einer Sammlung, um die Prioritäten in einem Restaurierungsprogramm festzulegen zu können.

### Datenblatt 3: Restaurierungsgeschichte (RGS)

Es ist nicht der Zweck, in dem Datenblatt eine komplette Aufzeichnung der Restaurierungsgeschichte vorzulegen. Das ist der speziellen Dokumentation durch den Restaurator vorbehalten. Das Ziel ist, mit diesem Datenblatt die möglichen Risiken von Folgeschäden zu bewerten, die sich aus ungeeigneten Restaurierungsmethoden und -materialien entwickeln können.

Wenn eine Maßnahme nicht durchgeführt wurde, dann kann von ihr kein Risiko ausgehen; Die Messwertzahl  $M(i)$  wird Null gesetzt, wodurch für diesen Parameter  $R(i) = 0$  resultiert. Wurde eine Maßnahme durchgeführt, so ist für diese eine Abstufung der Messwertzahl  $M(i)$  vorgesehen, die sich meist am Umfang der behandelten Oberfläche orientiert. Im Kommentar zu der betreffenden Excel-Zelle sind Auswahlvorgaben gemacht.

Ähnlich wird mit der Bewertungsziffer  $B(i)$  verfahren. Restaurierungsmaterialien weisen ein individuelles Risikopotential für mögliche Folgeschäden auf, die meist vom Chemismus abhängig sind. In der Spalte für die Bewertungsziffern  $B(i)$  wird diesem unterschiedlichen Risikopotential Rechnung getragen. In den Kommentaren zu den betreffenden Excel-Zellen werden entsprechende Vorgaben gemacht, wie die verschiedenen Restaurierungsmaterialien bzw. -methoden bewertet werden sollen.

Als Produkt von  $M(i) * B(i) = R(i)$  wird die Risikoziffer jedes Parameters berechnet. Alle Parameter, deren  $M(i) = 0$  ist, fallen aus der Berechnung heraus. Bei der Auswertung des Datenblattes wäre es nun verkehrt, durch die Summe aller Bewertungsziffern  $B(i) = B(i)_{max}$  zu dividieren, weil dann das Risiko  $R(RGS)$  einen nicht realen, viel zu kleinen Wert annehmen würde, wenn nur wenige Maßnahmen durchgeführt wurden. Als Folge würde das Risiko von Folgeschäden unzulässig untergewichtet.

Für die Berechnung des Risikos  $R(RGS)$  werden deshalb nur die durchgeführten Maßnahmen berück-

sichtigt und die Berechnung der Risikoziffer  $R(RGS)$  erfolgt wie oben beschrieben:

$$R(RGS) = \sum R(i \text{ bewertet}) / \sum B(i \text{ bewertet})$$

Hierbei sind, um es noch einmal zu wiederholen, nur die tatsächlich durchgeführten Maßnahmen betroffen. Damit wirklich nur diese berücksichtigt werden, ist in dem Tabellenblatt eine Spalte für  $B(i)$  mit einer „Wenn – Dann“ – Funktion eingebaut:

$$= \text{wenn } (M(i) = 0; \text{ setze } = 0, \text{ sonst } B(i))$$

Wenn ein Objekt noch nie restauriert wurde, können Restaurierungsmaßnahmen auch keine Folgeschäden verursachen. Das aktuelle Risiko wird durch die Datenblätter 8 und 9, welche mechanische Schäden und Veränderungen der Oberfläche beinhalten, ausgedrückt. Datenblatt 3 erhält den Wert Null und wird deshalb bei der Gesamtauswertung nicht berücksichtigt.

### Datenblatt 4: Umwelt Exogene Risikofaktoren R(U)

In diesem Datenblatt werden die Risiken bewertet, welche durch Umwelteinflüsse hervorgerufen werden. Die Skala reicht von Einflussfaktoren wie Aufstellungsort bis zu den Schadstoffbelastungen.

Manche Parameter wie Niederschlag oder Frostgefahr lassen sich messtechnisch nicht skalieren, so dass Vorgaben für die Einstufung der zugehörigen Messwertziffer  $M(i)$  gemacht werden. Die Bewertungsziffern  $B(i)$  sind alle gleich mit der Maximalbewertung = 10 vorgegeben, um damit den großen Einfluss der Umweltfaktoren auf das Schadensrisiko zum Ausdruck zu bringen.

Bei der Bewertung der Luftschadstoffe  $NO_x$ ,  $PM_{10}$  und  $SO_2$  müssen die vor Ort herrschenden Schadstoffkonzentrationen abgeschätzt werden, weil sich direkt neben dem Objekt keine Umweltmessstation befinden dürfte. An Daten werden die jährlichen Mittelwerte benötigt. Für Objekte in Parkanlagen ist die urbane Hintergrundkonzentration der betreffenden Stadt heranzuziehen, bei Objekten an Straßen gilt die Schadstoffkonzentration einer Messstation, die an einer ähnlich stark befahrenen Straße aufgestellt ist wie das untersuchte Objekt.

Bezugshorizont sind die ländlichen Schadstoffkonzentrationen, so dass die betreffende Risikoziffer das erhöhte Risiko bemisst, dem das Objekt an seinem Standort gegenüber einem Standort in ländlicher

Umgebung ausgesetzt ist. Die Messdaten für die 3 Luftschadstoffe sind bei den jeweiligen Landesämtern für Umwelt oder bei städtischen Umweltämtern frei erhältlich.

#### **Datenblatt 5 oder 6: Endogene Risikofaktoren Naturstein R(N)**

Das Projekt beschäftigt sich mit Objekten aus Marmor und aus Sandstein. Weil beide Materialien bezüglich ihrer Eigenschaften unterschiedliche endogene Risikoschwerpunkte aufweisen, gibt es hier zwei Datenblätter, eines für Marmor (5) und eines für Sandstein (6). Die Unterschiede liegen im Wesentlichen bei der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung, in der die Tonminerale bei den Sandsteinen eine besondere Rolle spielen. Für die einzusetzenden Messwertziffern  $M(i)$  werden in den Kommentaren zu den Datenzellen Vorgaben gemacht.

In diesem Datenblatt tritt dasselbe Problem auf wie bei Datenblatt 3: Restaurierungsgeschichte. Es ist in den meisten Fällen nicht möglich, alle vorgegebenen Materialeigenschaften zu bestimmen. Folglich darf auch nicht die Summe aller Bewertungsziffern für die Berechnung des Risikos  $R(U)$  herangezogen werden, weil sonst das Risiko unterschätzt würde. Es dürfen nur die Bewertungsziffern in die Berechnung einfließen, zu denen auch gemessene Werte vorliegen. Um das zu bewerkstelligen, ist wie in Datenblatt 3 eine „Wenn-Dann“ Funktion eingeführt, welche diese Zusammenhänge automatisch regelt.

#### W-Wert Ermittlung

Die Messwertzahl  $M(i)$  wird berechnet nach:

$$M(i) = [W(i) - W(o)]^2 / [W(i)]^2$$

$W(i)$  = am Objekt gemessener W-Wert

$W(o)$  = W-Wert im unverwitterten Zustand.

Erwartungsgemäß sollte  $W(i) > W(o)$  sein. Da an einem Objekt der  $W(o)$  Wert für das betreffende Gestein nicht ermittelt werden kann, weil in jedem Fall das Objekt durch die jahrzehntelange Exposition eine fortschreitende Verwitterung erfahren hat, sollte der  $W(o)$  Wert für das betreffende, unverwitterte Gestein aus der Literatur entnommen werden können.

Für die Marmorobjekte ist ein  $W(o)$  Wert =  $0,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{h}$  plausibel, der sehr nah an den von RÜDRICH (2003) für Carrara, Laas und Sterzing bestimmten Werten für frischen Marmor liegt.

Bei Sandsteinobjekten kann es vorkommen, dass auch bei nicht hydrophobierten Objekten der Objektmesswert  $W(i)$  unter den  $W(o)$ -Werten für das unverwitterte Gestein liegt, die sich in der Literatur finden. In diesen Fällen wird der am Objekt gemessene Minimalwert  $W(i)$  als Nullwert  $W(o)$  für den unverwitterten Stein genommen, was jedoch nur eine Näherungslösung für das angesprochene Problem sein kann, denn es wird angenommen, dass an diesen Messstellen kaum Verwitterung stattgefunden hat. Man hat jedoch die Sicherheit, das wirklich identische Gestein als Vergleichsmaterial zu verwenden.

Zum Omega-Wert siehe die Erläuterungen zu den Messwerten.

#### **Datenblatt 7: Gefahr durch Menschen (V)**

Der Buchstabe V steht für Vandalismus, einer Bedrohung, der viele Objekte im Freien ausgesetzt sind. In Betracht kommen mechanische Beschädigungen durch Abschlagen von Figurenteilen oder die Beschädigung der Oberflächen durch Graffiti. Es gibt Objekte, die immer wieder, fast regelmäßig Opfer von Vandalismus werden. In diesem Datenblatt wird das Risiko bewertet, wie oft das Objekt durch Vandalismus beschädigt wird. Grundlage ist eine abgeschätzte jährliche Häufigkeit.

#### **Datenblatt 8: Mechanische Schäden, Materialverlust (M)**

In diesem Datenblatt werden die verschiedenen Risstypen Craquelé, Haarriss und „Tiefer Riss“ (Trennschnitt) sowie fehlende Teile bewertet. Die Risstypen Craquelé und Haarriss stellen Oberflächenveränderungen dar und werden nach ihrer flächenhaften Verbreitung bemessen. Der Risstyp „Tiefer Riss“ ist tiefgreifend und ist Anzeiger für den drohenden Verlust von Teilen wie Hände, Arme, Zehen usw. Auch die Gefährdung der Standsicherheit wird bemessen. Zusätzlich wird auch die Zahl der bereits in den Verlust gegangenen Teile bemessen. Wie die Erfahrung lehrt, sind Objekte, die schon Verluste erlitten haben, auch durch weitere Verluste von Teilen bedroht. Alle Parameter sind wegen ihrer Schadensschwere mit der Bewertungsziffer  $B(i) = 10$  bewertet.

#### **Datenblatt 9: Veränderungen der Oberfläche (OF)**

Dieses Datenblatt enthält 4 Parametergruppen:

- Ablagerungen und Farbveränderungen

## 7. Risikoziffer IV: Ausfüllen der Datenblätter

- Materialverlust durch chemisch physikalische Prozesse
- Erosion. Materialverlust durch chemische Lösungsvorgänge
- Biologische Besiedlung

Die Aufteilung in diese 4 Gruppen ist an das Schadensglossar des Icomos Iscs (2010) angelehnt. Gemäß dem Schadensglossar ist eine umfangreiche Liste von Verwitterungsformen angelegt, die sich selten an einem Objekt werden finden lassen, so dass nur wenige Parameter mit Messwertziffern M(i) belegt werden können.

Die Bewertungsziffern B(i) der einzelnen Parameter sind jeweils unterschiedlich gewählt, entsprechend ihrem Einfluss auf den Verwitterungsfortschritt. Darin kommt eine unterschiedliche Gewichtung der Parameter zum Ausdruck.

Die im Tabellenblatt aufgeführten Rauheiten sind durch haptischen Vergleich der Objekt Oberfläche mit standardisierten Schleifpapieren der Reihe P von Bosch bestimmt. Dieses Verfahren geht auf DAMJANOVIC (2013) zurück. Die Rauheiten sind in Gruppen unterteilt, die von sehr feiner Oberfläche  $P > 700$  bis zu sehr rauer Oberfläche  $P < 100$  reichen.

Alle Messwertziffern M(i) errechnen sich aus dem Flächenanteil des betreffenden Verwitterungsphänomens an der Gesamtoberfläche:

$$M(i) = OF(i) / OF(ges)$$

Weil auch in diesem Datenblatt nicht alle Parameter ausgefüllt werden können, ist für die Bewertungsziffer B(i) wieder eine „=wenn – dann“ Spalte eingefügt, in der dann nur die Bewertungsziffern B(i) addiert werden, die für die Berechnung der Risikoziffer R(OF) zugelassen sind:

$$R(OF) = \sum R(i) / \sum B(i \text{ wenn – dann})$$

### Datenblätter 10 und 11: Ultraschalldiagnostik

Diese Datenblätter gehören zusammen; die Teilung wurde nur vorgenommen, um das Datenblatt nicht zu lang werden zu lassen.

In ersten Teil 10 befindet sich die Tabelle mit den Messwerten Messstrecke, Laufzeit und Ultraschallgeschwindigkeit. Für die störungsfreie Funktion beider Tabellenblätter ist Voraussetzung, dass diese **Daten**

**als bloße Zahlenwerte** eingetragen werden und dass in den Zellen keine Funktionen hinterlegt sind.

Für eine Skulptur sind standardmäßig 24 Messpunkte vorgesehen. Das Messprogramm kann kürzer oder länger ausfallen. Es stehen genügend Zeilen bis zu 40 Messpunkten zur Verfügung. Mittelwert, Maximalwert und Minimalwert der Ultraschallgeschwindigkeit werden automatisch ermittelt. Man muss aber darauf achten, dass alle Zellen in die Berechnung eingeflossen sind.

Die 24 Messpunkte sind in der Vorlage bestimmten Messorten zugeordnet, z. B. Kopf, Hals, linker Oberarm u.s.w. Ist einer dieser Standard Messpunkte im aktuellen Messprogramm nicht enthalten, so rückt man den folgenden Messpunkt an dessen Stelle, damit keine Leerzeile entsteht. Auf keinen Fall darf man die nicht enthaltene Zeile löschen, weil dann die Übertragung auf Seite 11 nicht mehr funktioniert.

Rechts neben der Tabelle mit den Messwerten wird die Risikoziffer R(US) berechnet. Auch diese Berechnung geschieht automatisch. Man muss aber erneut darauf achten, dass alle Zellen erfasst werden.

Auf dem zweiten Tabellenblatt 11 werden die Ultraschallgeschwindigkeiten nach Größe aufsteigend geordnet, so dass auf einen Blick abgelesen werden kann, an welchem Messpunkt die niedrigsten oder die höchsten Ultraschallgeschwindigkeiten auftreten. Diese Anordnung ist eine große Hilfe für die Planung von Konservierungsmaßnahmen, weil man daraus erfährt, an welchen Stellen eingegriffen werden muss.

Gleichzeitig werden die Messwerte nach Klassen geordnet. Die Klassen sind wie folgt eingeteilt:

- vp < 2 km/s,
- vp = 2 – 3 km/s,
- vp = 3 – 4 km/s,
- vp = 4 - 5 km/s,
- vp = 5 – 6 km/s,
- vp > 6 km/s.

Diese Darstellung gibt einen praktischen Überblick über die Geschwindigkeitsverteilung, wodurch die tatsächliche Gefährdung besser beurteilt werden kann als mit der mittleren Geschwindigkeit allein.

Beide Tabellenblätter 10 und 11 sind miteinander verlinkt, so dass die Auswertung auf dem zweiten Tabellenblatt automatisch geschieht, wenn auf dem ersten

alle Werte eingetragen sind. Sind in der Geschwindigkeitsspalte Zellen mit einer Null belegt, so ist zu prüfen, ob diese Null aus einer tatsächlichen Messung (z. B. Riss) hervorgegangen ist oder ob die Null bedeutet, dass hier kein Messwert vorliegt. Ist nämlich eine Null eingetragen, erscheint diese auch in der Spalte der Rangfolge der Ultraschallgeschwindigkeiten auf Tabellenblatt 11, wo sie zu falschen Interpretationen Anlass geben kann.

In manchen Fällen kann, besonders bei Sandsteinen, das unerwartete Messergebnis auftreten, dass die Ultraschallgeschwindigkeiten  $v_p$  am verwitterten Objekt höher liegen als die an frischen Gesteinsproben ermittelten Literaturwerte. Die Berechnung der Risikoziffer lässt sich in solchen Fällen nicht durchführen, weil negative Werte auftreten würden. Stattdessen wird auf den Bezug zu Literaturwerten verzichtet und die höchste, am Objekt gemessene Ultraschallgeschwindigkeit als Bezugsgröße herangezogen.

Wie von KÖHLER (2017 mündliche Mitteilung) vorgeschlagen, soll der maximale Objektwert  $v_p(i \text{ max})$  um 10 % erhöht und als  $v_p(o \text{ max})$  gesetzt werden. Auf diese Weise kann die Verteilung der Ultraschallveränderungen an dem Objekt uneingeschränkt dargestellt werden, ohne dass negative Werte auftreten. Die Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeiten ist damit allein auf das Objektsystem bezogen und nicht mehr auf Literaturwerte.

Der Wert  $v_p(o \text{ max})$  ist auf Tabellenblatt 10 in die betreffenden Zellen der Spalte H einzugeben, damit die Risikoziffern berechnet werden können.

Bei Marmor ist die Kenntnis über die Ultraschallgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Verwitterungsstadien viel besser als bei Sandstein. Aber auch hier traten bei einigen Objekten sehr gute Werte über 5 km/s auf, so dass für alle Marmorarten einheitlich ein  $v_p(o)$  für den unverwitterten Zustand mit 6 km/s gewählt wurde.

Wenn man bei der Berechnung der Risikoziffern Ultraschall davon ausgeht, dass die minimale Ultraschallgeschwindigkeit  $v_p(\text{min}) = 0$  km/s sei, kommt man zu unrealistisch kleinen Risikoziffern, weil durch den Divisor  $6 = v_p(\text{max}) (6 \text{ km/s}) - v_p(\text{min}) (0 \text{ km/s})$  geteilt wird. Tatsächlich liegt die Untergrenze für Marmor realistisch bei 1,5 km/s, der Ultraschallgeschwindigkeit in Wasser, so dass in allen Fällen mit dem Divisor  $4,5 = v_p(\text{max}) - v_p(1,5)$  gearbeitet wurde.

### Datenblatt 12: Gesamtbewertung $R(\text{ges})$

Alle den einzelnen Datenblättern zugeordneter Risikoziffern  $R(\text{RGS})$ ,  $R(\text{U})$ ,  $R(\text{N})$ ,  $R(\text{V})$ ,  $R(\text{M})$ ,  $R(\text{OF})$  und  $R(\text{US})$  sind automatisch auf das letzte Datenblatt „Gesamtbewertung“ übertragen worden. Hier wird nun das Gesamtrisiko  $R(\text{ges})$  in Form des arithmetischen und des quadratischen Mittels errechnet.

$$R(\text{Gesamt}) = \Sigma R(i)/n(i)$$

$$R(\text{Gesamt}) = \Sigma [R(i)]^2/n(i)$$

Das Gesamtrisiko  $R(\text{ges})$  erfasst alle Risikofaktoren und bildet somit den Gefährdungsgrad des betreffenden Objekts ab.  $R(\text{ges})$  ist eine Zahl stets kleiner als Eins. Je näher die Gesamt-Risikoziffer beim Wert 1 liegt, desto gefährdeter ist der Zustand einer Skulptur, weiterhin Schaden zu nehmen und im Bestand bedroht zu sein. Das quadratische Mittel betont verstärkt die schlechten Werte, d. h. die Risikoziffern, deren Werte näher bei 1 liegen. Das quadratische Mittel der Risikoziffer ein und derselben Skulptur liegt deshalb immer einen kleinen Betrag über dem arithmetischen Mittel und damit näher bei 1, dem totalen Risiko.

Hat eine Teil-Risikoziffer  $R(i)$  den Wert Null, besteht kein Risiko, hat sie den Wert 1, besteht 100 % Risiko für weitere gravierende Schäden. Von welcher Eigenschaft dieses hohe Risiko ausgeht, kann aus der Lokalisierung der Spalte Hochrisiken bestimmt werden. Die Liste mit den Hochrisiken ist ebenfalls auf dem Datenblatt „Gesamtbewertung“ zu finden. In der betreffenden Spalte werden sie zu einer Gesamtzahl der Hochrisiken zusammengerechnet. An Hand dieser Aufstellung kann man auf einen Blick erkennen, wo die besonders gefährdeten Bereiche angesiedelt sind. Eingangs ist schon erwähnt worden, dass diese Zahl den persönlichen Eindruck, wie stark gefährdet ein Objekt ist, besser widerzuspiegeln scheint als die objektive Risikoziffer.

### 3. Literaturverzeichnis

BOURGÈS ANN (2006): Holistic correlation of physical and mechanical properties of selected natural stones for assessing durability and weathering in the natural Environment. Dissertation LUM München.

DAMJANOVIC SANDRA (2013): Sehen, fühlen, Messen. Erprobung der Profilmessmethode zur Einschätzung der Kantenabwitterung und der Beurteilung von Oberflächenrauheiten mit Hilfe von Sandpapieren sowie die messtechnische Ermittlung von Rauheitskenn-

## 7. Risikoziffer IV: Ausfüllen der Datenblätter

größen mit Hilfe des TRACEIT Systems an Carrara Marmorproben. Bachelor Thesis Studiengang Restaurierung FH Potsdam.

ICOMOS IScs (2010): Illustriertes Glossar der Verwitterungsformen von Naturstein. Englisch-Deutsche Fassung. Monuments and Sites XV. Michael Imhof Verlag Petersberg.

RÜDRICH JÖRG (2003): Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore. Dissertation Fakultät Mathematik Naturwissenschaften Universität Göttingen

Rolf Snethlage

## 8. Risikoziffer V: Erläuterungen zu den Datenblättern

### Zusammenfassung

Dieser Beitrag informiert im Detail, was zum Verständnis und zum richtigen Ausfüllen der Datenblätter wichtig zu wissen ist. Es werden die Funktionen der einzelnen Tabellenspalten erläutert und welchen Einfluss sie auf das Gesamtergebnis haben. Weiterhin werden wichtige Daten zu Klima, Gesteinseigenschaften und Ultraschallgeschwindigkeiten vermittelt, mit deren Hilfe neue Datenblätter ausgefüllt werden können.

### Abstract

The article describes in detail background information about the content and the functions of the data sheets in the context of the whole workbook. The meaning and content of each column in the data sheets influences the overall result. Relevant data concerning climate, stone properties and ultrasonic velocities are available for making the filling in easier.

### Datenblatt 1: Objektbeschreibung

Die hier verlangten Angaben sind selbsterklärend und bedürfen keiner weiteren Erklärung.

### Datenblatt 2: Kunstwissenschaftliche Bewertung B(KB)

Dieses Datenblatt geht im Wesentlichen auf Saskia Hüneke und Kathrin Lange von der SPSP in Potsdam zurück, die dankenswerterweise die Mühe auf sich genommen haben, dieses komplexe Thema aus der textlichen Beschreibung in eine tabellarische Form zu überführen, die sich mit Bewertungsziffern B(i) versehen lässt.

In den Zellen der Spalte A werden bestimmte Eigenschaften abgefragt, die geeignet sind, den Kunstwert eines Objekts möglichst objektiv zu erfassen. Dieser Kunstwert hängt von verschiedenen Faktoren ab, die kunstwissenschaftlich seriös begründet sind. Neben der Bedeutung des Künstlers sind auch die gestalterische Vollkommenheit, der Erhaltungszustand, die Differenziertheit der Oberfläche und allgemein die nationale oder internationale Bedeutung des Objekts von Belang. Von wichtiger Bedeutung sind vor allem

auch die Wertekategorien von RIEGL (1903. Siehe auch HUBEL 2006). Diese sind im Beitrag „Das Konzept Risikoziffer“ in diesem Heft erläutert.

In Spalte B sind in jeder Zelle zu den Fragen der Spalte A Kommentare, erkennbar an den kleinen roten Dreiecken, hinterlegt. Diese enthalten die individuellen Bewertungsziffern, die in die betreffende Zelle einzutragen sind. Der Zahlenwert der kunstwissenschaftlichen Bewertung B(KB) errechnet sich aus der Summe der in den Einzelzellen eingetragenen Zahlenwerte, dividiert durch die maximal mögliche Bewertung B(max), die sich dadurch ergibt, wenn in jeder Zelle der Maximalwert 10 eingetragen wäre. Es müssen in alle Zellen Eintragungen vorgenommen werden, weil sonst die Gesamtberechnung fehlerhaft ist.

Für den Skulpturenbestand der SPSP in Potsdam hat HÜNEKE (2017 pers. Mitteilung) einen kunstgeschichtlich und konservatorisch basierten Diskussionsprozess entwickelt, der in der letzten Stufe in konkrete Erhaltungsmaßnahmen einmündet:

Erfassung des Objekts → Kunstgeschichtliche Bewertung → Sammlungsgeschichtliche Bewertung → Bewertung im Kontext mit der Gesamtanlage → Konservatorische Materialbewertung → Diskussion der Erhaltungsmöglichkeiten → Praktische Umsetzungsmöglichkeiten → Abwägung und Umsetzung

Das Datenblatt ist nicht in die unmittelbare Berechnung der Gesamt-Risikoziffer R(ges) eingebunden, sondern wird erst in einem zweiten Berechnungsschritt verwendet, der dazu dient, innerhalb eines Skulpturenkollektivs Prioritäten zu setzen. Diese bemessen sich nach der Bedeutung, die eine Skulptur nach dem Datenblatt B(i) erhält.

### Datenblatt 3: Restaurierungsgeschichte R(RGS)

Die Restaurierungsgeschichte eines betrachteten Objekts stellt in der Reihe der anderen Datenblätter einen Sonderfall dar. Sie ist nicht unmittelbar mit dem Begriff „Risiko“ verbunden. Zu Recht wird man annehmen, dass eine Restaurierung die Gesamtsituation der Skulptur verbessert und das Schadensrisiko

## 8. Risikoziffer V: Erläuterungen zu den Datenblättern

vermindert hat. Man könnte meinen, das gesamte Datenblatt aus der Berechnung herauszunehmen, da wieder aufgetretene Schäden ja im Datenblatt 8: „Mechanische Schäden Materialverlust“ und im Datenblatt 9: „Veränderungen der Oberfläche“ bewertet werden. Welche Überlegungen führen nun dazu, das Datenblatt Restaurierungsgeschichte im Berechnungssystem der Risikoziffer zu belassen und welche Aussagen können dadurch getroffen werden?

Es ist nicht der Zweck in dem Datenblatt eine komplette Aufzeichnung der Restaurierungsgeschichte vorzulegen. Das ist einer speziellen Dokumentation vorbehalten. Das Ziel ist, mit einer geeigneten Auswertung die Risiken aufzuzeigen, die durch ungeeignete Restaurierungsmethoden und –materialien verursacht wurden und damit auf mögliche, noch verborgene Folgeschäden hinzuweisen, die in den Datenblättern 8 und 9 noch nicht enthalten sind, weil sie noch nicht evident geworden sind. Das Ziel ist, die möglichen Risiken von Folgeschäden zu bewerten, die sich aus ungeeigneten Restaurierungsmethoden und –materialien entwickeln können.

Folgende Gedankengänge liegen der Auswertung des Datenblattes 3 weiterhin zu Grunde:

Wenn eine Maßnahme nicht durchgeführt wurde, dann verursacht sie auch kein Risiko. Weil die Messwertzahl  $M(i) = 0$ , resultiert für diesen Parameter  $R(i) = 0$ . Für die Berechnung des Risikos  $R$  (Restaurierungsgeschichte RGS) werden nur die durchgeführten Maßnahmen berücksichtigt, deren individuelle Risiken  $R(i)$  und Bewertungsziffern  $B(i)$  tatsächlich bewertet sind. Die Berechnung des Risikos  $R(RGS)$  erfolgt in üblicher Weise nach der folgenden Formel:

$$R(RGS) = \Sigma R(i \text{ bewertet}) / \Sigma B(i \text{ bewertet})$$

Im Tabellenblatt „Restaurierungsgeschichte“ ist dieser Algorithmus bereits programmiert, indem eine Extraspalte mit "Wenn – Dann – Funktion" eingefügt ist:

$$=\text{wenn}(M(i) = 0; \text{ setze} = 0, \text{ sonst } M(i))$$

Die „Wenn – Dann – Funktion“ besagt, dass in der Spalte von „ $B(i)$  - Wenn –Dann“ eine Null gesetzt wird, wenn die Maßnahme nicht durchgeführt wurde ( $M(i)$  ist dann Null); wenn sie durchgeführt wurde und  $M(i)$  damit einen Wert hat, wird in der Zelle „ $B(i)$  – Wenn-Dann“ eine der aus dem Kommentar

ausgewählten Bewertungsziffern  $B(i)$  gesetzt. Dieser „Wenn-Dann“ Algorithmus ist bereits fest programmiert, so dass sich der Bearbeiter nicht darum zu kümmern braucht.

Wenn ein Objekt noch nie restauriert wurde, wird das gesamte Datenblatt 3:  $R(RGS)$  null gesetzt. Das aktuelle Risiko wird allein durch die Datenblätter 8 und 9, welche mechanische Schäden und Veränderungen der Oberfläche beinhalten, ausgedrückt. Das Datenblatt 3 wird deshalb bei der Gesamtauswertung nicht berücksichtigt. Das hat zur Folge, dass für die Berechnung der Gesamtrisikoziffer  $R(Ges)$  dieses Tabellenblatt auch nicht berücksichtigt wird und der Divisor bei der Mittelwertbildung sich um Eins vermindert. Es wird also nicht mehr durch 7, sondern nur noch durch 6 dividiert. Diese Veränderung ist in dem betreffenden Datenblatt bereits programmiert, so dass der Anwender darauf nicht zu achten braucht.

Wenn in alle Zellen für  $M(i)$  und  $B(i)$  null eingetragen wird, würde gemäß der Berechnungsvorschrift durch Null dividiert, was mathematisch verboten ist. In dem Datenblatt ist jedoch für diesen Fall insofern Vorsorge getroffen, dass eine weitere Zelle „F33“ eingefügt ist, welche mit einer weiteren „Wenn-Dann“ Funktion die Division durch Null verhindert. Der Mechanismus ist fest einprogrammiert, so dass sich der Bearbeiter darum nicht zu kümmern braucht.

Dennoch bleiben trotz dieser Vorkehrungen gewisse logische Ungereimtheiten bestehen, die sich jedoch nicht vermeiden lassen. Sind beispielsweise nur eine oder zwei Restaurierungsmaßnahmen durchgeführt worden, kann in manchen Fällen das Maximalrisiko  $R(RGS) = 1$  resultieren. Dieses Ergebnis kann in bestimmten Fällen das Risiko richtig beschreiben, wenn zum Beispiel mit Säure gereinigt wurde. In anderen Fällen kann das Risiko aber stark überzeichnet werden, wie zum Beispiel bei einer Reinigung mit Wasser. Dem Bearbeiter wird in einem solchen Fall empfohlen, das ganze Datenblatt  $R(RGS)$  Null zu setzen und bei der Gesamtauswertung wegzulassen.

### Datenblatt 4: Umwelt Exogene Risikofaktoren $R(U)$

Die meisten Parameter in diesem Datenblatt sind gemäß der Kommentare an den Zellen einfach zu beantworten. Die Luftschadstoffkonzentrationen und die Niederschlagsmengen müssen jedoch für den betreffenden Ort ermittelt werden, was beim Deutschen Wetterdienst und lokalen Umweltbehörden oder den zuständigen Landesämtern für Umweltschutz abgefragt werden kann. Tabelle 1 gibt einen Überblick

über die Zahlenwerte, die in diesem Projekt verwendet wurden.

Dresden			NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM10 (µg/m <sup>3</sup> )
2015	Großer Garten		18	18
	Winckelmannstraße	Hintergrund urban	18	18
	Umland (niedrigste Messstellen in Sachsen)	Hintergrund Land	8	17
	Großsedlitz		18	17
München	Schlosspark Nymphenburg		32	19
2015	Lothstraße	Hintergrund urban	32	19
	Johanniskirchen	Hintergrund Land	8	12
Potsdam	Schlosspark Sanssouci		17	20
2015	Zeppelinstraße	Belastung urban	32	27
	Zeppelinstraße	Hintergrund urban	17	20
	Umland Lütze (Belzig)	Hintergrund Land	12	17
Baiersdorf	Jüdischer Friedhof		20	22
2015	Nürnberger Flughafen	Hintergrund urban	20	22
	Andechs Rothenfeld	Hintergrund Land	8	12
<b>Tab. 1:</b> Schadstoffkonzentrationen NO <sub>2</sub> und PM10 für verschiedene Umweltsituationen.				

Tabelle 2 zeigt die Werte für das langjährige Jahresmittel des Niederschlags an den Orten, an denen sich die für das Projekt ausgesuchten Objekte befinden.

Ort	Niederschlag mm
Dresden	592
München	930
Potsdam	566
Baiersdorf (Erlangen)	638
<b>Tab. 2:</b> Niederschlagswerte der Objektorte	

Die hier aufgeführten Daten wurden entnommen aus:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2016): Lufthygienischer Jahresbericht 2015.

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (2016): Luftqualität in Sachsen. Jahresbericht 2015.

Landeshauptstadt Potsdam (2011): Luftreinhalte- und Qualitätsplan für die Landeshauptstadt Potsdam. Fortschreibung 2010 – 2015.

Niederschlagsmengen: Climate-data.org

#### Datenblatt 5 und 6: Naturstein – Endogene Risikofaktoren R(N)

Marmor und Sandstein haben sehr viele unterschiedliche Eigenschaften, welche die endogenen Risikofaktoren, die dem Material immanent sind, beeinflussen. Die Risikoziffer wird aus diesem Grund für Skulpturen aus Marmor und Sandstein mit zwei verschiedenen Datenblättern berechnet. Manche dieser Eigenschaften sind so bedeutsam, dass sie hier genau betrachtet werden sollen.

- **W-Wert Kapillare Wasseraufnahme**

Bei Sandsteinobjekten kann auch bei nicht hydrophobierten Objekten der Objektmesswert W(i) unter den W(o)-Werten für die unverwitterten Gesteinsvarietäten liegen, die sich in der Literatur bei GRUNERT (2007), BOURGES (2006) oder SNETHLAGE (1996) finden. Dieses Resultat hat sich bei den Messungen in Großsedlitz in diesem Projekt ergeben und lässt sich nur so erklären, dass die Streubreite auch innerhalb einheitlicher Gesteinstypen sehr hoch sein kann und dass, wenn die Literaturwerte sich zufällig in die Messwerte des Objekts einpassen sollten, nicht gesagt ist, dass diese Literaturwerte tatsächlich durch Messungen an identischen Varietäten gewonnen wurden.

Der Bezug auf Literaturwerte ist deshalb verworfen worden. Statt dessen wird der am Objekt gemessene

## 8. Risikoziffer V: Erläuterungen zu den Datenblättern

Minimalwert  $W(i)$  als Nullwert  $W(o)$  für den unverwitterten Stein genommen, was jedoch nur eine Näherungslösung für das angesprochene Problem sein kann, denn es wird angenommen, dass an diesen Messstellen kaum Verwitterung stattgefunden hat. Man hat jedoch die Sicherheit, das wirklich identische Gestein zum Vergleich zu haben.



**Abb. 1:** Karsten Messungen zur Bestimmung des  $W$ -Werts. Grabmal Ehrenbacher Jüdischer Friedhof Baiersdorf

Zum Überblick sind hier Vergleichswerte von KONIETZKY & SIEDEL (2015) dargestellt (Tabelle 3).

Porosität Vol %	24,2 Vol % 13,8 Vol % 6,8 Vol %	Modalbestand	Quarz 90 %, Feldspat, Glimmer, Glaukonit, Illit Kaolinit
Rohdichte	2,08 g/cm <sup>3</sup>	hydrisch	0,4 bis 1,2 mm/m
Wasseraufnahme	9,0 M %	Vp verwittert	2,6 bis 2,9 km/s
Wasserdampf. $\mu$	15	Vp Mittelwert	2,8 km/s

**Tab. 3:** Literaturwerte zu den Eigenschaften von Elbsandstein Typ Cotta. Aus KONIETZKY & SIEDEL (2015).

Bei den hydrophobierten Objekten Äolus in Nymphenburg, Rhea Kopie und Hera Kopie ist genauso verfahren worden. Der niedrigste, an den hydropho-

bierten Objekten gemessene  $W(i)$  Wert wird als der  $W(o)$ -Wert nach frisch erfolgter Hydrophobierung festgesetzt, auf den die anderen Messwerte bezogen werden, um daraus dann das Nachlassen der Hydrophobierung beurteilen zu können.

Die Grabmäler im Jüdischen Friedhof in Baiersdorf bestehen aus Schilfsandstein und im Fall des Doppelgrabs aus Buntsandstein. Die Steinbrüche der Gesteine sind nicht bekannt. Auch bei diesen Gesteinen ergaben die Messungen, dass die Werte an den Objekten unter den Vergleichswerten der Literatur liegen. Es bestätigt sich, dass wie im Fall des Elbsandsteins im Barockgarten Großsedlitz sich die Literaturwerte auf Schilfsandsteinvarietäten beziehen, die von den Baiersdorfern vollkommen verschieden sind. Die Tabelle 4 bringt einige Vergleichswerte für Schilfsandsteine und verwandte Werksandsteine aus der Literatur. Man erkennt sofort, wie groß die Streubreite ist.

Sandstein	w-Wert kg/m <sup>2</sup> v/h	Literatur
Schleerieth Werksandstein Probenmaterial	7,8	SNETHLAGE (1984)
Maulbronn Schilfsandstein Probenmaterial	4,8	SNETHLAGE (1984)
Schleerieth Werksandstein Schloss Schillingsfürst	1,5 bis 2,0	SNETHLAGE (1996)
Diebach Schilfsandstein Schloss Schillingsfürst	3,2 bis 4,4	SNETHLAGE (1996)
Obernesselbach (?) Schilfsandstein Kloster Birkenfeld	1,6 bis 2,8	SNETHLAGE (1996)
Obernesselbach (?) Schilfsandstein Kloster Birkenfeld	2,8 bis 3,4	SNETHLAGE (1996)

**Tab. 4:** Einige  $W$ -Werte für Schilfsandsteine aus der Literatur.

$W$ -Werte für Marmor sind in RÜDRICH (2003) zu finden. Ihre Messung ist nicht einfach, weil die absolut aufgenommenen Wassermengen sehr gering sind. Auch die Ablesung am Karsten'schen Prüfröhrchen erfordert viel Erfahrung (Tabelle 5).

		P Vol %	W kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup>
<b>Carrara</b>	verwittert	0,53	0,06 bis 0,08
	stark verwittert	2,64	1,65 bis 1,79
<b>Laas</b>	verwittert	0,44	0,12 bis 0,17
<b>Sterzing</b>	verwittert	0,40	0,09 bis 0,19

**Tab. 5:** W-Werte für verwitterte und unverwitterte Marmore aus RÜDRICH (2003).

SIEGSMUND & DÜRRAST (2014) liefern Werte zur Wasseraufnahme, Porosität und hydrischer Dehnung von Carrara Marmor. (Tabelle 6, Tabelle 7).

Marmor	Wasseraufnahme Gew %
Min	0,01
Max	0,38
Mean	0,15

**Tab. 6:** Wasseraufnahme von Marmor allgemein aus SIEGSMUND & DÜRRAST (2014).

Carrara Marmor	
Rohdichte g/cm <sup>3</sup>	2,71
Porosität Vol %	0,46
α hydrisch mm/m	0,08

**Tab. 7:** Rohdichte, Porosität und Hydrische Dehnung von Carrara Marmor. Aus SIEGSMUND & DÜRRAST (2014)

Die kapillare Wasseraufnahme ist direkten Messungen am Objekt zugänglich, weil das Messverfahren mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen zerstörungsfrei arbeitet (WWW.SALZWIKI/). Die hierfür zuständige Formel leitet sich aus dem Gleichgewicht von Kapillarzug und Schweredruck ab (KLOPFER 1979):

Kapillarzug = Schweredruck

$$(2 * \sigma * \cos \theta) / r = \rho * g * h * \cos \phi$$

σ = Grenzflächenspannung Wasser - Kapillaroberfläche

ρ = Dichte des Wassers

g = Erdbeschleunigung

Der Winkel φ bezeichnet die Saugrichtung. Im Fall von senkrechtem kapillarem Eindringen gilt cos 0° = 1, der Winkel θ hingegen den Randwinkel. Es gilt cos 0° = 1. Dadurch vereinfacht sich die Formel für die kapillare Steighöhe h zu:

$$h = 2 * \sigma / r * \rho * g$$

Andererseits zeigt die Formel auch, dass für horizontales Eindringen φ = 90° und cos φ = 0, die Eindringtiefe theoretisch unendlich ist, weil das Gewicht der Wassersäule als begrenzende Kraft wegfällt. Dieser Fall gilt auch für die Messungen mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen bei Messungen an vertikalen Flächen. Bei Messungen auf horizontalen Flächen unterstützt der Schweredruck zusätzlich den Kapillarzug, so dass auch hier die Eindringtiefe theoretisch unendlich wird.

Als hemmende Kraft tritt an Stelle des Gewichts der Viskose Widerstand in Erscheinung:

Kapillarkraft = Viskoser Widerstand

$$2 * \pi * r * \sigma * \cos \theta = 8 * \pi * \eta * u^2 * h * dh/dt$$

h = Eindringtiefe

r = Kapillarradius

σ = Grenzflächenspannung Wasser - Kapillaroberfläche

θ = Randwinkel

η = Viskosität

u = Umwegfaktor (Zahl für Verbiegungen der Kapillarröhren)

Da es im vorliegenden Fall nicht um absolute Berechnungen, sondern um eine Abschätzung der gegenseitigen Abhängigkeiten der Einflussparameter geht, kann der Umwegfaktor U = 1 gesetzt werden. Auch gilt wie oben cos θ = 1, weil der Grenzwinkel zwischen Wasser und der Kapillaroberfläche Null ist. Die Formel vereinfacht sich zu:

$$2 * \pi * r * \sigma = 8 * \pi * \eta * h * dh/dt$$

$$h = \sqrt{(r * \sigma * t / 4 * \eta)}$$

Weil σ, η und 4 Konstanten sind, lassen sie sich zu einer einzigen Konstanten zusammen fassen, die mit dem W-Wert vergleichbar ist, in unserem Fall aber C genannt werden soll:

$$h = \sqrt{(C * r * t)}$$

Dieser Wurzelausdruck lässt sich nun für verschiedene Radien r und Saugzeiten t berechnen. In diesem Beispiel sind für σ und η nicht die echten physikalischen Werte eingesetzt, da sie für das Medium Wasser gleich sind und nur die Relationen der Eindringtiefen zueinander aufgezeigt werden sollen.

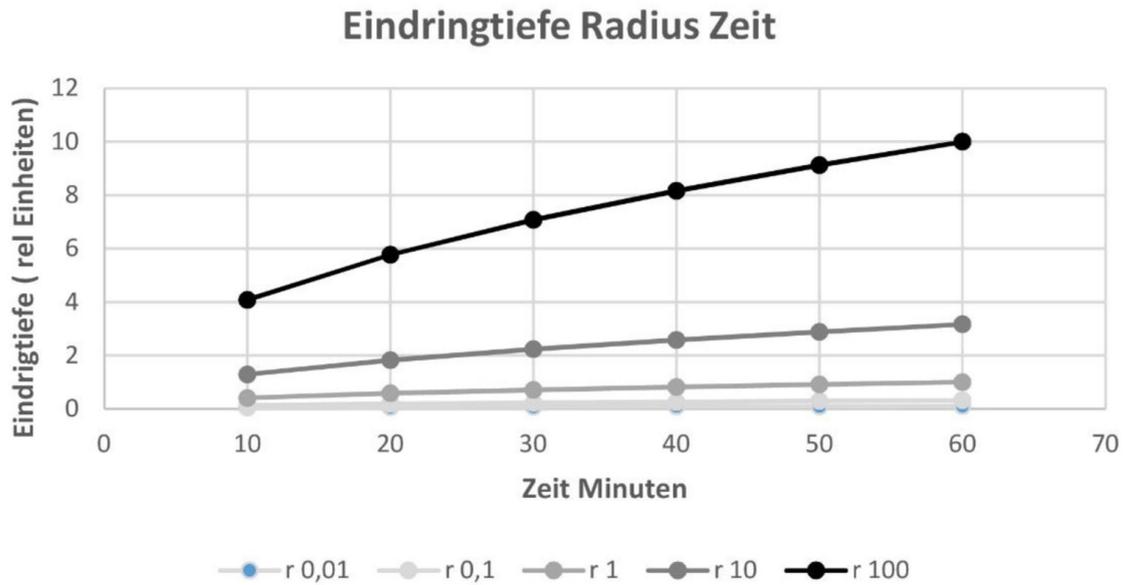


Abb. 2: Eindringtiefe als Funktion von Kapillarradius und Zeit. Radius  $r = \mu\text{m}$ .

Die Konstante C ist deshalb ebenfalls als 1 angenommen. Das Ergebnis ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Eindringkurven haben dieselbe Form wie die für den kapillaren Anstieg. In die großen Poren dringt das Wasser schneller vor und tiefer ein als in die kleinen, weil die bremsende Schwerkraft wegfällt und nur die Viskosität als hemmender Faktor für alle Porengrößen aber gleich ist. Man kann aber folgenden Zusammenhang sehr gut erkennen:

Bei gleicher Saugzeit von 1 Stunde ist die Eindringtiefe bei einem Radius von  $r = 100 \mu\text{m}$  10 Mal größer als bei einem Radius  $r = 1 \mu\text{m}$ . Der mit Wasser gefüllte Porenraum ist dann ebenfalls 10 Mal so groß.

In logarithmischer Darstellung kann man auch die Eindringtiefen bei kleinen Porenradien besser darstellen (Abbildung 3).

Zu jedem Zeitpunkt nimmt die Eindringtiefe für jeden Porenradiusschritt von  $r = 0,01 \mu\text{m}$  bis  $r = 100 \mu\text{m}$  um den Faktor 3,3 zu, so dass die obige Aussage

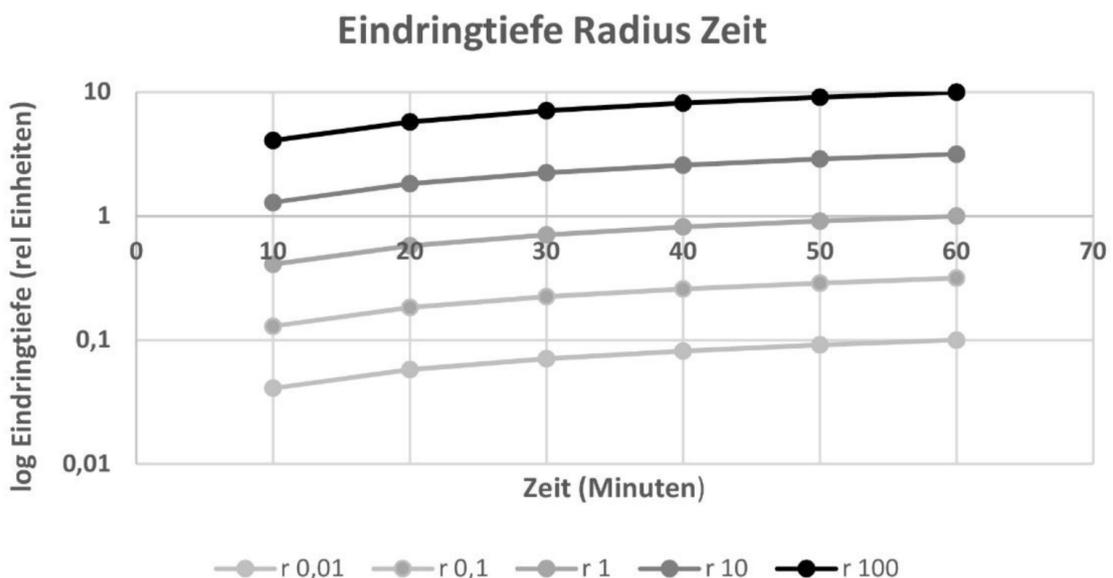


Abb. 3: Die Beziehungen Eindringtiefe, Porenradien und Saugzeit in logarithmischer Darstellung.

„Anstieg der Eindringtiefe bei  $r = 1 \mu\text{m}$  bis  $r = 100 \mu\text{m}$  ist gleich 10-fach“ erfüllt ist. Weil bei Karsten-Messungen an einer unverwitterten Stelle und an einer verwitterten Stelle immer mit der gleichen Saugfläche gemessen wird, sind die Eindringtiefen auch ein Maß für den mit Wasser gefüllten Porenraum

• **Omega Wert  $\Omega$**

Die kapillare Wasseraufnahme beschreibt im Regelfall eine parabolische Kurve, d. h. die Wasseraufnahme erfolgt mit zunehmender Saugzeit immer langsamer. Die parabolische Kurve folgt einem  $\sqrt{t}$ -Gesetz. Trägt man die Wasseraufnahme pro Flächeneinheit gegen  $\sqrt{t}$  (Wurzel aus der Zeit) auf, resultiert eine gerade Linie. Die Steigung dieser Linie ist als W-Wert definiert:

$$\text{Aufnahmemenge } W = \text{kg/m}^2 * \sqrt{t}.$$

In bestimmten Fällen, zum Beispiel wenn auf Grund einer Hydrophobierung nur eine dünne Oberflächenzone kapillar für Wasser zugänglich ist, stellt sich die Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Zeit als eine lineare Gerade dar. Für dieses Wasseraufnahmeverhalten kann man aber kein  $\Omega(o)$  definieren, weil das unverwitterte und unbehandelte Gestein ein Wasseraufnahmeverhalten entsprechend dem W-Wert zeigt. Aus diesem Grund wird in Abstimmung mit WENDLER (pers. Mittlg.) für  $\Omega(o)$  der Einfachheit halber die Wasseraufnahme zugrunde gelegt, die bei einem W-Wert von  $0,1 \text{ kg/m}^2 * \sqrt{t}$  in 1 Stunde erreicht

wird, nämlich  $0,1 \text{ l/m}^2$ . Graphisch stellt sich die Festlegung folgendermaßen dar (s. Abb. 4):

Als Beispiel dient das Grabmal Ehrenbacher auf dem Jüdischen Friedhof in Baiersdorf. Hier zeigt die Wasseraufnahme ein lineares Verhalten in Abhängigkeit von der Zeit gemäß dem  $\Omega$ -Wert. Die schwarze, schräge Linie entspricht der Aufnahmemenge  $0,1 \text{ Liter}$  nach 1 Stunde. Sie stellt den Bezugspunkt für  $\Omega(o)$  dar. Die aktuellen  $\Omega(i)$  Werte für das Grabmal Ehrenbacher betragen  $0,75$ ,  $0,65$  und  $0,38 \text{ l/m}^2$ .

• **Thermische Dehnung**

Die thermische Dehnung ist der meistbestimmende Verwitterungsfaktor bei Marmor, insbesondere wenn Wasserfilme an den Rissspitzen die Van der Waals Kräfte aufheben und der Spaltdruck der Poren expansiv wirkt. Auch wenn diese Daten im Verbund mit der Risikoziffer nur selten Verwendung finden dürften, weil sie nur durch eine zerstörende Probenahme zu gewinnen sind, seien sie hier vermerkt (Tabelle 8, Tabelle 9).

Carrara	x	y	z	mean	Anisotropy
$\alpha$ thermisch	$9,72 * 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$10,34 * 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$12,46 * 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$10,84 * 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	22 %
$\alpha$ thermisch	$4,81 * 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$6,64 * 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$6,90 * 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$6,17 * 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	30 %

**Tab. 8:** Werte der thermischen Dehnung von 2 Carrara Marmorproben. Aus SIEGSMUND & DÜRRAST (2014)

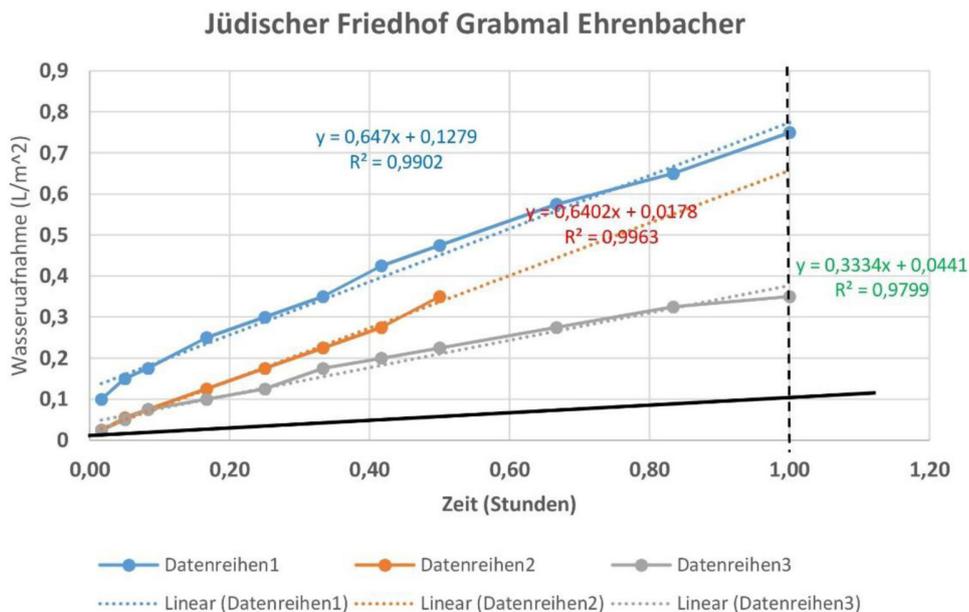


Abb. 4: Beispiel für den Omega Wert und dessen Definition.

## 8. Risikoziffer V: Erläuterungen zu den Datenblättern

	$\alpha * 10^{-6} K^{-1}$	$\alpha * 10^{-6} K^{-1}$
Carrara frisch	8,0 bis 11,0	9,0 bis 15,0
Carrara verwittert	7,0 bis 12,0	10,5 bis 15,0
Laas frisch	4,5 bis 11,0	6,0 bis 13,0
Laas verwittert	4,0 bis 8,0	6,0 bis 11,0
<b>Tab. 9:</b> Thermische Dehnung von Carrara Marmorproben vor und nach künstlicher Alterung. Aus WEISS (1999).		

### Datenblatt 7: Gefahr durch Menschen Vandalismus R(V)

Vandalismus ist eine stetige Bedrohung von Denkmälern im Freien, sei es in Parkanlagen oder auf Plätzen. Die Gefahr besteht in mechanischen Beschädigungen durch Abschlagen von Extremitäten oder Girlanden, Köpfen oder sonst irgendwie hervorstehenden Teilen. Nicht minder bedrohlich sind die Attacken durch Graffiti. Der Lack aus Sprühdosen kann beträchtlich in den oberflächennahen Porenraum eindringen. Die Reinigungsmaßnahmen bestehen deshalb in der Anwendung von Abbeizern bis hin zu mechanischen Abtragungen der Oberfläche durch Schleifscheiben. Mitunter bleiben sogar diese intensiven Gegenmittel wirkungslos, so dass Reste von Verfärbungen auf immer sichtbar bleiben.

Wie hoch das Risiko des Vandalismus ist, lässt sich am besten durch eine Analyse der in der Vergangenheit erfolgten Angriffe beurteilen. In die Betrachtung ist einzubeziehen, ob das Objekt frei zugänglich aufgestellt ist oder ob Eingrenzungen überwunden werden müssen. Auch ist die Lage insoweit zu bewerten, ob die Gegend um das Objekt belebt und gut einsehbar ist oder nicht.

### Datenblatt 8: Mechanische Schäden Materialverlust R(M)

Eine gründliche restauratorische Bestandsaufnahme ist die Voraussetzung, dieses Datenblatt ausfüllen zu können. Die Risstypen Craquelé, Haarriss und Tiefer Riss müssen genau erkannt und bewertet werden. Sie werden danach beurteilt, welchen Anteil der Oberfläche sie betreffen.

Die tief einschneidenden Risse sind Indikatoren dafür, dass ein hohes Risiko besteht, dass die betreffenden Teile gänzlich abbrechen. Aber auch ausgedünnte Querschnitte wie zum Beispiel an Fingern oder Zehen sind ein Indiz für drohenden Verlust.

In der zweiten Sektion des Datenblattes werden die bereits in den Verlust gegangenen Teile abgefragt. Der Umfang dieser Schäden bestimmt wesentlich die Anzahl der Hochrisiken auf diesem Datenblatt. Nicht nur Teile der Figur können betroffen sein, sondern auch Verzierungen und Symbole. Gehen diese verlustig, droht die Gefahr, dass nicht mehr erkannt werden kann, um welche Darstellung eine Figur es sich handelt. Damit sind nicht nur drohende Verluste angezeigt als vielmehr der Hinweis, dass ein Gesamtkonzept über den Umgang mit dieser Figur entschieden werden muss.

### Datenblatt 9: Veränderungen der Oberfläche R(OV)

#### • Bestimmung der Schadensphänomene

Das Datenblatt umfasst all die visuell erkennbaren Schadensphänomene, die an Oberfläche auftreten können. Die Liste orientiert sich an dem Glossar der Verwitterungsformen von Natursteinen von ICOMOS Iscs (2010). Sie ist inzwischen zu einem internationalen Standard geworden. Die Definitionen der Schadensphänomene sind dort nachzulesen und können hier allein aus Platzgründen nicht wiederholt werden.

Ablagerungen / Farbveränderungen	Ablagerungen
	schwarze Krusten
	Versinterungen
	Verfärbungen, Rostflecken
	Ausblühungen
Materialverlust durch chemische und physikalische Prozesse	Relief
	Rückwitterung
	Kreiden, Abmehlen
	Absanden
	zuckerörniger Zerfall
	Schuppen
	Schalenbildung
	Schichtspaltung Aufblättern
	Ausbruch Rostsprengung
	Abscherben Absplittern
	Alveolen
Erosion Materialverlust durch chemische Lösungsvorgänge	Rauheit
	P Zahl > 700
	P Zahl 700 - 500

	P Zahl 500 - 300
	P Zahl 300 - 100
	P Zahl < 100
	Kantenrückwitterung/ Aufplatzen
	Differentielle Erosion ("Zellulitis")
	Mikrokarst
	Pitting Grube
Biologische Besiedlung	Algen Flechten Pilze Moose
	Höhere Pflanzen
Originaloberfläche	keine Veränderungen
<b>Tab. 10:</b> Schadensphänomene gemäß Icomos Iscs Glos- sar.	

- **Messung der Oberflächenrauheit**

Bei Marmor ereignet sich der Beginn der Verwitterung in einer Zunahme der Rauheit. Fein geschliffene oder polierte Oberflächen verlieren ihre optischen Eigenschaften. Mit der Fingerspitze werden Unebenheiten erkannt. Die Fingerspitzen sind fähig, Strukturen besser zu erfühlen und zu unterscheiden als das menschliche Auge. Zu Beginn der Untersuchung sollte man die geschützten Stellen einer Skulptur



**Abb. 5:** Oberfläche im Originalzustand an der Figur des Kronos im Schlosspark Nymphenburg München.

suchen, an denen sich noch die Originaloberfläche erhalten hat. Diese dokumentiert, wie sich Auftraggeber und Bildhauer das Erscheinungsbild der Skulptur vorgestellt haben. Abbildung 5 zeigt eine Stelle originaler Oberflächenbeschaffenheit beim Kronos im Schlosspark Nymphenburg.

Ursache für die zunehmende Rauheit ist die Einwirkung von sauren Immissionen, die die Calcitoberfläche selektiv erodieren. Feinkristallines Calcit Zwischenmittel zwischen größeren Körnern wird bevorzugt gelöst und ausgewaschen. Das Endstadium ist erreicht, wenn die Kornstruktur des Marmors sichtbar hervortritt (Abbildung 6).



**Abb. 6:** Endstadium der Rauheit bei Sterzinger Marmor. Die Einzelkristalle treten markant hervor.

Durch die unterschiedliche Verwitterungsrate auf ebenen Flächen, an Kanten und an Ecken runden sich die Konturen ab. Bildhauerische Details werden unscharf und können im Lauf der Zeit sogar vollständig verschwinden.

Um Rauheit wenigstens halbquantitativ beschreiben zu können, bietet sich ein Sandpapierfächer an, in dem die verschiedenen Körnungen mit jeweils einem Blatt angeordnet sind (DAMJANOVIC 2013). Durch Überstreichen der Marmoroberfläche und von verschiedenen Blättern des Fächers mit dem Zeigefinger kann durch den gefühlten Vergleich die Rauheit der Marmoroberfläche eingegrenzt werden. Die Methode bedarf einiger Einübung und Erfahrung. Ein Problem liegt darin, dass die Kristalle auf dem Sandpapier – entweder Korund oder Siliciumcarbid – spitz und scharfkantig sind. Die Erhebungen an der Marmoroberfläche sind dagegen nicht so scharf und fühlen sich weicher an.

Im Test mit 10 Probanden (DAMJANOVIC 2013) stellte sich heraus, dass die gröber abgestuften Schleifpapiere besser zugeordnet werden konnten als fein abgestufte. Sehr feine Körnungen konnten nicht mehr unterschieden werden. Für die praktische Anwendung ist deshalb auf eine zu enge Abstufung verzichtet worden. Ebenso wichtig ist es, sich auf entweder Trocken- oder Nassschleifpapier eines einzigen Herstellers festzulegen. Die im Projekt Risikoziffer verwendete Einteilung erfolgt in 200er Schritten der P-Zahl:

P > 700

P 700 – P 500

P 500 – P 300

P 300 – P 100

P < 100

Es muss bedacht werden, dass die hohen Zahlen nicht größere Rauheit, sondern größere Feinheit bedeuten und umgekehrt, Rauheiten < 100 sich sehr rau anfühlen.

Die Einteilung der Schleifpapiere geschieht mit Hilfe der P-Zahl. Die P-Zahl gibt die Anzahl der Maschen eines Siebs auf der Länge von 1 Inch (Zoll) = 2,54 cm an. Die P-Zahlen lassen sich in Korngrößen umrechnen. Man sollte zur Messung möglichst ein oder zwei Schleifpapiere aussuchen, die in der Mitte der oben genannten Klasseneinteilung liegen.

	Körnung	Korngröße $\mu\text{m}$
grob	P40	425
	P50	336
	P60	269
	P80	200
mittel	P100	162
	P120	125
	P150	100
	P180	82
	P220	68
	P280	52
fein	P360	40
	P400	35
	P500	30
	P600	25
sehr fein	P800	22
	P1200	15

**Tab. 11:** Körnung P Zahl und Korngröße (FEPA 2006).

Mit Hilfe der durch Fühlen ermittelten P-Zahlen lassen sich dann die Bereiche unterschiedlicher Rauheit auf einer Marmorskulptur kartieren. Da die maximal

erreichbare Rauheit der Korngröße der Calcitkristalle entspricht, sollte bei einem Carrara Marmor die unterste P-Zahl im Bereich P150 bis P100 liegen. Bei der Erstbegutachtung kann nur der Ist-Zustand festgestellt werden. Wie sich die Rauheit mit der Zeit verändert, kann erst durch Nachmessungen im Laufe eines Monitoring Programms ermittelt werden.

• **Rückwitterung an Ecken und Kanten. Konturverlust**

Durch selektive Rückwitterung entsteht auf der Fläche ein Relief, das im Glossar von Icomos Iscs (2010) als Erosion bezeichnet wird. Kanten und Ecken runden sich; scharfkantige Konturen verschwinden. Im fortgeschrittenen Zustand sind Ornamente oder Schriften nicht mehr zu erkennen.



**Abb. 7:** Konturverlust an Kybele. Schlosspark Nymphenburg.

SNETHLAGE (2011) hat auf der Grundlage geometrischer Beziehungen festgestellt, dass der Materialabtrag an einer Kante 2 mal so hoch, an einer vorspringenden Ecke 3 mal so hoch ist wie auf der ebenen, dem Regen ausgesetzten Fläche. Neueste Messungen im Jahr 2000 ergaben für Carrara Marmor am Standort München eine Abtragsrate von 8,4  $\mu\text{m/a}$  auf ebenen Flächen. An Kanten beträgt demnach die Rückwitterung 17, an Ecken 25  $\mu\text{m/a}$ . Noch im Jahr 1996 ermittelten SIMON & SNETHLAGE (1996) Rückwitterungsraten von 14 – 25  $\mu\text{m/a}$  auf der Fläche, bei Ecken und Kanten demnach bis zu 50 bzw. 75  $\mu\text{m/a}$ . Bei der Beurteilung des heutigen Erscheinungsbildes einer Skulptur sind die Umweltbelastungen in der Vergangenheit mit in Betracht zu ziehen. Im Zeitraum von der Mitte des 19. Jh. bis etwa 1980 war die Umweltbelastung in den Großstädten Deutschlands höher als heute. Rechnet man die obigen Zahlen auf einen Zeitraum von 100 Jahren hoch, so resultiert für den günstigen Fall der sauberen Luft ein Abtrag von 840, 1700 und 2500  $\mu\text{m}$  für Fläche, Kante und Ecke, für den ungünstigeren Fall der 1990er Jahre bis zu 2500, 5000 und 7500  $\mu\text{m}$ . Diese Zahlenwerte verdeutlichen, dass in relativ überschaubaren Zeiträumen



**Abb. 8:** Ludwig Sattler bei Ultraschallmessungen 2012 an der Figur Kybele im Schlosspark Nymphenburg.

die Präzision und Detailschärfe einer Figur schwerste Schäden erleiden kann.

- **Prognose der Rückwitterung**

Wie oben ausgeführt, finden sich in der Fachliteratur Angaben zu Materialverlust und Rückwitterungsraten von Marmor. Hervorzuheben sind LIPFERT (1989), BAEDCKER (1990), SIMON & SNETHLAGE (1996) und SNETHLAGE & KOCHER (2002). Die von den Autoren ermittelten Rückwitterungsraten, die mit Hilfe der Analyse von Ablaufwässern und aus dem Gewichtsverlust der Probekörper berechnet wurden, sind in der nachfolgenden Tabelle zusammen gestellt:

LIPFERT (1989)	4 – 34 $\mu\text{m/a}$
NAPAP (BAEDCKER 1990)	15 – 30 $\mu\text{m/a}$
SIMON & SNETHLAGE (1996)	14 – 25 $\mu\text{m/a}$
SNETHLAGE & KOCHER (2002)	1 – 8 $\mu\text{m/a}$

Auffällig ist der Rückgang der Rückwitterungsraten, der auf den verminderten  $\text{SO}_2$  Gehalt der Luft zurückgeführt werden kann. Legt man eine als realistisch für heute zu bezeichnende Rückwitterung von 10  $\mu\text{m/Jahr}$  zu Grunde, dann weicht eine Kante mit einer Rate von 20  $\mu\text{m/Jahr}$  zurück, eine Ecke mit 30  $\mu\text{m/Jahr}$ . Mit Hilfe solcher Annahmen kann man abschät-

zen, in wie viel Jahren die Detailschärfe verloren geht oder die Lesbarkeit eines Ornaments nicht mehr möglich ist. Die Zahlenangaben erscheinen auf den ersten Blick nicht sehr beunruhigend; es ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei der Erhaltung von wertvollen Denkmälern nicht in wenigen Jahren, sondern in Generationen gedacht werden muss. Außerdem beginnt man bei der Bewertung nicht mit neu geschaffenen Skulpturen, sondern rechnet von verwitterten Oberflächen aus, die bereits den Großteil ihrer Detailschärfe verloren haben.

#### Datenblatt 10 und 11: Ultraschalldiagnostik R(US)

Dass Ultraschallmessungen mitunter akrobatische Klettereinlagen erfordern, zeigt die Abbildung 8 einer Messung an der Kybele im Schlosspark Nymphenburg.

Allgemein zu den Ultraschallmessungen und zur besonderen Bedeutung der Messgenauigkeit führt KROMPHOLZ (2017) aus:

*„...die Ultraschallmessung stellt die einzige Möglichkeit dar, innerhalb der verschiedenen Untersuchungen den inneren Zustand einer Skulptur zu bewerten.*

*Die in den vergangenen Jahren durchgeführten US-Messungen an Marmorskulpturen in München (Nymphenburg 2012), Potsdam (Sanssouci 2013) und Dresden (Großer Garten 2014) zeigten zwischen den einzelnen Messteams eine Messunsicherheit bzw. Reproduzierbarkeit mit Ergebnisabweichungen von typisch 5 – 10 %, in Einzelfällen auch darüber.*

*Für Marmor ( $V_p=6000 \text{ m/s}$ ) mit einer Schädigungsbandbreite von ca. 4500  $\text{m/s}$  sind diese Messdifferenzen von 300 - 600  $\text{m/s}$  ggf. gerade noch akzeptabel, aber für Sandstein ( $V_p=3000 \text{ m/s}$ ) mit einer Schädigungsbandbreite von maximal nur 1800  $\text{m/s}$  und entsprechenden Messdifferenzen von 150 - 300  $\text{m/s}$  meines Erachtens zu hoch. Für eine angenommen reale Schallgeschwindigkeit an Sandstein (Cottaer) mit  $V_p = 2200 \text{ m/s}$  könnten sich 10 % Abweichung auch als Messwert von nur 1980  $\text{m/s}$  ergeben, der wiederum eine schlechtere Bewertung in der Risikoziffer zur Folge haben könnte.*

*Ziel der Anwender sollte es daher sein, die Messunsicherheit durch geeignete Maßnahmen zu senken. Da die Messgenauigkeit der Ultraschallsysteme im Bereich von  $\leq 1 \%$  liegt, ist zur Verbesserung der Messergebnisse noch genügend Potential vorhanden. (Dieses Potential liegt vor allem in der richtigen Durchführung der Messungen. Ergänzung Sn)*

*Typische Fehler bei der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit entstehen vor allem bei folgenden Punkten:*

## 8. Risikoziffer V: Erläuterungen zu den Datenblättern

1. Fehlerhafte, d. h. nur punktuelle Ankopplung von Flächen-Prüfköpfen.
2. Wechselnde Schichtdicke der Koppelmittel oder Wechsel der Koppelmittel, z. B. trockene Ankopplung, mit Ton, mit Ton + Folie.
3. Falsche Auswahl der Prüfköpfe bzgl. der zu messenden Geometrie erzeugt ein Missverhältnis zwischen Prüffrequenz, d. h. Wellenlänge, und Messstrecke. Allein schon dieser Punkt kann über 10 % Messfehler generieren!
4. Falsche Geräteeinstellung bzgl. Signalamplitude und Abtastrate begünstigen einen Laufzeitfehler.
5. Falsche Auswahl der Prüfköpfe in der Software hat eine falsche Korrekturzeit zur Folge.
6. Und ebenso WICHTIG, Fehler bei der Ermittlung der Messstrecke!

Dazu folgendes Beispiel in dem NUR die Punkte 4. und 6. berücksichtigt werden:

Bei einer Messstrecke von 10 cm und einer Laufzeit 45,4  $\mu$ s ergibt sich eine  $V_p$  von 2203 m/s.

Bei einer abweichenden Laufzeit von 2  $\mu$ s auf 47,4  $\mu$ s beträgt  $V_p$  nur 2110 m/s.

Mit einer abweichenden Messstrecke von 5 mm = 9,5 cm beträgt  $V_p$  2092 m/s.

Treten beide Fehler gleichzeitig auf, sinkt  $V_p$  auf scheinbar 2004 m/s = 9 % Messfehler!

Ich möchte mit diesen Ausführungen auf keinen Fall die Handhabung des Verfahrens verkomplizieren, es ist aber leider eine Tatsache, dass bei nicht regelmäßig ausgeführten Arbeiten der Mensch ab und an etwas vergisst. Häufig sind dies bei US-Messungen gerade die Kleinigkeiten, die die Messgenauigkeit betreffen bzw. beeinflussen. Ich erlaube mir deshalb, eine Kurzinformation zur gültigen Norm sowie zu typischen Messfehlern beizufügen, die dem Anwender auf einer Seite komprimiert ein Vermeiden dieser häufigsten Fehlerquellen ermöglichen sollte. Darüber hinaus befinden sich auf unserer Homepage weitere zum Thema passende Dokumente . "

Dass die Messgenauigkeit besonders bei Sandstein von entscheidender Bedeutung ist, zeigt folgende Tabelle:

	$V_p$ km/s frisch	$V_p$ km/s 25 FTW
Sander Schilfsandstein	2,2 – 2,4	1,6 – 2,0
Wüstenzeller Sandstein	2,3 – 2,8	2,5 – 3,0
Regensburger Grünsandstein	2,5 – 3,0	1,6 – 2,7

**Tab. 12:** Ultraschallgeschwindigkeit  $v_p$  ausgewählter Sandsteine im frischen Zustand und nach 25 Frost-Tau-Wechseln (BOURGES 2006)

Zwischen frisch und künstlich verwittert betragen die Unterschiede in  $v_p$  nur wenige hundert Meter pro Sekunde. Hier ist äußerst präzises Messen gefragt, um überhaupt verlässliche Aussagen treffen zu können.

Auch bei der Ultraschallmessung kann es besonders bei Sandsteinen, vorkommen, dass die Ultraschallgeschwindigkeiten  $v_p$  vom verwitterten Objekt höher liegen als die an frischen Gesteinsproben ermittelten  $v_p(o)$ . Die Berechnung der Risikoziffer lässt sich in solchen Fällen nicht durchführen, weil negative Werte auftreten würden. Es stellt sich die Frage, ob Literaturwerte, gemessen an gleichen, aber nicht an Bruchidentischen Sandsteinen überhaupt als Bezugsgrößen dienlich sind, weil die Zuordnung in gewisser Weise willkürlich erscheint. Die Ableitung eines Verwitterungsfortschritts erscheint auf jeden Fall besser begründet, wenn man im System des individuellen Skulpturgesteins bleibt.

Das Ergebnis, warum die Ultraschallgeschwindigkeiten an den verwitterten Objekten höher sind als die an frischen Gesteinen gemessenen Literaturwerte, ist nicht ohne weiteres zu erklären. Es scheint aber wohl so zu sein, dass unsere Kenntnisse der Ultraschallgeschwindigkeiten für Sandsteine allgemein und für Cotta und Schilfsandsteine speziell noch zu begrenzt sind, weil die Varietäten mit den hohen Ultraschallgeschwindigkeiten wahrscheinlich noch nicht beprobt und gemessen wurden. Sie mögen aus Steinbrüchen kommen, die heute nicht mehr bekannt oder in Abbau sind. Die Streubreiten innerhalb dieser Varietäten dürften deshalb wesentlich größer sein als bisher angenommen. Somit taugen die Literaturwerte nicht als Bezugshorizont für diese Objekte. Generell findet sich auch bestätigt, dass die Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit bei Sandsteinen bei weitem nicht so ausgeprägt ist wie bei Marmor.

Erfahrungswerte von KÖHLER (2017 mündliche Mitteilung) besagen, dass bei Sandsteinen im Lauf der Zeit eine Verminderung der Ultraschallgeschwindigkeit um rund 10 % eintritt. Zur Berechnung wird deshalb der maximale Objektwert  $v_p(i \text{ max})$  um 10 % erhöht und als  $v_p(o)$  gesetzt. Auf diese Weise bleibt die Bewertung allein auf die Objektmesswerte bezogen und die Verteilung der Ultraschallveränderungen an dem Objekt kann uneingeschränkt dargestellt werden, ohne dass negative Werte auftreten. Die Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeiten ist damit allein auf das Objektsystem bezogen und nicht mehr auf Literaturwerte.

Bei Marmor ist die Kenntnis über die Ultraschallgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Verwitterungsstadien viel besser als bei Sandstein. Aber auch hier traten bei einigen Objekten sehr gute Werte über 5 km/s auf, so dass für alle Marmorarten einheitlich ein  $v_p(0)$  für den unverwitterten Zustand mit 6 km/s gewählt wurde.

Wenn man bei der Berechnung der Risikoziffern Ultraschall davon ausgeht, dass die minimale Ultraschallgeschwindigkeit  $v_p(\min) = 0$  km/s sei, kommt man zu unrealistisch kleinen Risikoziffern, weil durch den Divisor  $6 = v_p(\max) (6 \text{ km/s}) - v_p(\min) (0 \text{ km/s})$  geteilt wird. Tatsächlich liegt die Untergrenze für Marmor realistisch bei 1,5 km/s, der Ultraschallgeschwindigkeit in Wasser, so dass in allen Fällen mit dem Divisor  $4,5 = v_p(\max) - v_p(1,5)$  gearbeitet wurde.

Diesen Ausführungen sei hinzugefügt, dass die Ultraschallmessungen, die in die Berechnung der Risikoziffer einfließen, in aller Regel nur von erfahrenen Gutachtern durchgeführt werden. Die fertigen Messwerte werden dann in das betreffende Datenblatt übernommen, so dass gravierende Messfehler vermieden werden sollten.

**Beim Ausfüllen des Datenblattes 10: "Ultraschall-diagnostik" gilt es unbedingt zu beachten, dass die Messwerte als bloße Werte eingetragen werden, so dass in den Zellen keine Formeln hinterlegt sind. Die Ultraschallgeschwindigkeit darf also nicht auf dem Datenblatt 9 berechnet werden. Sind auf den Zellen Formeln hinterlegt, funktioniert die automatische Übertragung auf Datenblatt 10 nicht.**

Die im Projekt gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten der Sandsteine an den Objekten aus Großsedlitz und auf dem jüdischen Friedhof in Baidersdorf liegen nahe bei und zum Teil höher als die Literaturwerte für frische Cottaer Sandsteine bzw. für Schilfsandsteine. Auch in diesem Fall wurde so verfahren, den höchsten, am Objekt gemessenen Wert als Bezugsgröße zu wählen. Den Ausführungen von Labor Köhler folgend, wurden auf diesen Wert nochmals 10 % aufgeschlagen. Um diesen Betrag sollte sich erfahrungsgemäß die Ultraschallgeschwindigkeit seit der Gewinnung aus dem Bruch vermindert haben.

#### Datenblatt 12: Gesamtbewertung $R(\text{ges})$

Gemäß empirischer Erfahrung scheint die Gesamtrisikoziffer in Anbetracht der visuell erkennbaren Schäden relativ niedrig zu sein, somit ein geringeres

Gefährdungsrisiko anzuzeigen als man gemäß der persönlichen Einschätzung vermuten würde.

Das quadratische Mittel, welches die hohen Werte stärker gewichtet, kommt der empirischen Einschätzung, welche die Gefahrenlage höher einschätzt, insgesamt scheinbar näher, auch wenn es nur wenig über dem arithmetischen Mittel liegt.

Inwiefern die persönliche, empirische Bewertung einzelne Schäden stärker in den Blick nimmt und damit ein negativeres Bild zeichnet als die auf Zahlen basierende Risikoziffer, ist noch nicht hinreichend verstanden. Vermutlich werden bei der individuellen Betrachtung die peripheren Einflussfaktoren wie Umwelt und Klima, Gesteinseigenschaften und Vandalismusgefahr weniger stark oder gar nicht in den Blick genommen, so dass der negative Eindruck des Schadensbildes in den Vordergrund tritt.

Um diese Diskrepanz auszugleichen, könnten einzelne Datenblätter, die als besonders wichtig für Einstufung des Gesamtrisikos  $R(\text{ges})$  eingeschätzt werden, doppelt oder sogar mehrfach gewichtet werden, so dass sich das berechnete Risiko  $R(\text{ges})$  und das individuell empfundene Risiko besser aneinander angleichen könnten. Es kann aber gezeigt werden, dass diese Methode nicht zu einer Erhöhung der Gesamtrisikoziffer führt sondern zu einer Verkleinerung, weil der Divisor um 1 zunimmt, der Zähler aber nur um eine Zahl  $< 1$  wächst.

Einfache Gewichtung:  $R(\text{ges}) = \sum R(i) / n(i)$

Doppelte Gewichtung eines Parameters:

$$R(\text{ges}) = \sum R(i) / n(i) + R(x) / 1 = \sum R(i) + R(X) / n(i) + 1$$

Das Ergebnis wird also nicht im Sinne der Übereinstimmung zwischen Eindruck und Berechnung "verbessert". Der Grund liegt in der Bildung des Mittelwertes. Wird ein Parameter zwei Mal gewichtet, dann muss auch die Anzahl  $n$  um eins erhöht werden. Wäre die Skala nach oben hin offen, würden doppelte oder mehrfache Gewichtungen zu höheren Werten, d. h. zu scheinbar höheren Risiken führen. Die Skala wäre dann aber nach oben hin offen und man könnte keine Aussage darüber treffen, wie hoch das Risiko tatsächlich ist. Man müsste willkürliche Grenzen setzen, die bislang nicht durch Erfahrungen gestützt wären.

Im Algorithmus für die Berechnung der Risikoziffern  $R(i)$  sind im Übrigen unterschiedliche Gewichtungen bereits eingebaut. So werden die Bewertungsziffern

## 8. Risikoziffer V: Erläuterungen zu den Datenblättern

B(i) für die wichtigeren Parameter mit 10, für die weniger bedeutenden mit zum Beispiel nur 5 vorgegeben.

So kann wohl zu Recht konstatiert werden, dass der hier angewendete Algorithmus mit unterschiedlicher Gewichtung, Normierung auf 1 und Mittelwertbildung die beste Methodik zur Einschätzung eines Risikos ist.

Als letzter Schritt kann noch eine Einstufung hinsichtlich der kunstgeschichtlichen Bewertung B(KB) vorgenommen werden. Dazu wird die Gesamt Risikoziffer R(ges) des Objekts mit dessen kunstwissenschaftlichen Bewertungsziffer B(KB) multipliziert. Mit dieser Prozedur wird eine Rangfolge bestimmt, welches Objekt in einer Sammlung in Anbetracht seiner Gefährdung und kunstwissenschaftlichen Bedeutung zuerst behandelt werden müsste.

- **Signifikanz der Risikoziffer**

Welchen Wert die Risikoziffer eines Objekts auch immer haben möge, es stellt sich die Frage, wie groß die zahlenmäßige Änderung sein muss, um daraus den gerechtfertigten Schluss auf eine größere oder mindere Gefährdung ziehen zu können. Die Gesamtrisikoziffer R(ges) wird berechnet gemäß

$$R(\text{ges}) = \sum R(i) / n(i)$$

R(i) = hier Risikoziffer eines Datenblattes, z. B. R(Umwelt)

Im Normalfall beträgt  $n = 7$  (= Anzahl der Datenblätter), so dass

$$R(\text{ges}) = \sum R(i) / 7$$

Verändert sich ein R(i) um 0,5, so resultiert

$$R(\text{ges}) = (\sum R(i) + 0,5) / 7 = \sum R(i) / 7 + 0,5 / 7 = R(\text{ges}) + 0,07.$$

Der kleinen Änderung von 0,07 der Gesamtrisikoziffer R(ges) steht eine große Änderung von 0,5 einer einzelnen Risikoziffer R(i) gegenüber. Kleinste Unterschiede in der Gesamtrisikoziffer R(ges) können bedeutende Risiken in Einzeldatenblättern oder Einzelparametern anzeigen. Allerdings kann eine Änderung um 0,5 auch durch kleine Änderungen der Risikoziffern bei mehreren Datenblättern verursacht werden. Das bedeutet, dass bei der Risikobewertung den Zahlenunterschieden durch Interpretation der Datenblätter nachgegangen werden muss.

Eine weitere Frage stellt sich nach der Qualität der Auswertung. Basiert die Berechnung der Risikoziffer nur auf wenigen Messwerten, so ist die Aussagekraft naturgemäß weniger gut als wenn sie auf vielen Parametern beruht. Es gibt jedoch keine feste Vorschrift, welche Parameter immer ausgefüllt werden müssen. Vielmehr werden bei jeder Auswertung immer mehrere Parameter nicht berücksichtigt, weil sie entweder nicht zutreffend oder nicht verfügbar sind. Diese werden im Rechenprozess jedoch genauso mit Null

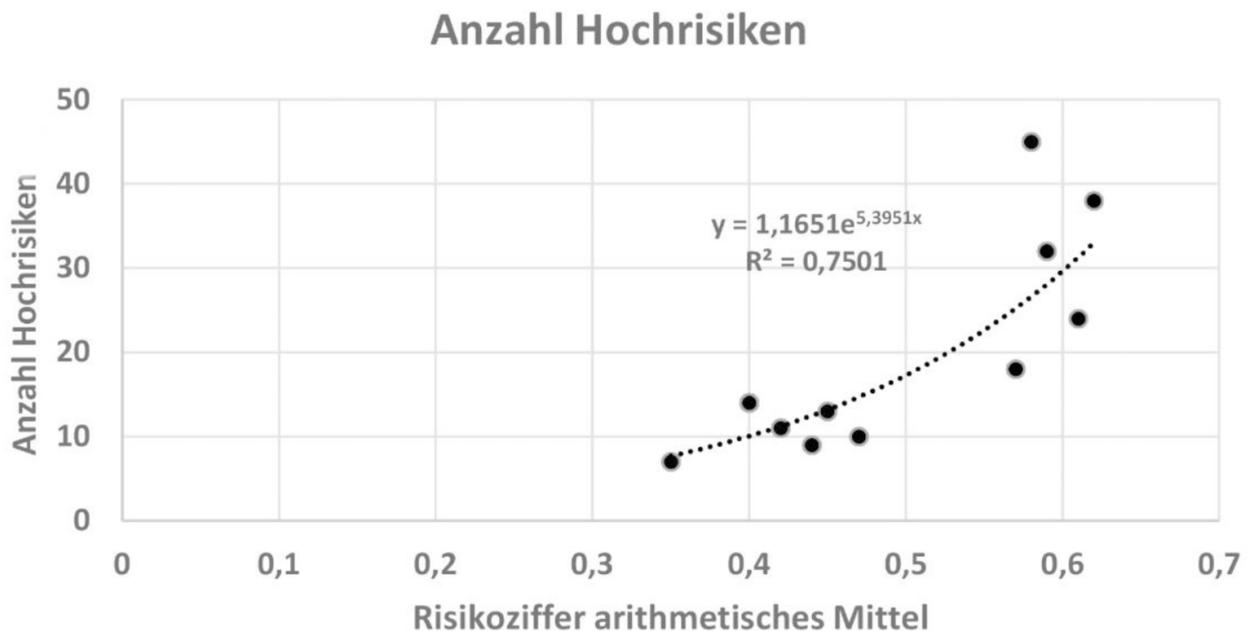


Abb. 9 Anzahl der Hochrisiken.

bewertet wie Parameter, deren Messwert Null beträgt. Eine fixe Vorschrift ist aus diesem Grund nicht möglich. Stattdessen kann aber verlangt werden, dass für eine aussagekräftige Risikoziffer in allen Datenblättern Eintragungen getätigt wurden.

- **Korrelation der Risikoziffer mit Datenblättern**

Konzeptionell wäre zu erwarten, dass die Risikoziffer mit Parametern wie Umwelt, Natursteineigenschaften, Materialverlust, Veränderungen der Oberfläche und Ultraschall korrelieren sollte. In dieser Hinsicht sind Versuche gemacht worden, Korrelationen mit einem oder mehreren Parametern festzustellen, die jedoch in keinem Fall erfolgreich verliefen. Am besten ist noch eine Korrelation mit der Anzahl der Hochrisiken nachweisbar. Die betreffende Graphik ist in der Abbildung 9 gezeigt.

Man erkennt einen exponentiellen Anstieg zu höheren Risikoziffern, was in gewisser Hinsicht auf eine Gesetzmäßigkeit hinweisen könnte. Die höchste Anzahl an Hochrisiken ist der Marmorskulptur Vestalin zugeordnet, wobei 25 Hochrisiken an dieser Figur aber allein auf niedrige Ultraschallwerte zurückgehen. Die nächsthöheren Hochrisiken betreffen die stark beschädigten Originalfiguren von Hera und Kybele im Depot des Schlossgartens Großsedlitz. Diese Beschädigungen gehen aber auf Einschläge von Granatsplittern bei Kämpfen im Zweiten Weltkrieg zurück und nicht auf Folgen natürlicher Verwitterung. Es ist demnach nicht gerechtfertigt, aus dieser Graphik eine allgemeine Gesetzmäßigkeit herauszulesen.

#### Literaturverzeichnis

BAEDECKER PA ET AL (1990): Effects of Acidic Deposition on Carbonate Stone. NPAP Report 19, Section 3, Washington DC. 414 pp.

BOURGÈS ANN (2006): Holistic correlation of physical and mechanical properties of selected natural stones for assessing durability and weathering in the natural Environment. Dissertation LMU München.

DAMJANOVIC SANDRA (2013): Sehen, fühlen, Messen. Erprobung der Profilemssmethode zur Einschätzung der Kantenabwitterung und der Beurteilung von Oberflächenrauheiten mit Hilfe von Sandpapieren sowie die messtechnische Ermittlung von Rauheitskenngrößen mit Hilfe des TRACEIT Ssystems an Carrara Marmorproben. Bachelor Thesis Studiengang Restaurierung FH Potsdam.

FEPa STANDARDS (2006): <http://www.fepa-abrasives.org>. Aus DAMJANOVIC (2013)

GRUNERT SIEGFRIED (2007): Cottaer und Postaer Elbsandstein – technisch-petrographische Grundlagen der Differenzierung. In: H Siedel, Ch Franzen, St Weise Hrsg. Elbsandstein. S 13-22. Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt. Dresden.

HUBEL ACHIM (2006): Denkmalpflege. Geschichte, Themen, Aufgaben. Eine Einführung. Reclam Stuttgart.

ICOMOS ISCS (2010): Illustriertes Glossar der Verwitterungsformen von Naturstein. Englisch-Deutsche Fassung. Monuments and Sites XV. Michael Imhof Verlag Petersberg.

KLOPFER HEINZ (1979): Das Kapillarverhalten poröser Baustoffe. Techn. Akad. Eßlingen. Lehrgang Nr. 4280/79.88.

SNETHLAGE ROLF, KOCHER MATHIAS (2002): Results of Artificial and Natural Weathering Tests on Marble in EC Projekt HERMES. Proceedings 12th Workshop EUROCARE EUROMARBLE, Schloss Lindstedt Potsdam 4-6 Oct 2001. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege Zentrallabor Forschungsbericht 20/2002, 3-13

KONIETZKY HEINZ, SIEDEL HEINER (2015): Innovatives Verfahren zur Festigung von schwer konservierbaren umweltgeschädigten Sandsteindenkmälern und numerische geomechanische Simulation der Risiken. Abschlussbericht des DBU geförderten Projekts. TU Bergakademie Freiberg & TU Dresden Geotechnik.

KROMPHOLZ ROLF (2017) Geotron-Elektronik Rolf Krompholz. Pers. Mitteilung. Pirna.

LIPPERT F W (1989): Atmospheric Damage to Calcareous Stones. Comparison and Reconciliation of Recent Experimental Findings. Atmospheric Environment 23(2), 415-428

RIEGL, ALOIS (1903): Der moderne Denkmalkultus. Sein Wesen und seine Entstehung. In: A. Riegl: Gesammelte Aufsätze. Augsburg, Wien.

RÜDRICH JÖRG (2003): Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore. Dis-

## 8. Risikoziffer V: Erläuterungen zu den Datenblättern

sertation Fakultät Mathematik Naturwissenschaften  
Universität Göttingen

SIEGSMUND SIEGFRIED, DÜRRAST HELMUT (2014):  
Physical and Mechanical Properties of Rocks. In:  
Siegfried Siegesmund & Rolf Snethlage eds. Stone  
in Architecture. Properties Durability. Vth Edition.  
Springer Verlag Berlin Heidelberg.

SIMON STEFAN, SNETHLAGE ROLF (1996): Marble  
Weathering in Europe - Results of EURO CARE EU-  
ROMARBLE Exposure Programme 1992 - 1994. In: J.  
RIEDERER (ed.), Proceedings 8th Intern. Congress on  
Deterioration and Conservation of Stone, p. 159-166,  
Berlin, 1996

SNETHLAGE ROLF (1984): Steinkonservierung 1979  
– 1983. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege.  
Arbeitsheft 22. München

SNETHLAGE ROLF (1996): Natursteinkonservierung  
in der Denkmalpflege.- Bayerisches Landesamt für

Denkmalpflege, Arbeitsheft 80, S. 329 und 237. Mün-  
chen.

SNETHLAGE ROLF (2011): Die Rückwitterung von  
Marmor an Kanten und Ecken – Betrachtung der  
chemischen und mechanischen Prozesse. Interner  
Bericht DBU Projekt „Erarbeitung eines Leitfadens  
für Ultraschallmessungen an umweltgeschädigten  
Marmorskulpturen.

WEISS THOMAS, RASOLOFOSON PNJ, SIEGSMUND  
SIEGFRIED (1999): Ultrasonic velocities as diagnostic  
tool for the quality assessment of Marble. In: S. Sie-  
gesmund, T. Weiss, A. Vollbrecht (eds) Natural Stone.  
Weathering phenomena, conservation strategies and  
case studies. Geological Society Special Publications.  
London.

[WWW.SALZWIKI.DE/index.php/Prüfröhrchen\\_nach\\_KARSTEN](http://WWW.SALZWIKI.DE/index.php/Prüfröhrchen_nach_KARSTEN)

Rolf Snethlage

## 9. Risikoziffer VI: Auswertungen und Vergleiche

### Zusammenfassung

Die für die ausgewählten Objekte errechneten Gesamt-Risikoziffern variieren zwischen 0,36 und 0,65. Für die Einschätzung dieser Werte ist die Tatsache wichtig, dass die Minimal- und Maximalwerte der Gesamt-Risikoziffer nicht die Werte Null und Eins erreichen können. Das liegt daran, dass bestimmte Datenblätter auf Grund der darin stattfindenden Rechengänge ebenfalls nicht Eins oder Null sein können. Diese Ober- und Untergrenzen sind für Sandsteine und Marmor verschieden. Die Berechnungsmethode für die Gesamt-Risikoziffer kann auch dazu verwendet werden, die Aufstellungsorte im Freien und in einem Depot zu simulieren. Ein Wechsel vom Freien und umgekehrt ist mit einer Abnahme bzw. Zunahme der Risikoziffer um durchschnittlich 20 % verbunden.

### Abstract

The Overall Risk Numbers calculated for selected sculptures vary from  $R = 0.36$  to  $0.65$ . For appropriately appraising these figures, it is important to consider that for theoretical reasons the Overall Risk Number will never reach the value Zero nor One. The reason for this is that certain parameters in the data sheets will prevent under whatever conditions reaching Zero or One. However, the upper and lower limits of the Overall Risk Number differ for sandstone and marble. The calculation methodology for the Overall Risk Number enables to simulate for one object an exposition condition in the open air or in a depot. The Overall Risk Number increases or decreases on average by 20 % when changing from outdoor exposition to indoors and vice versa.

### 1. Einleitung

Wie in dem Beitrag „Risikoziffer – eine Einführung“ erläutert, wird die Risikoziffer auf dem Datenblatt 12 der Excel Arbeitsmappe automatisch errechnet. Zwar sind auf dieser Arbeitsmappe das arithmetische Mittel der Risikoziffer als auch das quadratische Mittel aufgeführt, in den folgenden Überlegungen wird jedoch nur auf das arithmetische Mittel Bezug genommen, denn das quadratische Mittel liefert zwar zahlenmäßig leicht andere Werte, die Gesamttendenz der Aussage bleibt jedoch unverändert.

	Barockgarten Großsedlitz Hera Original Sandstein Typ Cotta Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,64$
	Barockgarten Großsedlitz Hera Juno Kopie Sandstein Typ Cotta Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,53$
	Barockgarten Großsedlitz Rhea Kybele Original Sandstein Typ Cotta Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,64$
	Barockgarten Großsedlitz Rhea Kybele Kopie Sandstein Typ Cotta Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,55$

Abb. 1: Gesamt-Risikoziffern der bearbeiteten Objekte.

## 9. Risikoziffer VI: Auswertungen und Vergleiche

Die Berechnungen der individuellen Risikoziffern der bearbeiteten 12 + 1 Objekte ergaben bei einer ersten, unvoreingenommenen Betrachtung überraschende Resultate, die sich jedoch, wie hier gezeigt werden wird, als sehr sinnvoll erwiesen haben.

### 2. Auswertungen und Vergleiche

Zunächst werden hier die berechneten Risikoziffern der einzelnen Skulpturen und Grabmäler vorgestellt (s. Abb. 1 - 3).

Ein erster Blick auf die Zahlenwerte zeigt, dass die Risikoziffern in einer Spanne zwischen 0,35 (Grabmal 1091 Buntsandstein) und 0,65 (Vestalin Carrara Marmor) liegen. Dabei überrascht, dass die Risikoziffern für die nach Augenschein besonders geschädigten und im Bestand bedrohten Skulpturen Hera Original und Kybele Original zwar beide ziemlich am Ende der Skala liegen, sich aber nicht aus dem Durchschnitt herausheben. Der subjektiven Einschätzung erscheint besonders der Abstand zum maximalen Risiko  $R_{ges} = 1$  mit 0,4 bzw. 40 % als viel zu hoch und unrealistisch. Die Diskrepanz zwischen der nach visuellem Eindruck subjektiv getroffenen Einschätzung und der nach objektiver und quantitativer Methode errechneten Risikoziffer kann nun dazu verleiten, den Rechenalgorithmus anzupassen, um näher an das maximale Risiko heranzukommen. Dieser Widerspruch löst sich jedoch schnell auf, wenn man die Ursachen der gravierenden Schäden an den beiden Figuren in Betracht zieht. Die Schäden sind nämlich nicht verwitterungsbedingt, sondern durch Granatsplitter verursacht, da der Barockgarten Großsedlitz im Zweiten Weltkrieg an der Frontlinie mit schweren Kämpfen lag. So bleiben die eigentlichen Gesteinseigenschaften maßgeblich für die Höhe der Risikoziffer, die deshalb ein realistisches Bild der Situation wiedergeben sollte.

Der Versuch einer besseren Anpassung an die subjektive Einschätzung durch die doppelte Gewichtung eines besonders relevanten Datenblattes, wie zum Beispiel des Datenblattes 6: Naturstein Endogene Risikofaktoren führt je nach Höhe der Risikoziffer des betrachteten Objekts nicht zu einem „besseren“, unter Umständen sogar zu einem „schlechteren“ Ergebnis, wie eine kleine Rechnung zeigt.

Einfache Gewichtung:  $R_{ges} = \sum R(i) / n(i)$

Doppelte Gewichtung eines Parameters:

$$R_{ges} = \sum R(i) / n(i) + R(x) / 1 = [\sum R(i) + R(x)] / (n(i) + 1)$$

	Schlosspark Nymphenburg Äolus Sterzinger Marmor Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,60$
	Schlosspark Nymphenburg Flora Laaser Marmor Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,59$
	Schlosspark Sanssouci Neue Kammern Apoll Carrara Marmor Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,49$
	Schlosspark Sanssouci Neue Kammern Vestalin Carrara Marmor Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,65$

Abb. 2: Gesamt-Risikoziffern der bearbeiteten Objekte.

	Schlosspark Sanssouci Halbrondell vor dem Neuen Palais Satyr Carrara Marmor Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,39$
	Baiersdorf bei Erlangen Jüdischer Friedhof Grabmal Siegmund Sulzberger Schilfsandstein Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,41$
	Baiersdorf bei Erlangen Jüdischer Friedhof Grabmal Bernhard Ehrenbacher Schilfsandstein Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,40$
	Baiersdorf bei Erlangen Jüdischer Friedhof Nr 935 Grabmal Löw Gans Schilfsandstein Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,45$
	Baiersdorf bei Erlangen Jüdischer Friedhof Nr 1091 Grabmal Name unbekannt Buntsandstein Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,36$

Abb. 3: Gesamt-Risikoziffern der bearbeiteten Objekte.

In unseren Berechnungen der Gesamt-Risikoziffer wird das arithmetische Mittel immer aus 7 Datenblättern und der deren Risikoziffer berechnet. Wird ein Datenblatt doppelt gewertet, erhöht sich der Quotient von 7 auf 8. Eine geringfügig „bessere“ Anpassung an das Maximalrisiko Eins ergibt sich nur, wenn der Risikowert des doppelt gewichteten Datenblattes größer ist als die Gesamt-Risikoziffer. Ist er niedriger, entfernt sich die neue Gesamt-Risikoziffer dagegen vom Maximalrisiko.

Aufgrund der Struktur der Risikoziffer ist es auch unerlässlich, den Divisor jeweils zu erhöhen, wenn Datenblätter doppelt gewichtet werden. Die Skala ist nicht nach oben offen, sondern auf den Maximalwert 1 begrenzt. Würde man beim regulären Divisor 7 bleiben, könnte der Fall eintreten, dass die Gesamt-Risikoziffer über den Wert 1 ansteigt. Man hätte dann Probleme, die Resultate als Bruchteil des Maximalrisikos von 1 einzuordnen.

### 2.1 Realistische Maximalrisiken für Marmor und Sandstein

Die nachfolgende Graphik zeigt die Gesamt-Risikoziffern der untersuchten Objekte in einem Säulendiagramm. Dabei sind wie oben die Gesamt-Risikoziffern dargestellt, die einer Aufstellung im Freien zugeordnet sind. Das Objekt mit der geringsten Risikoziffer ist das Grabmal 1091, das mit der höchsten Risikoziffer die Vestalin. Zusätzlich sind am oberen und am unteren Ende der Skala die realistischen Unter- und Obergrenzen eingetragen, die sich für Marmor und Sandstein ergeben. Diese Grenzen geben an, welche Werte die Gesamt-Risikoziffer für diese Gesteinsarten maximal und minimal einnehmen kann. Für Marmor reicht die Spanne von 0,24 bis 0,88, für Sandstein von 0,18 bis 0,79.

Die Ursache für diese Grenzwerte liegt in der Tatsache begründet, dass bestimmte Datenblätter bzw. Parameter in diesen nicht den Wert 0 oder 1 erreichen können.

So kann das Datenblatt „Umwelt- Exogene Risikofaktoren“ zwar den theoretischen Wert Eins im Fall eines Extremklimas annehmen, jedoch nie den Wert Null, weil es ein Nicht-Klima als Einflussfaktor nicht geben kann.

Ebenso verhält es sich mit den Datenblättern „Naturstein – Endogene Risikofaktoren“ und „Vandalismus“. Auch in sehr günstigen Klima üben thermische und hygische Dehnung und die Wasseraufnahme einen

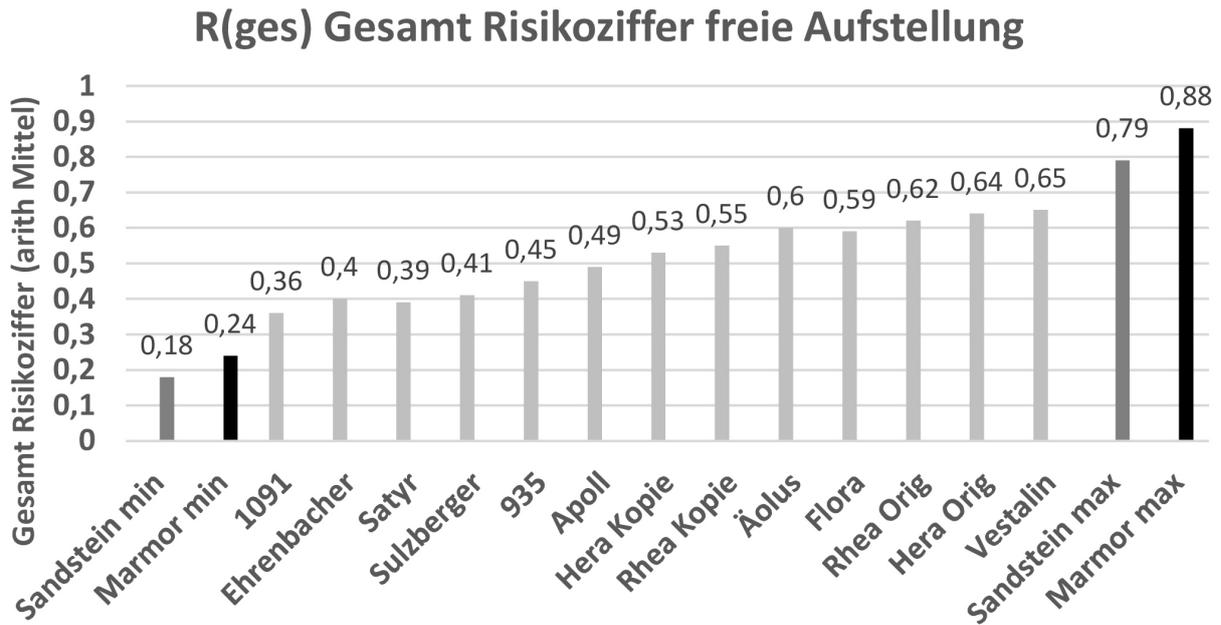


Abb. 4: Darstellung der Gesamt-Risikoziffern mit realistisch erreichbaren Unter- und Obergrenzen.

Einfluss auf die Verwitterung aus. Ein Minimalrisiko für Vandalismus besteht bei jeglicher Aufstellung im Freien.

werden nie an allen Messstellen den niedrigsten möglichen Wert annehmen, sonst wären die Objekte schon längst zusammengebrochen (s. Abb. 4).

Andererseits werden die Datenblätter „Materialverlust“, „Veränderungen der Oberfläche“ und „Ultraschalldiagnostik“ nie den Wert Eins, das maximale Risiko erreichen. Der Materialverlust kann drohend, aber nie vollständig sein, es wird neben stark geschädigten Oberflächen auch Bereiche mit geringerer Schädigung geben und auch die Ultraschallwerte

In Gegensatz zur eingangs erörterten Gesamtspanne für die Gesamt-Risikoziffern von Null bis Eins, steht jetzt ein verminderter Bereich zur Verfügung, in dem sich die Gesamt-Risikoziffern bewegen können. Jetzt liegt die schlechteste Marmorfigur Vestalin nicht mehr 0,35 Punkte, sondern nur noch 0,23 Punkte von der realistischen Obergrenze entfernt. Auch Hera und

### Gesamt Risikoziffer Marmor bezogen auf R(max)

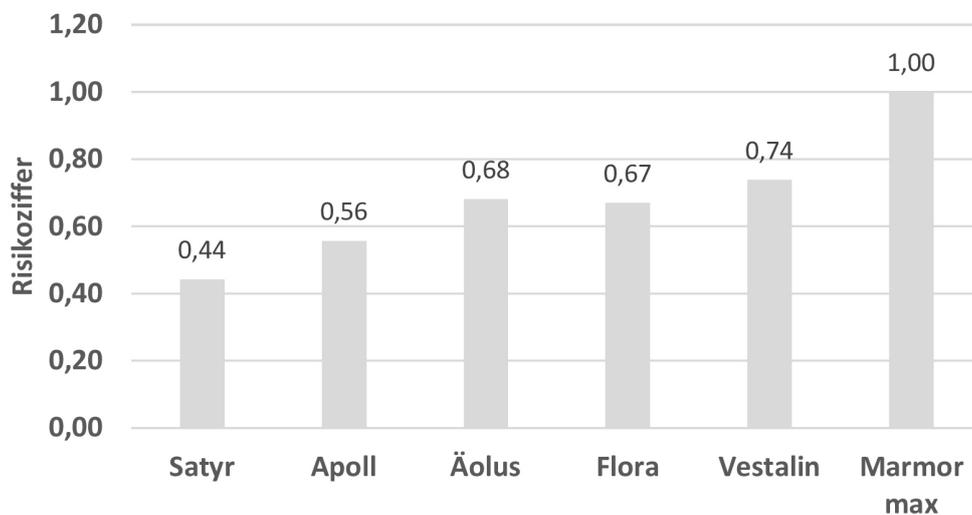


Abb. 5: Gesamt-Risikoziffern der Marmorobjekte bezogen auf die Obergrenze Rmax = 0,88.

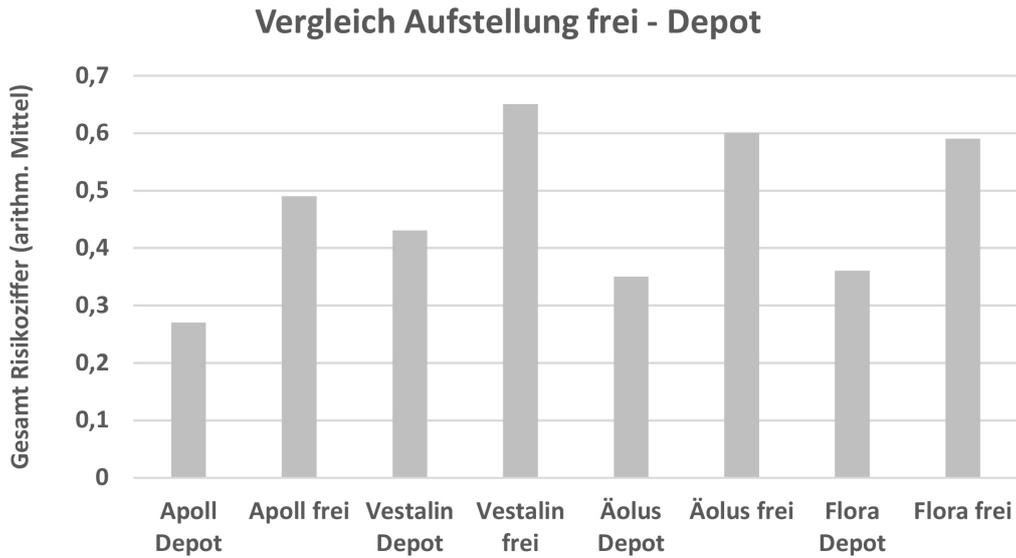


Abb. 6: Modellrechnung für Aufstellung frei – Depot für die untersuchten Marmorobjekte.

Rhea liegen jetzt nur noch 0,15 bzw. 0,17 Punkte von der Obergrenze für Sandstein entfernt.

Man kann aus diesem Ergebnis folgern, dass die Bewertung durch die Risikoziffer den tatsächlichen Gefährdungsgrad besser und objektiver wiedergibt als die auf visuellem Eindruck begründeten, subjektiven Einschätzungen. Was den Unterschied zwischen beiden Einordnungsprinzipien ausmacht, so scheint es die eingengegte Sichtweise der visuellen Bewertung zu sein, welche bei ihrem subjektiven Bewertungsschlüssel die anderen Risikofaktoren wie Klima, Vandalismus, Steineigenschaften und Ultraschallgeschwindigkeiten außer Acht lässt. Sie verlässt sich dagegen einzig auf die Datenblätter Mechanische Schäden – Materialverlust und Veränderungen der Oberfläche.

Um die Darstellung der Werte der Gesamt-Risikoziffer deutlicher zu machen, bietet sich an, die berechneten Werte auf die verringerte Spanne umzurechnen. Diese Manipulation hat aber nur ein verändertes Bild zur Folge, das einer Projektion in einen geringeren Maßstab gleichkommt. Auch die Festsetzung der realistisch erreichbaren Obergrenze als Maximalrisiko Eins bringen kein besseres Ergebnis hervor. Die Werte aller Gesamt-Risikoziffern steigen an und die vormals niedrig risikobehafteten Figuren sind plötzlich mit einem viel zu hohen Risiko behaftet. Außerdem wäre dieser zusätzliche Rechenschritt umständlich einzubauen. In Abbildung 5 ist die zu diesem Rechenschritt gehörige Graphik für das Beispiel der Marmorfiguren dargestellt.

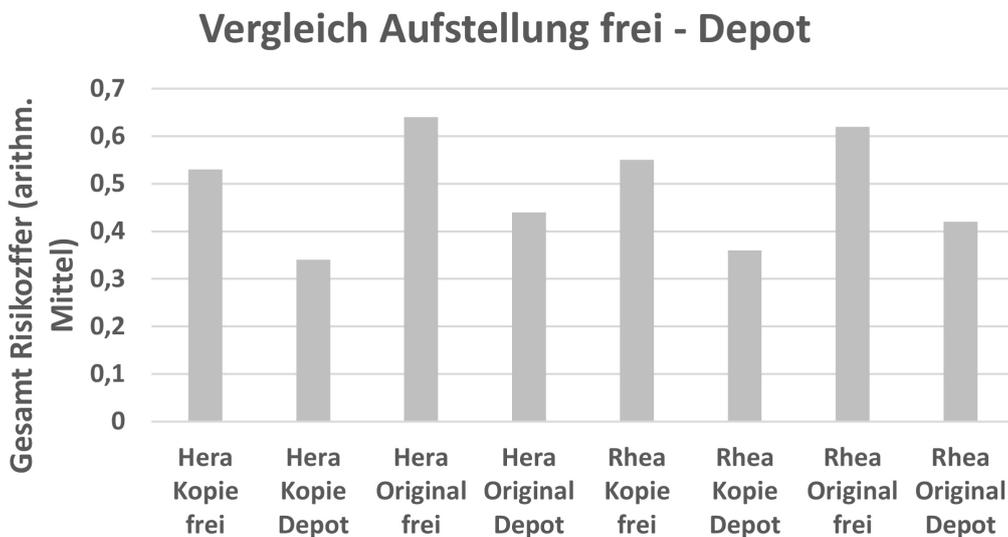


Abb. 7: Modellrechnung für Aufstellung frei – Depot für die untersuchten Sandsteinobjekte.

**2.2 Modellrechnungen Aufstellung frei - Depot**

Das Rechensystem für die Gesamt-Risikoziffer erlaubt es auch, Modellrechnungen für eine Aufstellung im Freien oder im Depot auszuführen. Relevant hierfür sind die Datenblätter für Umwelt – Exogene Risikofaktoren, Vandalismus und bestimmte Gesteinseigenschaften wie thermische und hygrische Dehnung, die je nach Aufstellungsort unterschiedlich sind. Die Ergebnisse der Modellrechnungen sind getrennt für Sandstein und Marmor in den folgenden Diagrammen gezeigt. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Figur von Depot ins Freie oder umgekehrt vom Freien ins Depot umgestellt werden soll (s. Abb 6 und 7).

Umwelt, Natursteineigenschaften, Materialverlust, Veränderungen der Oberfläche und Ultraschall korrelieren sollte. In dieser Hinsicht sind Versuche gemacht worden, Korrelationen mit einem oder mehreren Parametern nachzuweisen, was jedoch in keinem Fall zu einem Ergebnis geführt hat. Am besten stellt sich noch eine Korrelation zwischen der Anzahl der Hochrisiken und der Gesamt-Risikoziffer dar. Die betreffende Graphik ist in der folgenden Abbildung 8 gezeigt.

Man erkennt einen exponentiellen Anstieg zu höheren Risikoziffern, was in gewisser Hinsicht auf

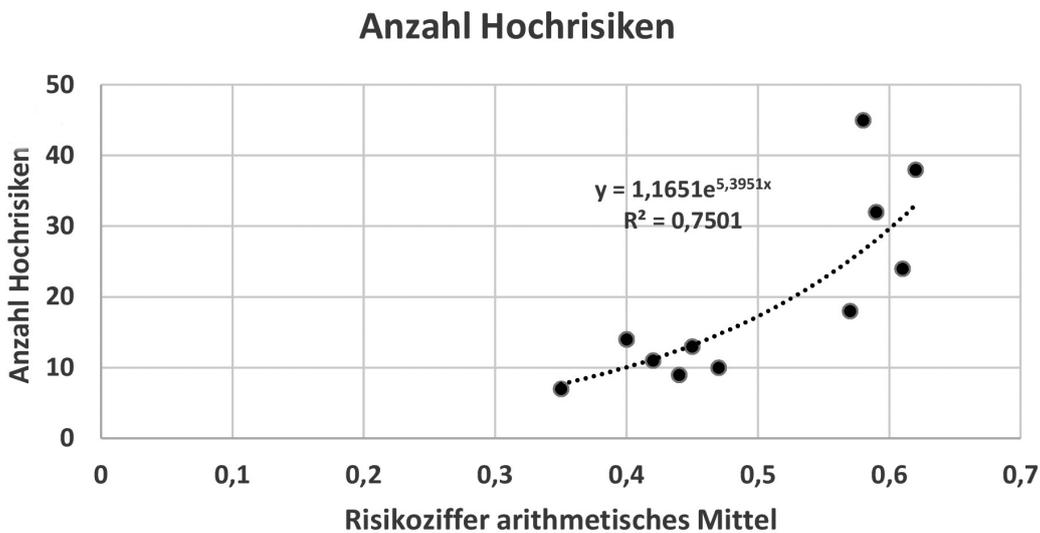


Abb. 8: Korrelation zwischen Hochrisiken und Gesamtrisikoziffer.

Die Vergleiche belegen, dass sich das Risiko beim Verbringen vom Freien in ein Depot bei den Marmorobjekten um 0,22 bis 0,25 Punkte verringert, bei den Sandsteinobjekten um 0,18 bis 0,22 Punkte. Anders ausgedrückt, bringt der Transfer einer Skulptur vom Freien ins Depot eine Verringerung des Risikos um durchschnittlich 20 % mit sich. Solche Zahlen können eine wertvolle Argumentationshilfe in der Diskussion um die sichere Verwahrung von Denkmälern im Freien darstellen.

**2.3 Korrelation der Risikoziffer mit Hochrisiken**

Der Begriff Hochrisiko wurde in die Auswertung der Risikobetrachtung eingeführt, um dem Bearbeiter einen schnellen Blick auf diejenigen Stellen oder Eigenschaften einer Figur aufzuzeigen, die einer besonderen Beachtung und möglicherweise ein schnelles Eingreifen erfordern.

Man sollte vom Aufbau der Datenblätter ausgehend erwarten, dass die Risikoziffer mit Parametern wie

eine generelle Gesetzmäßigkeit hinweisen könnte. Die höchste Anzahl an Hochrisiken ist der Marmor-skulptur Vestalin zugeordnet, wobei 25 Hochrisiken an dieser Figur aber allein auf niedrige Ultraschallwerte zurückgehen. Die nächsthöheren Hochrisiken betreffen die stark beschädigten Originalfiguren von Hera und Kybele im Depot des Barockgartens Großsedlitz. Diese Beschädigungen gehen aber auf Einschläge von Granatsplittern bei Kämpfen im Zweiten Weltkrieg zurück und nicht auf Folgen natürlicher Verwitterung. Es ist demnach nicht gerechtfertigt, aus dieser Graphik eine allgemeine Gesetzmäßigkeit herauszulesen.

**2.4 Signifikanz der Risikoziffer**

Welchen Wert die Risikoziffer eines Objekts auch immer haben möge, es stellt sich die Frage, wie groß die zahlenmäßige Änderung der Gesamt-Risikoziffer sein muss, um daraus den gerechtfertigten Schluss

auf eine größere oder mindere Gefährdung ziehen zu können. Wie wir gesehen haben, liegen die Werte einiger Skulpturen sehr nahe beieinander wie zum Beispiel Äolus ( $R(\text{ges}) = 0,60$ ) und Flora ( $R(\text{ges}) = 0,59$ ). Die Frage lässt sich näherungsweise wie folgt beantworten.

Die Gesamtrisikoziffer  $R(\text{ges})$  wird berechnet gemäß

$$R(\text{ges}) = \sum R(i) / n(i)$$

$R(i)$  = hier Risikoziffer eines Datenblattes, z. B.  $R(\text{Umwelt})$

Im Normalfall beträgt  $n = 7$  (= Anzahl der Datenblätter), so dass

$$R(\text{ges}) = \sum R(i) / 7$$

Verändert sich das Teilrisiko eines Datenblatts  $R(i)$  um 0,5 oder 0,1, so resultiert

$$R(\text{ges}) = (\sum R(i) + 0,5) / 7 = \sum R(i) / 7 + 0,5 / 7 = R(\text{ges}) + 0,07.$$

$$R(\text{ges}) = (\sum R(i) + 0,1) / 7 = \sum R(i) / 7 + 0,1 / 7 = R(\text{ges}) + 0,014.$$

Der kleinen Änderung von 0,07 der Gesamtrisikoziffer  $R(\text{ges})$  steht eine sehr große Änderung von 0,5 eines einzelnen Datenblatts  $R(i)$  gegenüber. Kleinste Unterschiede in der Gesamtrisikoziffer  $R(\text{ges})$  können bedeutende Risiken in Einzeldatenblättern oder Einzelparametern anzeigen. Sie gehen dort mit dem Faktor 7 in die Berechnung ein. Allerdings kann eine

Änderung um 0,5 auch durch kleine Änderungen der Risikoziffern bei mehreren Datenblättern verursacht werden. Das bedeutet, dass bei der Risikobewertung den Zahlenunterschieden durch Interpretation der Datenblätter nachgegangen werden muss. Eine generelle Aussage ist kaum möglich. Selbst scheinbar kleine Unterschiede der Gesamt-Risikoziffern von 0,01 dürfen nicht vernachlässigt werden.

### 2.5 Vereinfachte Risikoeinstufung

Wie die Berechnungen der Risikoziffer für die ausgewählten Objekte gezeigt haben, überdecken die Zahlenwerte der Risikoziffern eine Spanne von 0,36 bis 0,65. Die theoretischen Ober- und Untergrenzen liegen jedoch nicht bei Null und Eins, sondern reichen von 0,18 bis 0,79 bei Sandstein und von 0,24 bis 0,88 bei Marmor. Vereinfacht lassen sich drei Bereiche der Gefährdung abgrenzen: „Wenig gefährdet“ – „gefährdet“ – „hoch gefährdet“. Die Bereiche erstrecken sich annähernd von Risikoziffer 0,2 bis 0,4, von 0,4 bis 0,6 und von 0,6 bis 0,8. Damit ist die theoretische Obergrenze praktisch erreicht (s. Abb. 9 und 10)).

### 3) Ausblick

Die Ausführungen haben gezeigt, dass das Konzept der Risikoziffer sehr gut den Gefährdungsgrad von Skulpturen im Freien darstellt. Die festgestellten Unterschiede in der Bewertung zwischen der visuell subjektiven und der objektiv rechnerische ermittelten Risikoziffer führten anfänglich zu dem Schluss, dass die Risikoziffer die Gesamtsituation nicht zutreffend abbilden würde. Durch die Erkenntnis, dass die Gesamt-Risikoziffer aber nicht die Werte Null und

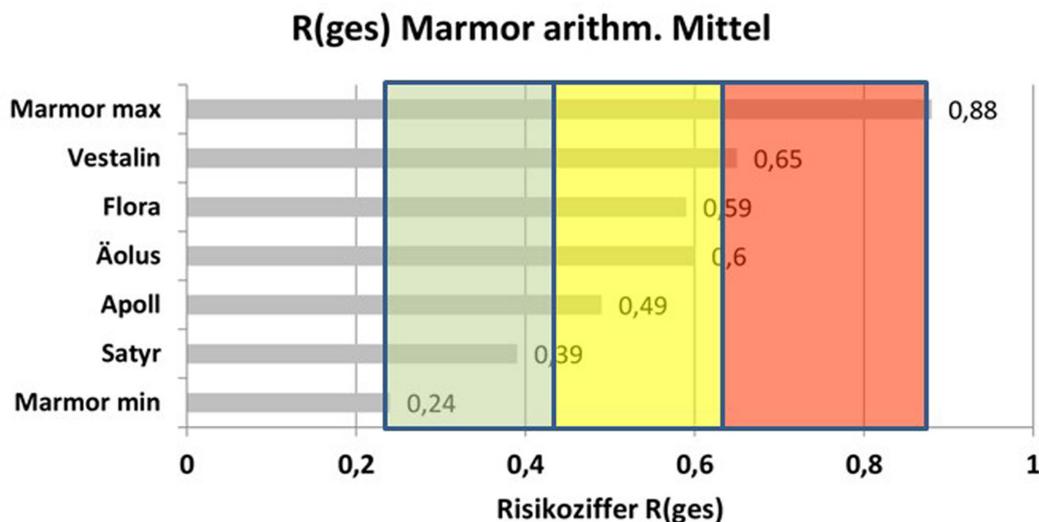


Abb. 9: Vereinfachte Einstufung wenig gefährdet - gefährdet - hoch gefährdet für Marmor.

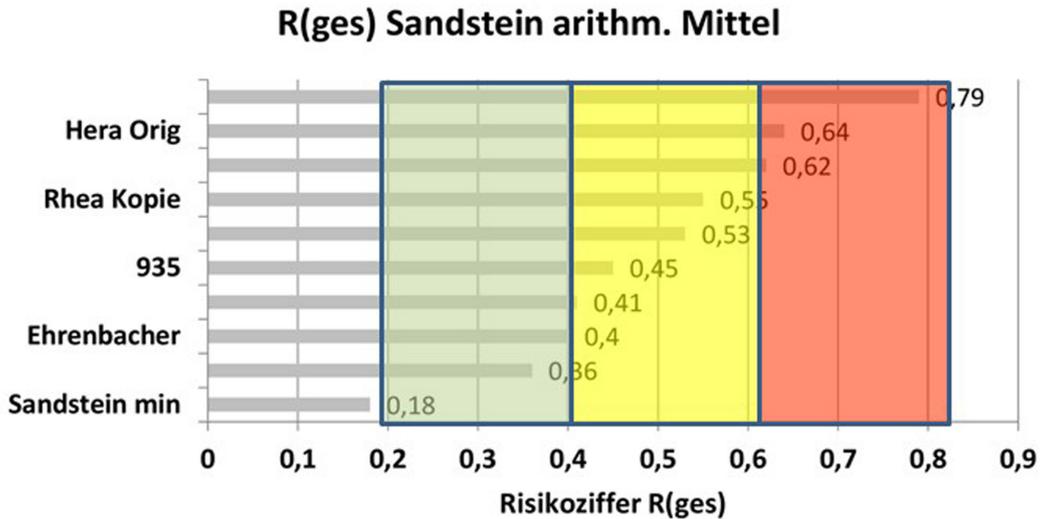


Abb. 10: Vereinfachte Einstufung wenig gefährdet - gefährdet - hoch gefährdet für Sandstein.

Eins erreichen kann, löst sich dieser scheinbare Widerspruch aus. Die Werte der Risikoziffer stellen das Gefährdungsrisiko der Figuren objektiv und realistisch dar.

Modellrechnungen erlauben weiterhin die Aussage, um wieviel das Risiko für eine Figur abnimmt, wenn sie vom Freien in ein Depot gebracht wird. Das Risiko sinkt in solchen Fällen um durchschnittlich 20 %, was eine beträchtliche Verminderung darstellt. Vollständig Null kann das Risiko in einem Depot aber auch nicht sein, denn immer noch wirken, wenn auch in geringerem Maße, klimatische Effekte auf die Figuren ein. Ferner bleiben Risikofaktoren wie eine niedrige Ultraschallgeschwindigkeit bestehen, obgleich sich

im Depot wahrscheinlich keine Verschlechterung mehr einstellen wird.

Die Resultate zeigen in ihrer Gesamtheit, dass allen Eigentümern empfohlen werden kann, ihren Skulpturenbestand untersuchen und mit Hilfe der Risikoziffer deren Gefährdungsgrad bestimmen zu lassen. Die Risikoziffer gibt zwar keine konkreten Hinweise auf zu ergreifende Maßnahmen, mit der Anzeige der Hochrisiken deutet sie aber auf die Hauptrisiken hin, die bei anstehenden Maßnahmen diskutiert werden können.

Rolf Snethlage

## 10. Risikoziffer VII: Ausblick

Die Testanwendungen an 13 Skulpturen und Grabmälern aus Marmor und aus Sandstein, die im Verlauf des Projekts vorgenommen wurden, haben gezeigt, dass das Konzept „Risikoziffer“ die Erwartungen voll erfüllt hat, Umweltschäden an Skulpturen im Freien zu erfassen und objektiv zu bewerten. Wie bereits mehrfach in dieser Publikation erläutert, werden zur Berechnung der Risikoziffer die qualitativen Einstufungen der verbalen Beschreibung lediglich in quantitative, zahlenmäßige Skalierungen umgesetzt. Diese Vorgehensweise bedeutet letztlich nichts anderes als sich in Zahlen statt in Worten auszudrücken. Man möge sich zum Vergleich auch vergegenwärtigen, dass die Anwendung jeder mathematischen Formel die Translation eines verbalen Problems in die Zahlensprache der Mathematik bedeutet. Der subjektiv wertenden verbalen Beschreibung wird durch die Umsetzung in Zahlenwerte nichts von ihrem Wert genommen, die Zahlenwerte erscheinen bloß viel nüchterner. Auf den großen Vorteil der skalierenden, zahlenmäßigen Klassifikation wurde ebenfalls bereits hingewiesen. Zahlenwerte ermöglichen Berechnungen und dieser Vorteil wird bei der Berechnung der Risikoziffer genützt.

Für die praktische Anwendung, d. h. für die Berechnung einer Risikoziffer, wird nicht mehr verlangt als was in gutachterlichen Stellungnahmen über Zustand und Restaurierungsbedarf auch schon enthalten ist:

- Objektbeschreibung mit historischen Daten
- Kunstgeschichtliche Würdigung
- Angaben zur Restaurierungsgeschichte und deren Maßnahmen
- Exogene Risikofaktoren: Aufstellungsort und Umweltsituation
- Endogene Risikofaktoren: Natursteineigenschaften
- Gefahr durch Menschen: Vandalismus
- Mechanische Schäden und Materialverlust
- Veränderungen der Oberfläche
- Ultraschalldiagnostik

Die gutachterlichen Ausführungen zu diesen Untersuchungsbereichen enthalten in aller Regel alle Informationen, die in den Datenblättern der Risikoziffer in skalierte Zahlenwerte umgesetzt werden. Die rechnerische Umsetzung ist für alle Datenblätter

denkbar einfach zu handhaben; nur beim Datenblatt „Veränderungen der Oberfläche“ können Probleme auftreten, wenn als Grundlage für die Kartierung der Verwitterungsphänomene nur Photographien verwendet werden. Der Einsatz eines 3D Laserscans oder eines optischen Streifenlichtscanners liefert die sicher besten Werte für die realen, drei-dimensionalen Oberflächen, ist jedoch für den Einzelfall wahrscheinlich zu aufwendig. Eine Picture From Motion Software kann hier einen Ausweg aufzeichnen. Man darf aber nicht übersehen, dass der Aufwand bei komplizierten Skulpturen auch bei dieser Methode erheblich sein kann, wenn viele Detailphotos gemacht werden müssen.

Die Risikoziffer eignet sich besonders für eine Anwendung bei einem großen Skulpturenbestand, wie er in Parkanlagen anzutreffen ist. Es wäre zu wünschen, wenn sich die staatlichen Verwaltungen für Schlösser und Gärten dazu entschließen könnten, den ihnen anvertrauten Skulpturenbestand sukzessive mit Risikoziffern zu bewerten. Damit verbunden sollte das Bestreben sein, von allen Skulpturen auch virtuelle 3D Modelle anfertigen zu lassen, sei es mit 3D Laserscan oder mit optischem Streifenlichtscanner. Derartige Modelle eignen sich bestens für die Zustandsdokumentation und ein Langzeitmonitoring. Da der Zeithorizont, der von Denkmalpflegern und Restauratoren bei der Pflege und Überwachung von historischen Skulpturenbeständen in Jahrhunderten bemessen wird, sollte eine genaueste Anfangserfassung mit Hilfe von 3D Modellen und quantitativen Schadensauswertungen unverzichtbar sein.

Aber nicht nur Skulpturen in Parkanlagen sind für die Anwendung der Risikoziffer von Interesse. Der Bestand an wertvollen Grabdenkmälern auf historischen Friedhöfen ist als ebenso wertvoll einzustufen wie viele Skulpturenensembles in Parkanlagen.

Für die praktische Umsetzung bietet sich für die Eigentümer auch eine Kooperation mit Hochschulen an. In mehrjährigen Programmen können im Rahmen von Bachelor und Masterarbeiten auch umfangreiche Bestände erfasst und ausgewertet werden.

## 10. Risikoziffer VII: Ausblick

Um den Praxiseinsatz zu fördern, können für Interessenten auf Anfrage Excel Files zur Verfügung gestellt werden, eine Leerversion zum Eintragen der eigenen Daten und eine Beispielfassung zur Veranschauli-

chung der Vorgehensweise. Der Verfasser wird in diesen Fällen um die Übermittlung der Daten bitten, damit die Erfahrungen mit der Risikoziffer gesammelt und verbreitet werden können.

## 11. Angaben zu den Autoren

### **Prof. Dr. Rolf Snethlage**

Geb. 1944 in Bayreuth, Studium der Geologie und Mineralogie an der Ludwig-Maximilians-Universität München mit Diplom und Promotion zum Dr. rer. nat. Habilitation in der Fachrichtung Angewandte Mineralogie. Ernennung zum apl. Professor 1991. Seit 1977 Mitarbeiter beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege und Leiter des Zentrallabors. Initiator und Partner in zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsprojekten. Seit 2009 im Ruhestand.

### **Diplom Physiker Wolfram Köhler**

Geboren in Dresden 1952. Von 1959 – 1971 Schule, Lehre als Maurer und Betonbauer, Abitur. 1971 – 1976 Physikstudium an der heutigen Alma Mater Lipsiensis (Leipzig). 1976 – 1990 Aufbau eines naturwissenschaftlichen Labors in der Restaurierungsabteilung der heutigen Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg. 1990 Gründung des Labors für Bauwerksdiagnostik, Archäometrie und Geophysik. Durchführung zerstörungsfreier Untersuchungen und Klimagutachten an und in zahlreichen Denkmälern, Schlössern und Kirchen; Beteiligung an

mehreren EU-, DFG- und DBU-Forschungsprojekten zur Weiterentwicklung zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden (Georadar- und Terahertztomographie, Ultraschall) und zur Natursteinverwitterung (Marmor, Sand- und Kalkstein); Lehrtätigkeit an verschiedenen Hochschulen und Weiterbildungseinrichtungen.

### **Dipl.-Rest. (Univ.) Carolin Pfeuffer**

Geb. 1985 in Werneck, Studium der Konservierung und Restaurierung von Wandmalerei, Architekturoberfläche und Steinpolychromie an der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste in Stuttgart mit Diplom, Studium der Denkmalpflege – Heritage Conservation an der Otto-Friedrich-Universität Bamberg mit Maserabschluss, Weiterbildung „Restaurator im Handwerk für das Steinmetz- und Steinbildhauerhandwerk“ mit bestandener Prüfung vor der Handwerkskammer für Oberfranken; nach Tätigkeit als freiberufliche Restauratorin seit 09/2015 tätig am Europäischen Fortbildungszentrum für das Steinmetz und Steinbildhauerhandwerk in Wunsiedel und seit 04/2016 als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Restaurierungswissenschaft in der Bau- und Denkmalpflege, Otto-Friedrich-Universität Bamberg



University  
of Bamberg  
Press

Entscheidungen zu Konservierungsfragen an Parkfiguren aus Marmor und Sandstein werden bis heute im Dialog zwischen Eigentümer, Denkmalpfleger, Restaurator und Fachgutachtern getroffen. Die Bewertung von Schäden erfolgt durch rein qualitative und subjektive Begriffe wie „stark“, „gravierend“ oder „bedrohlich“. Die Konzept Risikoziffer verfolgt den Ansatz, die qualitativ, subjektiven Begriffe durch quantitative, objektive Messzahlen zu ersetzen. Zu diesem Zweck werden die messtechnischen Inhalte von Untersuchungen ausgewertet und durch Normierung auf Bezugsgrößen in Zahlenwerte zwischen Null und Eins umgewandelt. Als Endergebnis der Berechnungen steht eine einzige Zahl, die Risikoziffer, mit der der Gesamtzustand und die Gefährdung der Skulptur ausgedrückt werden. Diese Zahl liegt immer zwischen Null und Eins, entsprechend Null oder 100 % Risiko, so dass das Risiko von Skulpturen in einem Parkensemble direkt miteinander verglichen werden kann. Die Risikoziffer verhilft Entscheidungsträgern zu objektiv prüfbareren Entscheidungen. Sie ist auch für das Monitoring von Skulpturenbeständen im Freien geeignet.



ISBN 978-3-86309-554-3



9 783863 095543

[www.uni-bamberg.de/ubp/](http://www.uni-bamberg.de/ubp/)