

Otto-Friedrich-Universität Bamberg • 96045 Bamberg

Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Dr. Paul Bellendorf
An der Bornau 2
49090 Osnabrück



Kompetenzzentrum
Denkmalwissenschaften und
Denkmaltechnologien

Prof. Dr. Rainer Drewello

Tel. +49 (0) 951 / 863 1610
rainer.drewello@uni-bamberg.de
www.uni-bamberg.de/kdwt/

Risikoziffer

Umweltschäden an Denkmälern aus Marmor- und Sandsteinskulpturen erfassen und objektiv bewerten

DBU AZ 33 162/01-45

Abschlussbericht



Rainer Drewello, Carolin Pfeuffer, Wolfram Köhler, Rolf Snethlage

Risikoziffer

Umweltschäden an Denkmälern aus Marmor- und Sandsteinskulpturen erfassen und objektiv bewerten

DBU AZ 33 162/01-45

Abschlussbericht

Der volle Wortlaut des Antrags lautet:

„Entwicklung eines konservatorischen Bewertungssystems zum Schutz anthropogen geschädigter Sandstein- und Marmorskulpturen sowie dessen modellhafte Evaluierung am Beispiel national bedeutsamer Sammlungen“

Danksagung

Der erste, ganz besondere Dank gilt 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. Kathrin Lange, Dr. Saskia Hüneke, Roland Will

Bayerische Verwaltung der Staatlichen Schlösser, Gärten und Seen, Schloss Nymphenburg München. Klaus Häfner

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

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

Stadt Baiersdorf als Sachwalterin des Jüdischen Friedhofs. 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.

Zu großem Dank sind auch verpflichtet den Restauratoren Tina Dömling, Michael Eilenberger und Dawud Wardak.

Zusammenfassung

Konservierungsarbeiten an Skulpturen aus Marmor oder Sandstein werden in einem Diskurs zwischen Eigentümer, Denkmalpfleger, Restaurator und Fachgutachter entschieden. Die in Fachgutachten vorliegenden Ergebnisse bilden die Grundlage zur Entscheidungsfindung. Dabei werden die überwiegend messtechnisch gewonnenen Befunde in eine sprachliche Form umgesetzt, die sich subjektiver Formulierungen wie „gering/stark in Mitleidenschaft gezogen“ oder „wenig/höchst gefährdet“ bedient. Auf diese Weise geht der messtechnische, objektive Befund der Zustandserfassung verloren und wird durch eine subjektive Bewertung ersetzt.

Das Ziel der Risikoziffer vor diesem Hintergrund ist, die subjektive Bewertung durch eine möglichst objektive und quantitative Bewertung zu ersetzen. Dies geschieht durch die konsequente Nutzung der in den Fachgutachten vorliegenden, messtechnisch erfassten Befunde.

Die Risikoziffer ist definiert als das Produkt einer Messwertzahl und einer Bewertungszahl:

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

Die Messwertzahl $M(i)$ drückt den Messwert eines Parameters (i) in Form einer dimensionslosen Zahl aus. Diese wird entweder durch Differenz und Normierung auf einen Ausgangszustand des Materials berechnet oder drückt einen absoluten Kennwert in Form einer Zahl zwischen Null und Eins.

Die Bewertungszahl $B(i)$ gibt an, als wie wirkmächtig der betreffende Parameter (i) für die Verwitterung und die Schadensgefährdung einzustufen ist. Die Bewertungszahl $B(i)$ ist vorgegeben und wird nicht verändert. Sie kann zwischen den Zahlen Null und Zehn variieren. Ihr Zahlenwert ist durch Beratung mit den erfahrenen Mitgliedern des Fachbeirats festgelegt worden.

Für die Berechnung der Gesamt-Risikoziffer einer Skulptur werden 104 verschiedene Parameter (i) eingesetzt. Für jeden dieser Parameter wird eine gesonderte Risikoziffer $R(i)$ berechnet. Die 104 Risikoparameter sind in 10 Excel Datenblättern sortiert, die nach Themengebieten geordnet sind:

1. Objektinformation
 2. Kunsthistorische Bewertung
 3. Restaurierungsgeschichte
 4. Umwelt/Exogene Risikofaktoren
 5. Naturstein/Endogene Risikofaktoren. Getrennt für Marmor und Sandstein
 6. Gefahr durch Menschen/Vandalismus
 7. Mechanische Schäden/Materialverlust
 8. Veränderungen der Oberfläche
 9. Ultraschalldiagnostik
 10. Gesamtbewertung Gesamt- Risikoziffer
-

Im Rechenprozess wird zunächst für jedes Datenblatt eine Risikoziffer $R(\text{Datenblatt})$ gebildet. Durch die Normierung auf das Höchstisiko ist diese Risikoziffer immer eine Zahl zwischen Null und Eins. Für die Gesamtbewertung werden die einzelnen Risikoziffern der Datenblätter addiert und anschließend der Mittelwert gebildet. Dieser stellt letztendlich die **Gesamt-Risikoziffer $R(\text{ges})$** für das betreffende Objekt dar und ist ebenfalls eine Zahl zwischen Null und Eins. Null bedeutet kein Risiko, 1 Höchstisiko.

Durch die rein rechnerische Umsetzung der Messwerte stellt die Risikoziffer eine objektive und quantitative Beurteilung des Schadenszustands und der Schadensgefährdung dar. Zusätzlich abgeleitete Höchstisikoziffern geben Hinweise auf besondere Gefahrenpunkte, die ein sofortiges Eingreifen erfordern.

Inhaltlich bemisst die Risikoziffer den durch die Verwitterung in der Vergangenheit bis heute eingetretenen Schaden und gibt einen Ausblick auf die künftige Schadensbedrohung. Sie findet Anwendung bei folgenden Fragen:

- Objektive Zustandsbeurteilung
- Methode für Monitoring
- Ausweisung von Gefahrenpunkten durch Hochrisikoziffer
- Abbildung einer Rangfolge im Skulpturenkollektiv
- Simulation der Risikominderung bei Translozierung von Freiaufstellung in ein Depot

Im Projekt war die Anwendung der Risikoziffer auf Marmor- und Sandsteinobjekte vorgesehen. Für folgende Skulpturen und Grabsteine wurde die Gesamt-Risikoziffer $R(\text{ges})$ ermittelt:

Skulpturen

Apoll. Carrara Marmor. Neue Kammern Schlosspark Sanssouci.	$R(\text{ges}) = 0,49$
Vestalin. Carrara Marmor. Neue Kammern Schlosspark Sanssouci.	$R(\text{ges}) = 0,65$
Flora. Laaser Marmor. Schlosspark Nymphenburg.	$R(\text{ges}) = 0,59$
Äolus. Sterzinger Marmor. Schlosspark Nymphenburg.	$R(\text{ges}) = 0,60$
Hera Original. Cottaer Sandstein. Barockgarten Großsedlitz bei Dresden	$R(\text{ges}) = 0,64$
Hera Kopie. Cottaer Sandstein. Barockgarten Großsedlitz bei Dresden.	$R(\text{ges}) = 0,53$
Kybele Original. Cottaer Sandstein. Barockgarten Großsedlitz	$R(\text{ges}) = 0,64$
Kybele Kopie. Cottaer Sandstein. Barockgarten Großsedlitz bei Dresden.	$R(\text{ges}) = 0,55$

Grabmäler im Jüdischen Friedhof in Baiersdorf/Erlangen

Bernhard Ehrenbacher. Schilfsandstein.	$R(\text{ges}) = 0,40$
Siegmund Sulzberger. Schilfsandstein.	$R(\text{ges}) = 0,41$
Löw Ganz. Schilfsandstein	$R(\text{ges}) = 0,45$
Nr. 1091. Doppelgrab Buntsandstein.	$R(\text{ges}) = 0,36$

Einige der Skulpturen wie die Vestalin oder die Originalfiguren von Hera und Kybele weisen starke Schäden auf. Ihre Risikoziffer sollte deshalb nahe beim Maximum $R(\text{ges}) = 1,0$ liegen. In Anbetracht der sichtbaren Schäden erscheinen jedoch die ermittelten Risikoziffern $R(\text{ges}) = 0,64$ bis $0,65$ als zu gering. Man muss jedoch berücksichtigen, dass die subjektive personengebundene Einschätzung auf die Schadensschwerpunkte fokussiert und dabei die anderen Einflussfaktoren wie das Klima außer Acht lässt. Die Einschätzung durch die Risikoziffer ist deshalb integraler und objektiver.

Ganz entscheidend ist die Erkenntnis, dass aus grundsätzlichen Zusammenhängen die Risikoziffer nie die Endwerte Null oder Eins erreichen kann, weil auch keines der Datenblätter die Endwerte Null oder Eins annehmen kann. So ist es zwar theoretisch möglich, dass die Risikoziffer für die Ultraschalldiagnostik den Wert 1 erreicht, wenn der Marmor in idealem Ausgangszustand ist und sehr hohe Ultraschallgeschwindigkeiten zeigt. Sie kann aber auf der anderen Seite nicht den Wert Null annehmen, weil dann die Ultraschallgeschwindigkeit an allen Stellen der Skulptur so niedrig sein müsste, dass die Skulptur gar nicht mehr existieren würde.

Unter Zugrundelegung bestimmter Annahmen für die Grenzwerte der Einzelfaktoren auf den Datenblättern resultieren für Marmor und Sandstein folgende Grenzwerte:

Marmor: $R(\text{ges})$ minimal = 0,24, $R(\text{ges})$ maximal = 0,88.

Sandstein: $R(\text{ges})$ minimal = 0,18, $R(\text{ges})$ maximal = 0,79

Legt man diese Grenzwerte zu Grunde, dann verringern sich die Abstände zwischen den berechneten Risikoziffern und den theoretischen Grenzwerten. Hat eine Marmorskulptur zum Beispiel eine berechnete Risikoziffer $R(\text{ges}) = 0,6$, dann beträgt der Abstand zum Maximalwert nicht 0,4 ($1,0 - 0,6$), sondern nur noch 0,28 ($0,88 - 0,6$). Die berechneten Risikoziffern $R(\text{ges})$ nähern sich damit den personalen Einschätzungen an.

Zusammenfassend lässt sich aus den Gesamt-Risikoziffern $R(\text{ges})$ eine allgemeine Einstufung der Schadensgefährdung ableiten:

Für Marmor:

0,24 bis 0,44 = wenig gefährdet, 0,45 bis 0,63 = gefährdet; 0,64 bis 0,88 = hoch gefährdet.

Für Sandstein:

0,18 bis 0,40 = wenig gefährdet, 0,41 bis 0,62 = gefährdet; 0,63 bis 0,79 = hoch gefährdet.

Für praktische Belange ist die Spalte mit Angaben zu Hochrisiken von hoher Bedeutung. Ein Hochrisiko ist dadurch definiert, dass die zu dem Parameter gehörige Messwertzahl größer als 0,75 ist. Eine Messwertzahl $>0,75$ bedeutet, dass sich zum Beispiel die betreffende Eigenschaft so weit von Ausgangszustand im unverwitterten Zustand entfernt hat, dass eine erhöhte Schadensgefahr besteht. Im Datenblatt „Veränderungen der Oberfläche“ wurde diese Grenze stark abgesenkt und auf den Wert 0,1 reduziert, was in diesem Fall bedeutet, dass 10 % der Oberfläche von dem Schadensbild betroffen sind. Die Hochrisiken sind auf dem Datenblatt „Gesamtauswertung“ nach Datenblatt geordnet ausgewiesen. Sie erlauben einen sofortigen Überblick über die Stellen, an denen so große Gefahr besteht, dass über Sofortmaßnahmen entschieden werden muss.

Auf Anfrage erhalten Interessierte zur Anwendung für eigene Aufgaben EXCEL Beispielfiles zugeschickt. Es bestehen Zusagen für künftige Anwendungen von Seiten der FH Potsdam Fachbereich Restaurierung in Zusammenarbeit mit der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten, vom Sächsischen Immobilienmanagement Dresden, von Institut für Steinkonservierung in Mainz (Kölner Friedhöfe).

Am 06.04.2018 fand im KDWT Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien der Universität Bamberg das Abschlusskolloquium statt. 50 Teilnehmer besuchten die Veranstaltung.

Der Forschungsbericht ist in der Reihe „Forschungen des Instituts für Archäologische Wissenschaften, Denkmalwissenschaften und Kunstgeschichte Nr. 12 (2018) erschienen. Der Beitrag: Carolin Pfeuffer, Max Rahrig, Rolf Snethlage, Rainer Drewello: “3D mapping as a tool for the planning of preservation measures on sculptures made of natural stone” erscheint in “Environmental Earth Sciences Special Issue “Stone in Architectural Heritage” in 2018 (in press).

[Rolf Snethlage]

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.

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 Untersuchungen 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 zugegebener Maßen 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.

			
<p> Apoll Neue Kammern Potsdam Sanssouci Photo K. Lange SPSPG </p>	<p> Vestalin Neue Kammern Potsdam Sanssouci Photo K. Lange SPSPG </p>	<p> Äolus Schlosspark Nym- phenburg München Photo SV Bayern </p>	<p> Flora Schlosspark Nym- phenburg München Photo SV Bayern </p>
			
<p> Hera/Juno Barockgarten Großsedlitz Photo M. Eilenberger </p>	<p> Hera/Juno Kopie Barock- garten Großsedlitz </p>	<p> Kybele/Rhea Barockgarten Großsedlitz Photo M. Eilenberger </p>	<p> Kybele/Rhea Kopie Barock- garten Großsedlitz </p>
			
<p> Grabmal Siegmund Sulz- berger Jüdischer Friedhof Baiersdorf </p>	<p> Grabmal Bernhard Ehren- bacher Jüdischer Friedhof Baiersdorf </p>	<p> Grabmal Nr. 935 Löw Gans Jüdischer Friedhof Baiersdorf </p>	<p> Grabmal Nr. 1091 Jüdischer Friedhof Baiersdorf </p>

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 der interessante Vergleich, 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 Sigmund 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. 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.

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 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.

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 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.

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	Entsalzung	0,5	5	5	2,5	0	
		Gipsumwandlung	0	0	0	0	0	
		Summe R(i) und B(i)		29	26	22,5	5	
		Risikoziffer Restaurierungsgeschichte			26			
		R(RGS) = Summe R(i) / Summe B (i)				0,87		
			B(max)	130				

- **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.

Hera / Juno Original						
Umwelt Exogene Risikofaktoren (U)						
	Messwertzahl	Bewertungszahl	Risiko	Anzahl Hochrisiken	Anmerkungen	
	M (i)	B(i)	$R(i) = M(i) * B(i)$			
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						
$R(U) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$			0,23			
*Messwertzahl Winterschutz						

• **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 hygryschen Dehnungen ist die Verwitterungsdynamik von Gestein zu Gestein unterschiedlich. Datenblatt 5 ist Marmor zugeeignet, Datenblatt 6 dem Sandstein. Für beide Gesteinsarten sind verschieden Eigenschaften maßgeblich.

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(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 ² * h ^{0,5} . Nicht auswertbar
W-Wert kg/m ² h ^{0,5} (Mittelwert)							
Q-Wert kg/m ² h (Mittelwert)	Q(i) - Q(o) / Q(i)	0	10	0	0	0	
						0	
Kornform	Mikroskopbild	1	8	8	8	1	
				0	0	0	
Kornbindung	Mikroskopbild	0,5	10	10	5	0	
				0	0	0	
Textur	visueller Befund	1	5	5	5	1	
				0	0	0	
Risiko durch hygrysche Dehnung	Aufstellungsort bewerten	1	10	10	10	1	
				0	0	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	0	0	
S-Wert (Mittelwert aus Literaturdaten)	Messung	0,5	10	10	10	0	Grunert (2007). S = 0,7
				0	0	0	
Feuchtedehnung H ₂ O ges. (Mittelwert aus Literaturdaten)	Messung	0,4	10	10	4	0	
				0	0	0	
Druckfestigkeit DF Mpa	IDF(i) - DF(o) / DF(i)	0	6	0	0	0	nicht ermittelt
Biegezugfestigkeit BZF Mpa	IBZF(i) - BZF(o) / BZF(i)	0	8	0	0	0	nicht ermittelt
	Summe R(i) und Summe (B)		127	83	72	6	
	Risikoziffer Naturstein				0,87		Bewertungszahl B(i)= 0: kein Risiko Bewertungszahl B(i) = 10: max. Risiko Istwert X(i)
	R(N) = Summe R(i)/Summe B(i)						Unverwittert X(o)

• **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.

Hera / Juno Original						
Gefahr durch den Menschen (V)						
	Auswahlkriterien M(i)	Messwertzahl M(i)	Bewertungszahl B(i)	Risiko R(i) = M(i) * B(i)	Anzahl Hochrisiken	Anmerkungen
Vandalismus	Gefahrenereinschätzung	1	10	10	1	
				0	0	
Graffiti	Gefahrenereinschätzung	1	10	10	1	
				0	0	
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		

- **Datenblätter 8, 9 und 10**

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.

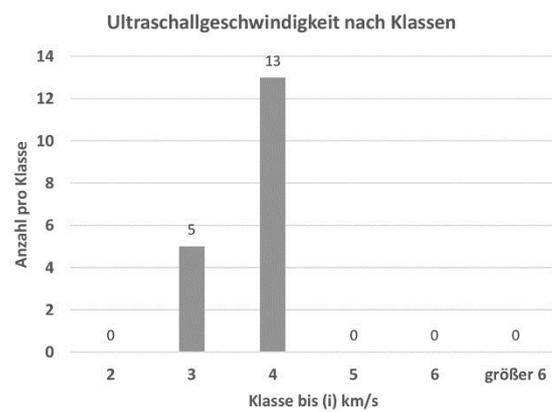
Die Ultraschalldiagnostik zielt besonders auf die Schadensbeurteilung von Marmor ab. Sie ist eine wichtige Untersuchungsmethode, da sie als einzige einen Einblick in das Innere einer Skulptur erlaubt.

Hera / Juno Original						
Mechanische Schäden	Materialverlust M	Messwertzahl	Bewertungszahl	Risiko	Anzahl Hochrisiken Verlustumfang	Anmerkung
		Auswahlkriterien M(i)	M(i)	B(i)		
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	
	Bruchgefahr Bein/Beine	1	10	10	1	
	Standsicherheit	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 Schleiern 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	Zepher verloren
Summe R(i) und B(i)			220	200	20	
Risikoziffer Materialverlust R(M)				0,91		
R(M) = Summe R(i) / Summe B(i)						
Verlustumfang					0,91	

Veränderung der Oberfläche OF		Messwertzahl	Bewertungszahl	Bewertungszahl	Risiko	Anzahl Hochrisiken	Anmerkungen
Auswahlkriterien M(i)	Oberflächenanteil	M(i)	B(i)	B(i) wenn - dann	R(i) = M(i) * B(i)		
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	
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 Rostsprennung	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0	
Abscherben Abspalttern	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0	
Alveolen	OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0	
Erosion: Materialverlust durch chem Lösungsvorgänge							
Rauheit							
	P Zahl > 700OF(i)/OF(ges)	0,5	0,56	0,56	0,28		
	P Zahl 700 - 500OF(i)/OF(ges)	0,25	0,16	0,16	0,04		
	P Zahl 500 - 300OF(i)/OF(ges)	0,25	0,28	0,28	0,07	0	
	P Zahl 300 - 100OF(i)/OF(ges)	0	8	0,00	0	0	
	P Zahl < 100OF(i)/OF(ges)	0	10	0,00	0	0	
	Kantenrückwitterung/Aufplatzen	mm	1	10	10	1	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
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	

Berechnung US Risikoziffer		Berechnung US Risikoziffer		Berechnung US Risikoziffer		Berechnung US Risikoziffer		Berechnung US Risikoziffer	
Berechnung der US Geschwindigkeiten		Berechnung der US Geschwindigkeiten		Berechnung der US Geschwindigkeiten		Berechnung der US Geschwindigkeiten		Berechnung der US Geschwindigkeiten	
Spalte C bis E die Messwerte eintragen		Spalte C bis E die Messwerte eintragen		Spalte C bis E die Messwerte eintragen		Spalte C bis E die Messwerte eintragen		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) R(US) = Summe R(US(i)) / Summe B(i)				
Minimalwert				2,47			0,16		

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 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).

Hera / Juno Original frei				
Gesamtbewertung			arithmetisches Mittel	quadratisches Mittel
Objektbeschreibung B(O)	wird nicht bewertet			
Kunsthistorische Bewertung B(KB)	$B(KB) = \text{Summe } B(i) / n * B(i) \text{ max}$		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
Berechnung der Gesamt-Risikoziffer	arithmetisches Mittel			Anzahl Hochrisiken $R(i) > 0,75$ Tabellenblatt
$R(\text{ges}) = \text{Summe } R(i) / n = R(RGS) + R(U) + R(N-M) + R(N-S) + R(V) + R(M) + R(OF) + R(US) / 7 =$			7,00	5Restaurierung
$R(\text{ges}) =$			0,64	1Klima 6Naturstein
Gewichtung durch kunstwissenschaftliche Bewertung K(B)				2Vandalismus
$R(\text{ges gewichtet}) = R(\text{ges}) * B(KB)$	$R(\text{ges})$		0,64	20Materialverlust
	$B(KB)$		0,78	2Oberfläche
	$R(\text{ges gewichtet})$		0,50	0Ultraschall
			Summe $R(i) > 0,75$	36
Berechnung der Gesamt-Risikoziffer quadratisches Mittel				
	$\text{SQR } R(i)$			0,72
	$B(KB)$			0,78
	$R(\text{ges gewichtet})$			0,56

2.2) Messmethoden und Rechenschritte

Zwei verschiedene Methoden der Erfassung der Einzelparameter kommen zum Einsatz:

Messtechnisch bestimmbarer 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. 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 berechnet: 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 Risikoziffern 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:

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

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

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 mit 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. Genauere 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 kann. Das Ablaufschema zeigt die möglichen Entscheidungswege.

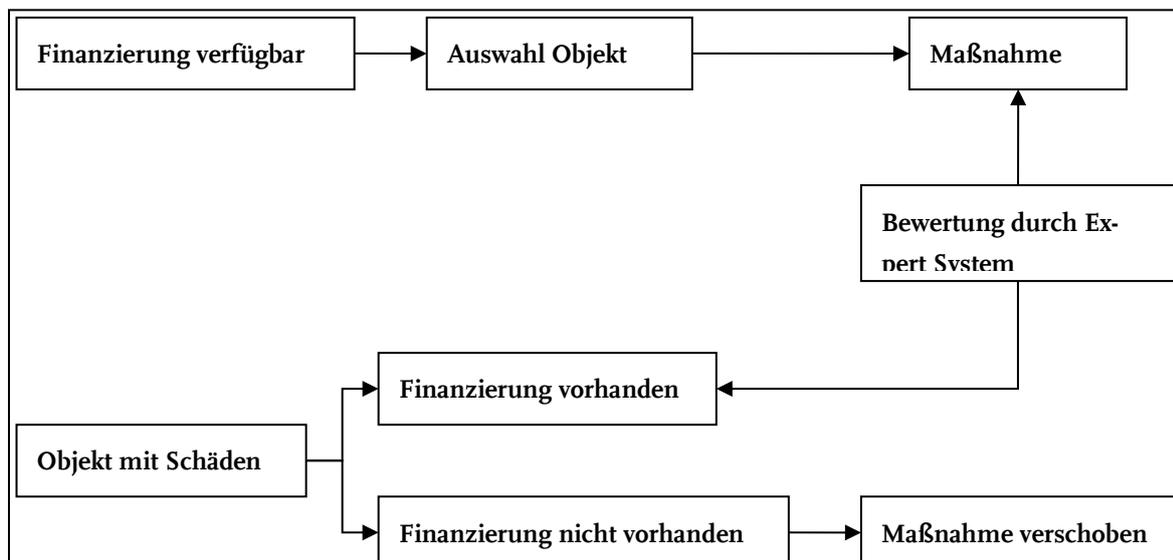


Abbildung 1: Entscheidungswege, die zu einer Maßnahme führen. Die Maßnahme unterbleibt, wenn keine Finanzierung vorhanden ist.

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 Worten und nicht in Zahlen.

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 RZ exakt angeben, dass das Risiko für das betreffende Objekt, irreparable Schäden zu erleiden, zum Beispiel von $RZ = 0,5$ 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 Höchststrisiken 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 Höchststrisiken 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
- 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.
- [Rolf Snethlage]

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.

1) Allgemeine Angaben

Interessenten erhalten auf Anfrage einen **leeren Datensatz** zur Berechnung der Risikoziffern für **Marmor- und Sandsteinobjekte** sowie jeweils ein **ausgefülltes Beispiel**. 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 verwenden, 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 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

- > 1000 mm/y = 1
 - 1000 - 800 mm/y = 0,7
 - 800 - 600 mm/y = 0,5
 - < 600 mm/y = 0,3
-

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:

$$OF(i) / OF(ges)$$

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 m². Für einen Menschen von 1,75 m Körpergröße und 70 kg Gewicht findet sich die Angabe 1,84 m² 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:

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

„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

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

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:

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

Diese Zahl ist wiederum kleiner oder gleich als 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:

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

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 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 Parkskulpturen 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 $B(i) = B(i \text{ max})$ 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 berücksichtigt und die Berechnung der Risikoziffer $R(RGS)$ erfolgt wie oben beschrieben:

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

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 haben.

Zur Verwendung des Omega-Wertes 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 Oberflächenveränderung 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
- Materialverlust durch chemisch physikalische Prozesse
- Erosion. Materialverlust durch chemische Lösungsvorgänge
- Biologische Besiedlung

Deren Aufteilung in diese Gruppen und deren Inhalt sind 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 Objektoberfläche 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:

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

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:

$vp < 2 \text{ km/s}$,

$vp = 2 - 3 \text{ km/s}$,

$vp = 3 - 4 \text{ km/s}$,

$vp = 4 - 5 \text{ km/s}$,

$vp = 5 - 6 \text{ km/s}$,

$vp > 6 \text{ km/s}$.

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 vp 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 $vp(i \text{ max})$ um 10 % erhöht und als $vp(o \text{ max})$ 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 $vp(o \text{ max})$ 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 $v_p(\min) = 0$ 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.

Datenblatt 12: Gesamtbewertung R(ges)

Alle den einzelnen Datenblättern zugeordneten Risikoziffern $R(RGS)$, $R(U)$, $R(N)$, $R(V)$, $R(M)$, $R(OF)$ und $R(US)$ 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 Risikoziffern einer 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 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.

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]

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.

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 $R(\text{ges})$ 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 $R(\text{RGS})$

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 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 $R(\text{RGS})$ erfolgt in üblicher Weise nach der folgenden Formel:

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

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

=wenn(M(i) = 0; setze = 0, 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 einfach gemäß der Kommentare an den Zellen zu beantworten. Die Luftschadstoffkonzentrationen und die Niederschlagsmengen müssen jedoch für den betreffen

den Ort ermittelt werden, was beim Deutschen Wetterdienst und lokalen Umweltbehörden oder den zuständigen Landesämtern für Umweltschutz abgefragt werden kann. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Zahlenwerte, die in diesem Projekt verwendet wurden.

Tabelle 2: Schadstoffkonzentrationen NO₂ und PM10 für verschiedene Umweltsituationen.

Dresden			NO₂ (µg/m³)	PM10 (µg/m³)
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 Lütte (Belzig)	Hintergrund Land	12	17
Baiersdorf	Jüdischer Friedhof		20	22
2015	Nürnberg Flughafen	Hintergrund urban	20	22
	Andechs Rothenfeld	Hintergrund Land	8	12

Tabelle 3 zeigt die Werte für das langjährige Jahresmittel des Niederschlags an den Orten, an denen sich die für das Projekt ausgesuchten Objekte befinden.

Tabelle 3: Niederschlagswerte der Objektorte.

Ort	Niederschlag mm
Dresden	592
München	930
Potsdam	566
Baiersdorf (Erlangen)	638

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.



Abbildung 2: Karsten Messungen zur Bestimmung des W-Werts. Grabmal Ehrenbacher Jüdischer Friedhof Baiersdorf

Der Bezug auf Literaturwerte ist deshalb verworfen worden. Statt dessen 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 Vergleichsgestein zum Vergleich zu haben.

Zum Überblick sind hier Vergleichswerte von KONIETZKY & SIEDEL (2015) dargestellt (Tabelle 4).

Tabelle 4: Literaturwerte zu den Eigenschaften von Elbsandstein Typ Cotta. Aus KONIETZKY & SIEDEL (2015).

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

Bei den hydrophobierten Objekten Äolus in Nymphenburg, Rhea Kopie und Hera Kopie ist genauso verfahren worden. Der niedrigste, an den hydrophobierten 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 5 bringt einige Vergleichswerte für Schilfsandsteine und verwandte Werksandsteine aus der Literatur. Man erkennt sofort, wie groß die Streubreite ist.

Tabelle 5: Einige W-Werte für Schilfsandsteine aus der Literatur.

Sandstein	w-Wert kg/m ² v/h	Literatur
Schleerith Werksandstein Probenmaterial	7,8	SNETHLAGE (1984)
Maulbronn Schilfsandstein Probenmaterial	4,8	SNETHLAGE (1984)
Schleerith 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)

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 6).

Tabelle 6: W-Werte für verwitterte und unverwitterte Marmore aus RÜDRICH (2003).

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

SIEGSMUND & DÜRRAST (2014) liefern Werte zur Wasseraufnahme, Porosität und hydrischer Dehnung von Carrara Marmor. (Tabelle 7, Tabelle 8).

Tabelle 7: Wasseraufnahme von Marmor allgemein aus SIEGSMUND & DÜRRAST (2014).

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

Tabelle 8: Rohdichte, Porosität und Hydrische Dehnung von Carrara Marmor. Aus SIEGSMUND & DÜRRAST (2014)

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

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

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

σ = Grenzflächenspannung Wasser - Kapillaroberfläche

ρ = Dichte des Wassers

g = Erdbeschleunigung

Der Winkel φ bezeichnet die Saugrichtung. Im Fall von senkrechtem kapillarem Eindringen gilt $\cos 0^\circ = 1$, der Winkel θ hingegen den Randwinkel. Es gilt $\cos 0^\circ = 1$. 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 $\varphi = 90^\circ$ und $\cos \varphi = 0$, 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 $\cos \theta = 1$, 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. Die Konstante C ist deshalb ebenfalls als 1 angenommen. Das Ergebnis ist in Abbildung 3 dargestellt:

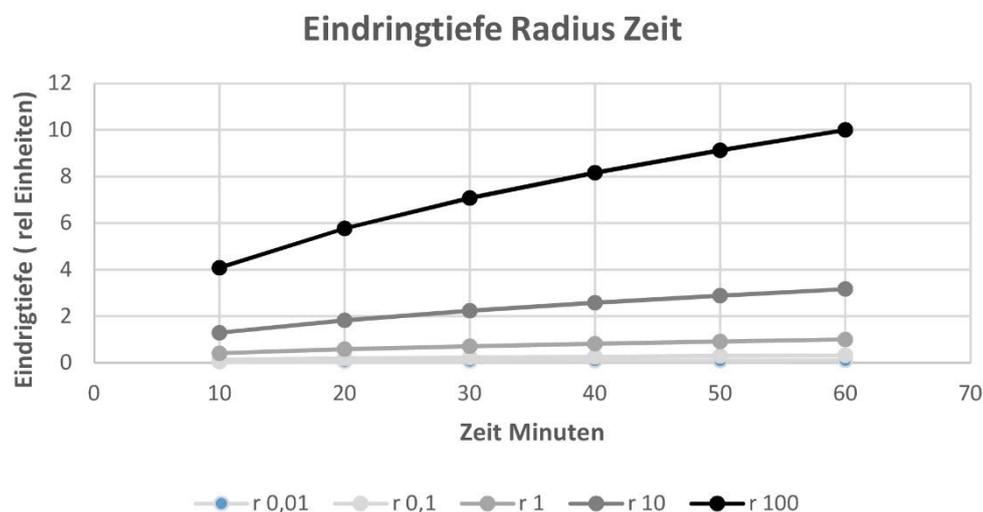


Abbildung 3: Eindringtiefe als Funktion von Kapillarradius und Zeit. Radius $r = \mu\text{m}$.

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 4).

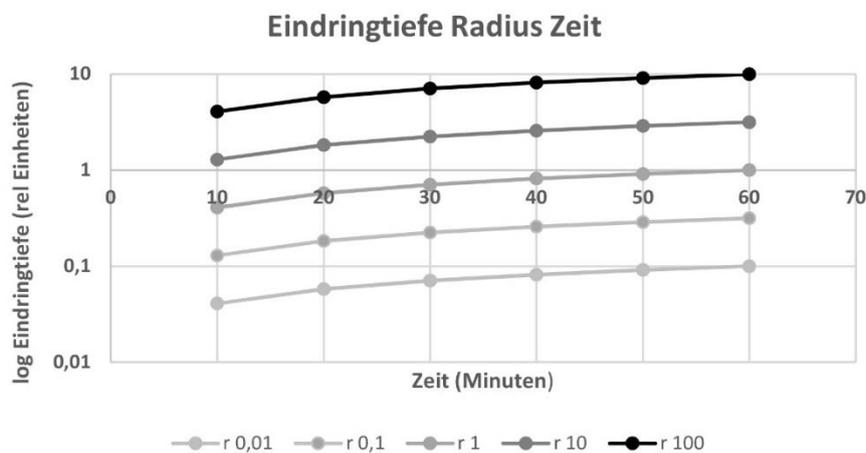


Abbildung 4: Die Beziehungen Eindringtiefe, Porenradien und Saugzeit in logarithmischer Darstellung.

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

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:

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

In bestimmten Fällen, zum Beispiel wenn auf Grund einer Hydrophobierung nur eine dünne Oberflächenschicht 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 $0,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{t}$ in 1 Stunde erreicht wird, nämlich $0,1 \text{ l/m}^2$. Graphisch stellt sich die Festlegung folgendermaßen dar:

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 Ω -Wert. Die schwarze, schräge Linie entspricht der Aufnahmemenge $0,1$ Liter nach 1 Stunde. Sie stellt den Bezugspunkt für $\Omega(o)$ dar. Der aktuelle $\Omega(i)$ Werte für das Grabmal Ehrenbacher betragen $0,75$, $0,65$ und $0,38 \text{ l/m}^2$.

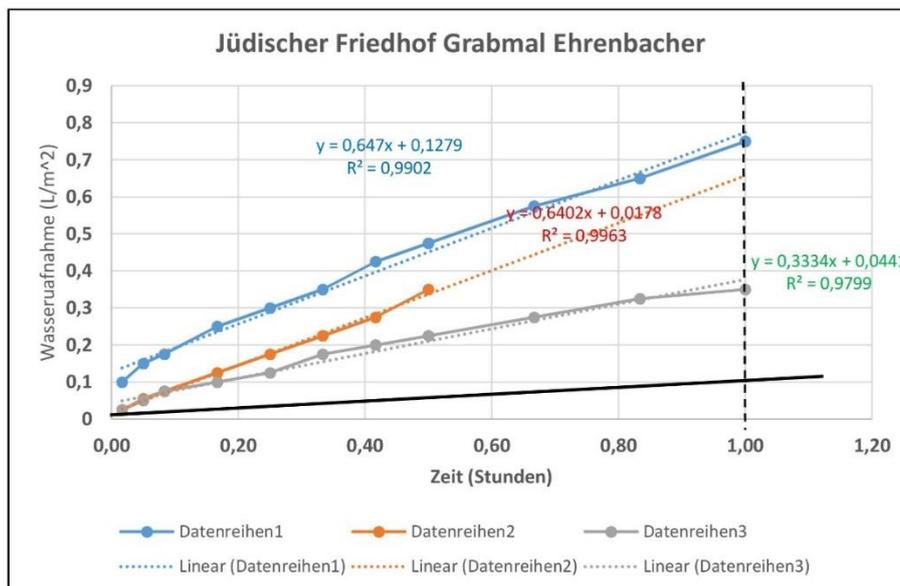


Abbildung 5: Beispiel für den Omega Wert und dessen Definition.

- **Thermische Dehnung**

Die thermische Dehnung ist der meistbestimmende Verwitterungsfaktor bei Marmor, insbesondere wenn Wasserfilme an den Risspitzen 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 9, Tabelle 10).

Tabelle 9: Werte der thermischen Dehnung von 2 Carrara Marmorproben. Aus SIEGSMUND & DÜRRAST (2014)

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

Tabelle 10: Thermische Dehnung von Carrara Marmorproben vor und nach künstlicher Alterung. Aus WEISS (1999).

	$\alpha * 10^{-6} K^{-1}$	$\alpha * 10^{-6} K^{-1}$
Carrara frisch	8 bis 11	9,5 bis 15
Carrara verwittert	7 bis 12	10,5 bis 15
Laas frisch	4,5 bis 11	6,0 bis 13
Laas verwittert	4 bis 8	6 bis 11

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(OF)

- **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.

Tabelle 11: Schadensphänomene gemäß ICOMOS ISCS Glossar.

Ablagerungen / Farbveränderungen	Ablagerungen
	schwarze Krusten
	Versinterungen
	Verfärbungen, Rostflecken
	Ausblühungen
Materialverlust durch chemisch physikalische Prozesse	Relief
	Rückwitterung
	Kreiden, Abmehlen
	Absanden
	Zuckerkörniger 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

- **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 suchen, an denen sich noch die Originaloberfläche erhalten hat. Diese dokumentiert, wie sich Auftraggeber und Bildhauer das Erscheinungsbild der Skulptur vorgestellt haben. Abbildung 6 zeigt eine Stelle originaler Oberflächenbeschaffenheit beim Kronos im Schlosspark Nymphenburg.



Abbildung 6: Oberfläche im Originalzustand an der Figur des Kronos im Schlosspark Nymphenburg München.

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 7).



Abbildung 7: 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 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 fühlen sich sehr rau an.

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 Beurteilung auf höchstens die in der folgenden Tabelle aufgeführten zurückgreifen:

Tabelle 12: Körnung P Zahl und Korngröße (FEPA 2006).

	Körnung	Korngröße μm
grob	P 40	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

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 Erstbeurteilung 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.



Abbildung 8: 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 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), BAEDECKER (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)	– $34 \mu\text{m/a}$
NAPAP (BAEDECKER 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 SO_2 Gehalt der Luft zurückgeführt werden kann. Legt man eine als realistisch für heute zu bezeichnende Rückwitterung von $10 \mu\text{m}/\text{Jahr}$ zu Grunde, dann weicht eine Kante mit einer Rate von $20 \mu\text{m}/\text{Jahr}$ zurück, eine Ecke mit $30 \mu\text{m}/\text{Jahr}$. Mit Hilfe solcher Annahmen kann man abschätzen, 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 9 einer Messung an der Kybele im Schlosspark Nymphenburg.



Abbildung 9: Ludwig Sattler bei Ultraschallmessungen 2012 an der Figur 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 ($V_p=6000$ m/s) mit einer Schädigungsbandbreite von ca. 4500 m/s sind diese Messdifferenzen von 300 - 600 m/s ggf. gerade noch akzeptabel, aber für Sandstein ($V_p=3000$ m/s) mit einer Schädigungsbandbreite von maximal nur 1800 m/s und entsprechenden Messdifferenzen von 150 - 300 m/s meines Erachtens zu hoch. Für eine angenommen reale Schallgeschwindigkeit an Sandstein (Cottaer) mit $V_p = 2200$ m/s könnten sich 10 % Abweichung auch als Messwert von nur 1980 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 ≤ 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:

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 μ s ergibt sich eine V_p von 2203 m/s.

Bei einer abweichenden Laufzeit von 2 μ s auf 47,4 μ 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 (siehe Anlage). "Dass die Messgenauigkeit besonders bei Sandstein von entscheidender Bedeutung ist, zeigt folgende Tabelle:

Tabelle 13: Ultraschallgeschwindigkeit v_p ausgewählter Sandsteine im frischen Zustand und nach 25 Frost-Tau-Wechseln (BOURGES 2006)

	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

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 Bruch-identischen 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 $v_p(o)$ für den unverwitterten Zustand mit 6 km/s gewählt wurde.

Wenn man bei der Berechnung der Risikoziffern Ultraschall davon ausgeht, dass die minimale Ultraschallgeschwindigkeit $v_p(\text{min}) = 0 \text{ km/s}$ 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.

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: Ultraschalldiagnostik“ 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 Baiersdorf 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(ges)

Gemäß empirischer Erfahrung scheint die Gesamt-Risikoziffer 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(ges) eingeschätzt werden, doppelt oder sogar mehrfach gewichtet werden, so dass sich das berechnete Risiko R(ges) und das individuell empfundene Risiko besser aneinander angleichen könnten. Es kann aber ganz einfach gezeigt werden, dass diese Methode zu keinem anderen Ergebnis für R(ges) führen würde, wie ein einfaches Beispiel zeigt.

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

Doppelte Gewichtung: $R(\text{ges}) = \sum 2 R(i) / 2 n(i) = 2 \sum R(i) / 2 n(i) = \sum R(i) / n(i)$

Das Ergebnis ist also gleich. Der Grund dafür liegt in der Bildung des Mittelwerts. Gewichtet man mit dem Faktor 2, so muss auch die Anzahl n der Parameter verdoppelt werden, durch die geteilt werden muss. Das Resultat bleibt somit unverändert. 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 $B(i)$ 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. Dazu wird die Gesamt Risikoziffer $R(\text{ges})$ 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 $R(\text{ges})$ 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 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 $R(\text{ges})$ steht eine große Änderung von 0,5 einer einzelnen Risikoziffer $R(i)$ gegenüber. Kleinste Unterschiede in der Gesamtrisikoziffer $R(\text{ges})$ 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. Da es jedoch keine festgelegte Anzahl von Parametern, die ausgefüllt werden müssen. Vielmehr werden bei jeder Auswertung immer viele Parameter entweder nicht benötigt, weil sie nicht zutreffend sind. Diese werden im Rechenprozess jedoch genauso mit Null bewertet wie Parameter, deren Messwert Null beträgt. Eine eindeutige Zuordnung ist aus diesem Grund nicht möglich. Stattdessen kann aber verlangt werden, dass für eine aussagekräftige Risikoziffer immer alle Datenblätter ausgefüllt werden müssen.

- **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 nachzuweisen waren. Am ehesten ist noch eine Korrelation mit der Anzahl der Hochrisiken nachweisbar. Die betreffende Graphik ist in der folgenden Abbildung 10 gezeigt.

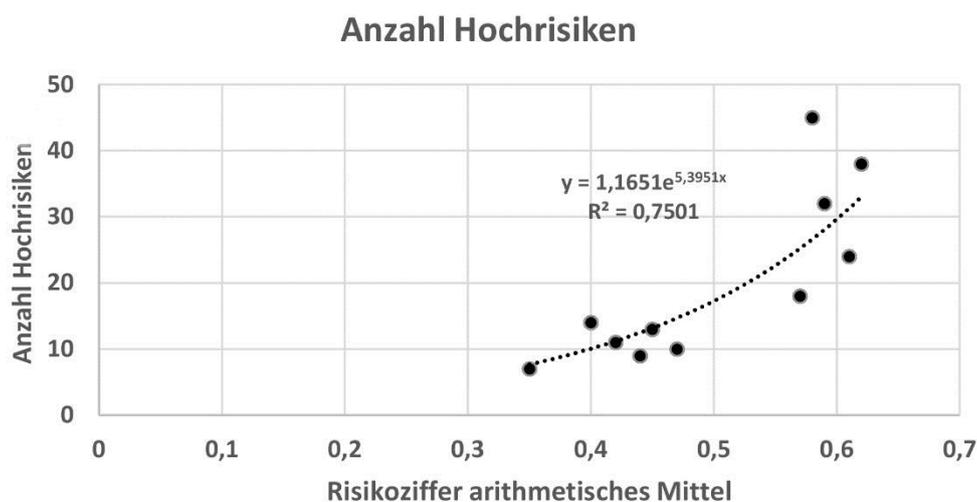


Abbildung 10: Anzahl der Hochrisiken.

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 zurückgeht. 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 Profitemssmethode 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.
- LIPFERT 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. Dissertation 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 EUROCARE EUROMARBLE 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. München.

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. Siegesmund, 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

[Rolf Snethlage]

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 dreidimensionalen Modellen beschrieben, die als Kartierungsgrundlage dienen. Für die 3D Messung diente der T-Scan der Firma Steinbichler Optotechnik. Des Weiteren werden die durch dreidimensionale Kartierung ermittelten Werte mit denen der zweidimensionalen 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.

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 elf Skulpturen 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
 - Äolus, Sterzinger Marmor, Standort: im Freien
 - Flora, Laaser Marmor, Standort: im Freien
- Baiersdorf: Jüdischer Friedhof
 - Grabstein des Bernhard Ehrenbacher, Schilfsandstein, Standort: im Freien
 - Grabstein des Sigmund Sulzberger, Schilfsandstein, Standort: im Freien
 - Grabstein des Rabbi Löw Gans Nr. 935, Schilfsandstein, Standort: im Freien
 - Doppelgrab Nr. 1091, Buntsandstein, Standort: im Freien
- Dresden/Heidenau: Barockgarten Großsedlitz
 - Hera/Juno (Kopie), Cottaer Sandstein, Standort: im Freien
 - Hera/Juno (Original), Cottaer Sandstein, Standort: Depot
 - Kybele/Rhea (Original), Cottaer Sandstein, Standort: Depot

Dresden: Großer Garten

- „Die Zeit enthüllt die Wahrheit“, Carrara Marmor, Standort: im Freien
- Potsdam: Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg, Sammlung im Depot in Potsdam
 - Apollo, Carrara Marmor, Standort: Depot
 - Vestalin, Carrara Marmor, Standort: Depot

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



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

3. Durchführung der Laserscans

3.1 Scanner

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



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

Abb. 3: Beim Scannen der Skulptur Äolus, München

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



Abb. 4: 3D Scan der Flora

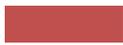
5. Kartierung

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).

Tab. 1: Kartierungsvorlage: Verwitterungsphänomene

Schadensphänomen	Kartierungsfarbe
Rückwitterung	
Relief	
Kruste	
Absanden	
Schuppen	
Schale	
Aufblättern / Aufspalten	
biologische Besiedlung	
Riss	

Rauheit	Kartierungsfarbe
> 1000	
1000 - 600	
600 - 400	
400 - 300	
300 - 200	
200 - 60	
< 60	
Tab. 2: Kartierungsvorlage: Rauheit der Oberfläche	

5.2 Drei-dimensionale Kartierung

Die Kartierung muss in einem nächsten Schritt am PC, allerdings nun drei-dimensional 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 Flächenermittlung 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.

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

	m ²
Gesamtfläche	4,63
Standfläche	1,30
zu kartierende Fläche (Gesamtfläche minus Standfläche)	3,33

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

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

Rauheit	m ²	% Gesamtoberfläche
P<1000 (Grün)	1,27	38,14
P1000-600 (Hellblau)	0,61	18,32
P600-400 (Grau)	0,51	15,32
P400-300 (Gelb)	0,94	28,23

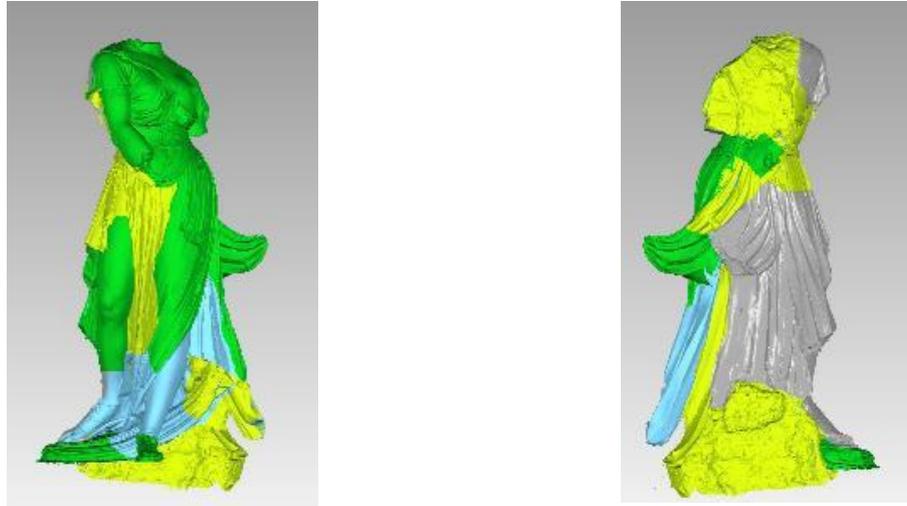


Abb. 5: 3D-Modell der Hera (Original) mit Kartierung der Oberflächenrauheiten

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.

6. Vergleich 2D-/3D-Kartierung



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

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.

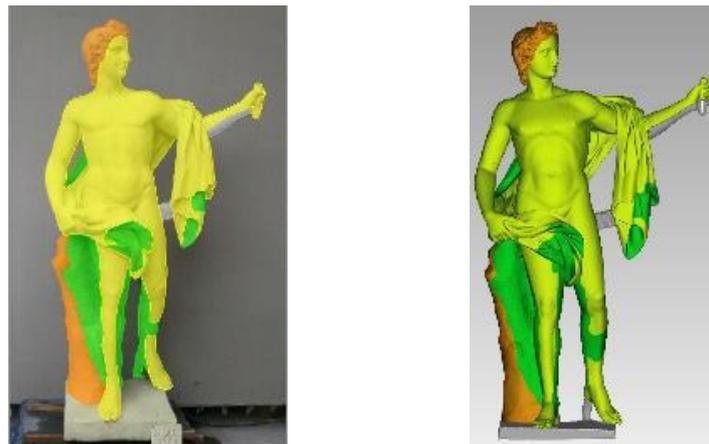


Abb. 7: Kartierung der Oberflächenrauheit der Apoll-Skulptur; links zwei-dimensional, rechts drei-dimensionale Kartierung

6.1 Zwei-dimensionale Kartierung

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

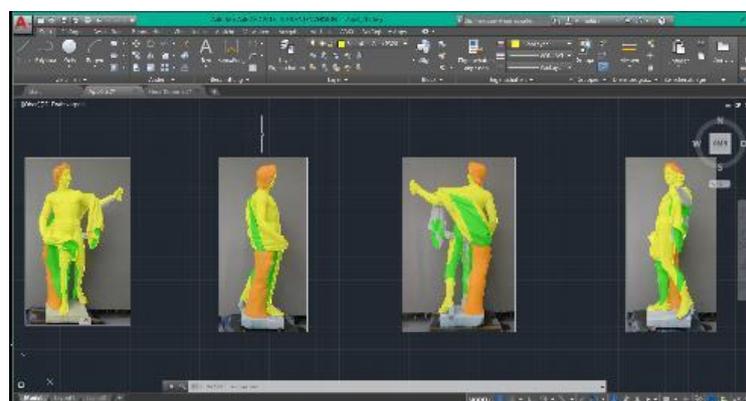


Abb. 8 : Benutzeroberfläche von AutoCAD mit der 2D-Kartierung der Oberflächenrauheit des Apoll

6.2 Vergleich der mit 2D und 3D bestimmten Gesamtoberfläche

In einem ersten Schritt ist die Gesamtoberfläche der Skulpturen in beiden Varianten bestimmt worden (siehe Tab. 5). Da beim 3D-Scan nahezu die exakte Oberfläche abgebildet wird, kann man bei der Ermittlung der Oberflächenmaße davon ausgehen, dass diese Werte der tatsächlichen Gesamtoberfläche entsprechen. Die Genauigkeit hängt bei diesem Verfahren vom Scanner und dessen Auflösung ab. Außerdem können, wie oben beschrieben, nicht alle Flächen genau aufgenommen werden. Beispielsweise können Vertiefungen nur bis zu einer bestimmten Tiefe vom Scanner erfasst werden. Die so entstehenden Fehlstellen werden bei der Nachbearbeitung durch Annäherung ermittelt. Das hat zur Folge, dass die bestimmten Flächenwerte um einen bestimmten, nicht genau definierbaren Wert zu gering ausfallen.

Tab. 5: Gesamtoberfläche der Skulpturen im Vergleich

	Gesamtoberfläche	
	2D-Kartierung	3D-Kartierung
Apoll	2,30 m ² (66,6% der 3D-Kartierung)	3,45 m ²
Hera	4,46 m ² (88,3% der 3D-Kartierung)	5,05 m ²
Flora	3,85 m ² (77,8 % der 3D-Kartierung)	4,95 m ²

Die bei der zwei- bzw. der drei-dimensionalen Kartierung ermittelten Werte zur Gesamtoberfläche der Skulptur sind sehr unterschiedlich. Bei der Skulptur Apoll erfasst man zwei-dimensional nur 66 % der tatsächlichen Oberfläche. Hinzu kommt, dass die zwei-dimensional gemessenen Oberflächen scheinbar größer ausfallen, weil bestimmte Teilflächen auf mehreren Ansichten sichtbar sind¹. Die tatsächliche Gesamtoberfläche der Skulptur kann auf diese Weise nicht ermittelt werden. Die 3D-Kartierung liefert den exakteren Wert der Oberfläche, weil auch Hinterschneidungen und Vertiefungen erfasst werden. So sind bei der Skulptur Apoll durch die 2D-Kartierung nur 66 %, bei Hera 88 % und bei Flora 77 % der Gesamtoberfläche erfasst.

6.3 Vergleich von 2D und 3D Schadenskartierung

Vergleicht man die Flächen der mittels 2D und 3D durchgeführten Schadenskartierung, so werden auch hier die Unterschiede deutlich erkennbar. Da sich die Ergebnisse der drei Skulpturen ziemlich unterscheiden, werden sie im Folgenden getrennt betrachtet.

¹ Teilweise werden Bereiche bei der 2D-Kartierung doppelt erfasst, da sie auf mehreren Aufnahmen der Skulpturen durch die verschiedenen Perspektiven zu sehen sind.

6.3.1 Apoll

Bei der Apollo-Skulptur sind bei den zwei Kartierungsmethoden wie zu erwarten unterschiedliche Werte ermittelt worden (s. Tab. 6). Interessant hierbei ist, dass zumindest die Reihenfolge der ermittelten Flächenwerte gleich ist. So ist der Flächenwert der Oberflächenrauheit P400-300 bei beiden Kartierungen am größten, gefolgt von > P1000 an zweiter Stelle und P300-200. Den geringsten Oberflächenanteil weist Rauheit P600-400 auf.

Tab. 6: Werte der Flächenanteile der Oberflächenrauheit im Vergleich. Skulptur Apoll

	Oberflächenrauheit	2D-Kartierung		3D-Kartierung	
		Fläche	% Gesamtoberfläche	Fläche	% Gesamtoberfläche
	>P1000 (Grün)	0,51 m ²	22,33%	0,69 m ²	19,98%
	P600-400 (Grau)	0,12 m ²	5,38%	0,48 m ²	13,78%
	P400-300 (Gelb)	1,17 m ²	51%	1,74 m ²	50,45%
	P300-200 (Orange)	0,49 m ²	21,4%	0,54 m ²	15,78%

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

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

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

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 der Oberflächenrauigkeit P1000-600 ist bei der zweidimensionalen Kartierung im Vergleich zur 3D-Kartierung leicht erhöht.

Tab. 8: Werte der Flächenanteile der Oberflächenrauheit im Vergleich. Skulptur Hera Kopie.

	Oberflächenrauheit	2D-Kartierung		3D-Kartierung	
		Fläche	% Gesamtoberfläche	Fläche	% Gesamtoberfläche
	P1000-600 (Blau)	2,44 m ²	54,71 %	2,59 m ²	51,29 %
	P600-400 (Grau)	2,03 m ²	45,52 %	2,46 m ²	48,71 %

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.

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

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

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).

Tab. 10: Die Werte der Flächenanteile der Oberflächenrauheit im Vergleich. Skulptur Flora

	Oberflächen-rauheit	2D-Kartierung		3D-Kartierung	
		Fläche	% Gesamt-oberfläche	Fläche	% Gesamt-oberfläche
	P600-400 (Grau)	1,02 m ²	26,42%	1,55 m ²	31,33 %
	P300-200 (Orange)	0,29 m ²	7,48%	0,67 m ²	13,58 %
	P200-60 (Rot)	0,37 m ²	9,52%	0,42 m ²	8,46 %
	P<60 (Lila)	2,09 m ²	54,22%	2,3 m ²	46,63 %

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.

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

Oberflächenrauheit	% der 3D-Kartierung
P600-400 (Grau)	65,81%
P300-200 (Orange)	43,28%
P200-60 (Rot)	88,1%
P<60 (Lila) 2,09	90,87%

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.

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 zweidimensionalen Kartierung erfasst und damit 0,3 m² 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 dreidimensionalen 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 oben beschriebenen 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 virtuellen 3D-Modells einen realen 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.

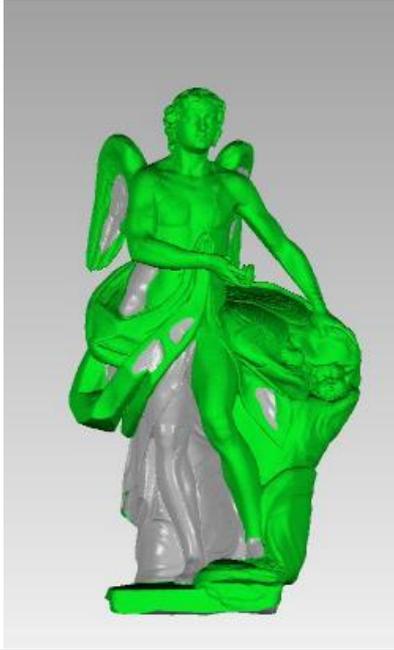
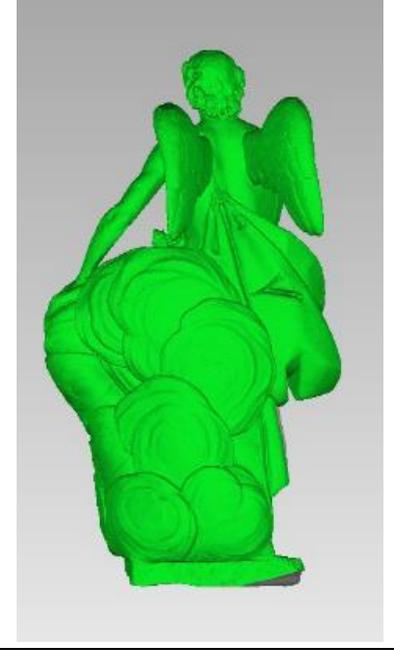
HORN FELIX (2006): Die virtuelle Retusche - Rekonstruktion verlorener Farbschichten am 3D Modell. In: Xi'an. Kaiserliche Macht im Jenseits. Kunst- und Ausstellungshalle der Bundesrepublik Deutschland Bonn. 21. April bis 23. Juli 2006. S. 180-183.

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.

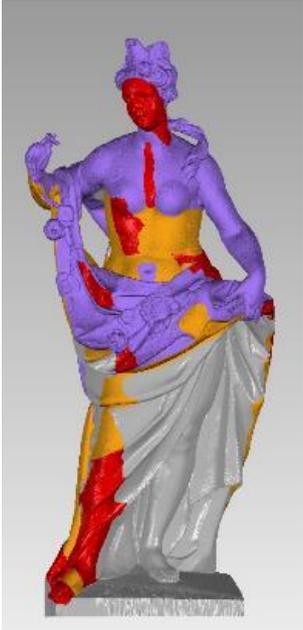
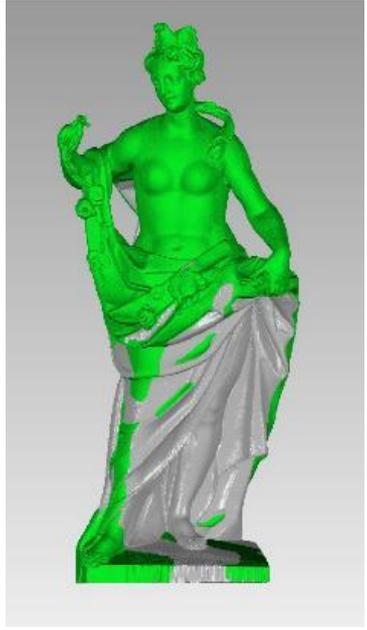
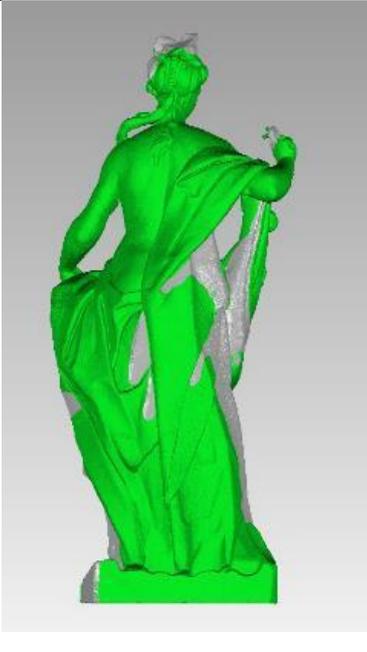
[Carolin Pfeuffer]

9. Anhang

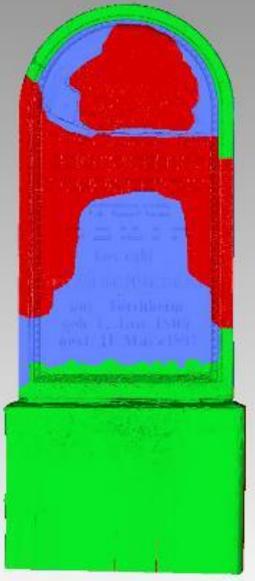
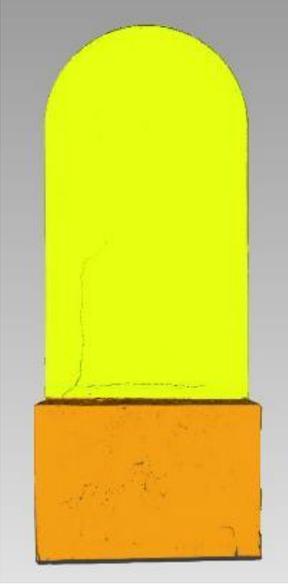
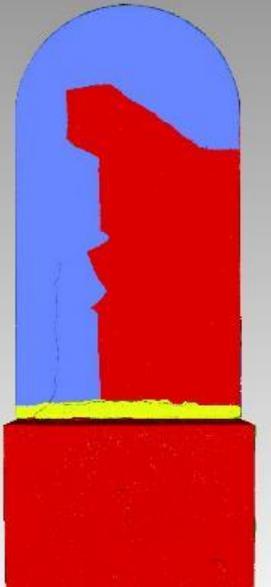
9.1 Kartierung von Äolus, Schlosspark Nymphenburg, München

	
Kartierung der Rauheit, Vorderseite	Kartierung der Verwitterungsphänomene, Vorderseite
	
Kartierung der Rauheit, Rückseite	Kartierung der Verwitterungsphänomene, Rückseite

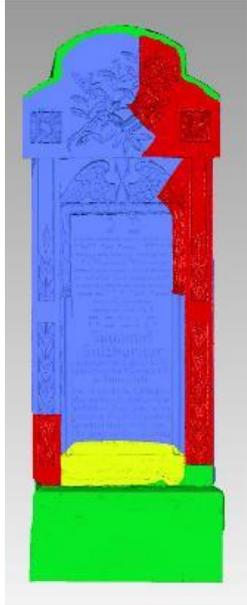
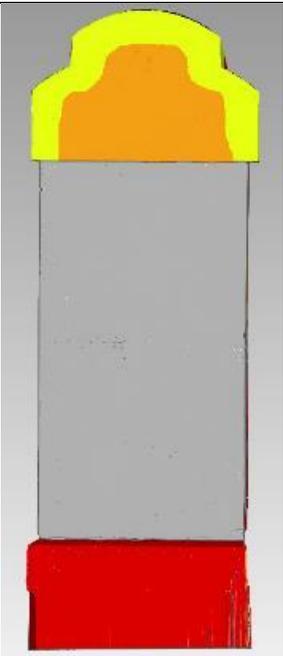
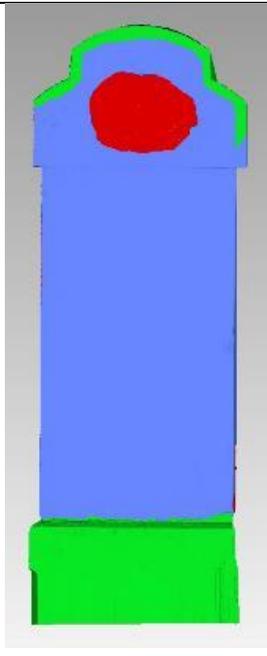
9.2 Kartierung von Flora, Schlosspark Nymphenburg, München

	
<p>Kartierung der Rauheit, Vorderseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Vorderseite</p>
	
<p>Kartierung der Rauheit, Rückseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Rückseite</p>

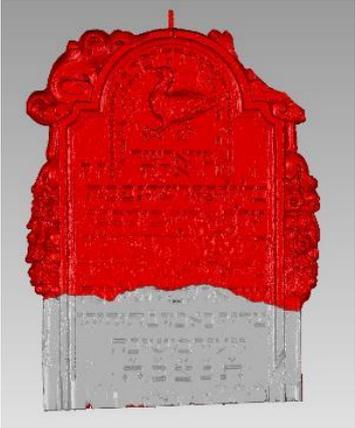
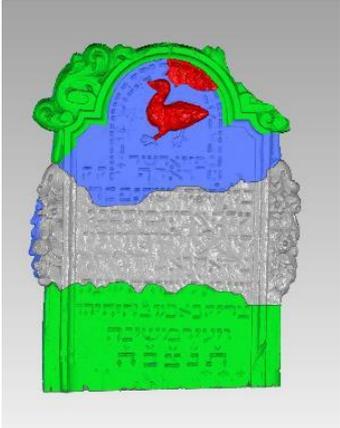
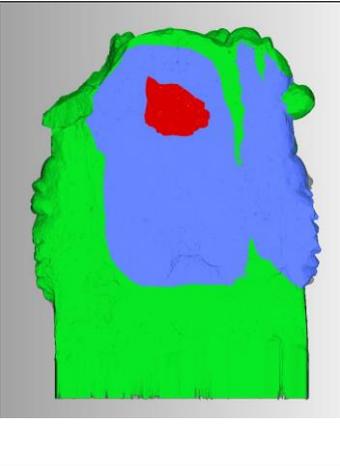
9.3 Kartierung des Grabsteins des Bernhard Ehrenbacher, Jüdischer Friedhof, Baiersdorf

	
<p>Kartierung der Rauheit, Vorderseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Vorderseite</p>
	
<p>Kartierung der Rauheit, Rückseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Rückseite</p>

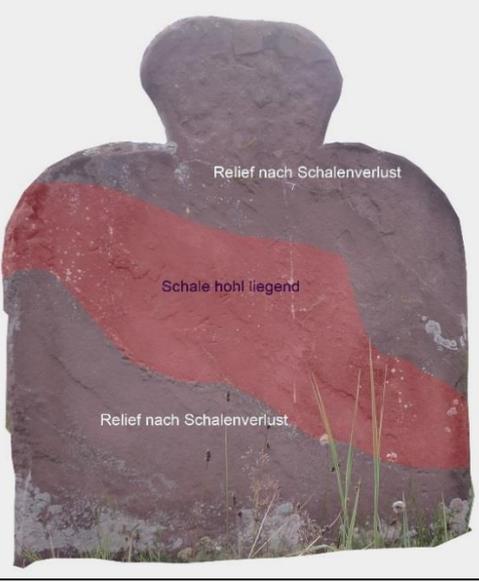
9.4 Kartierung des Grabsteins des Sigmund Sulzberger, Jüdischer Friedhof, Baiersdorf

	
<p>Kartierung der Rauheit, Vorderseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Vorderseite</p>
	
<p>Kartierung der Rauheit, Rückseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Rückseite</p>

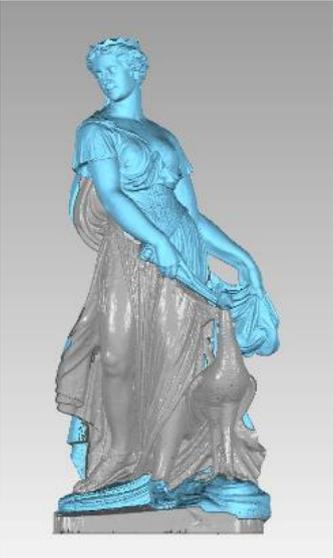
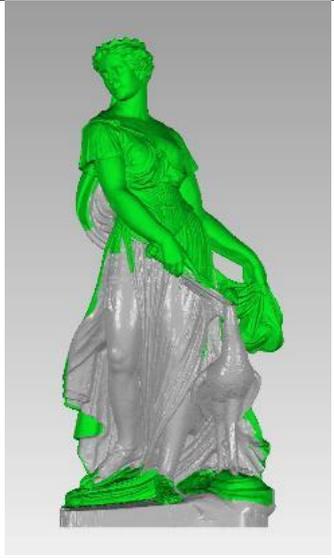
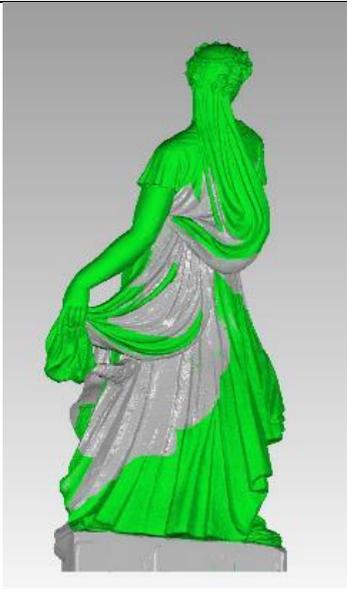
9.5 Kartierung des Grabsteins des Rabbi Löw Gans, Jüdischer Friedhof, Baiersdorf

	
<p>Kartierung der Rauheit, Vorderseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Vorderseite</p>
	
<p>Kartierung der Rauheit, Rückseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Rückseite</p>

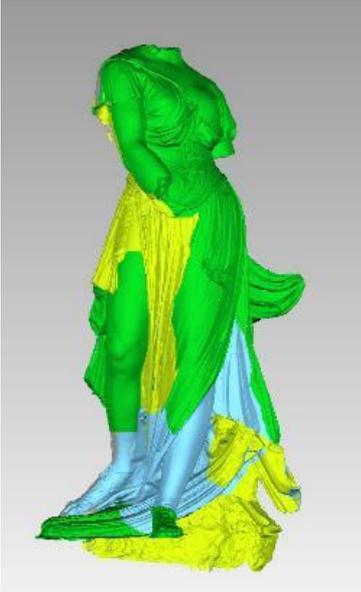
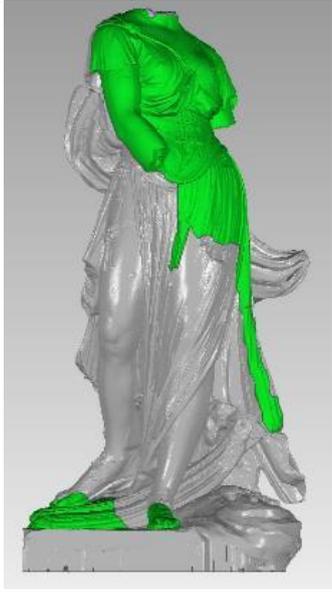
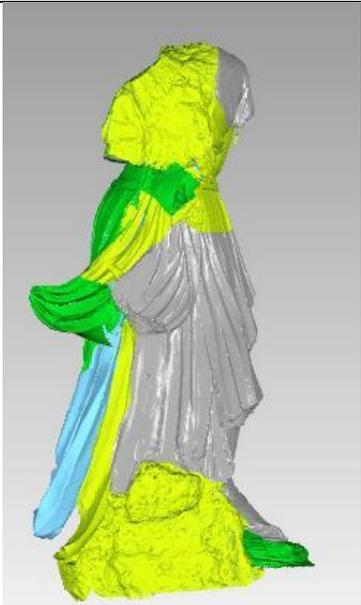
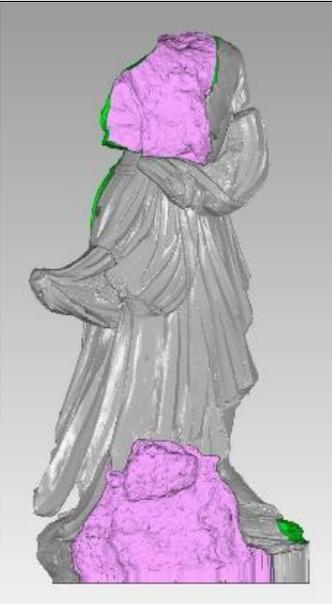
9.6 Nr 1091. Doppelgrab im Jüdischen Friedhof Baiersdorf

	
<p>Kartierung der Rauheit, Vorderseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Vorderseite</p>
	
<p>Kartierung der Rauheit, Rückseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Rückseite</p>

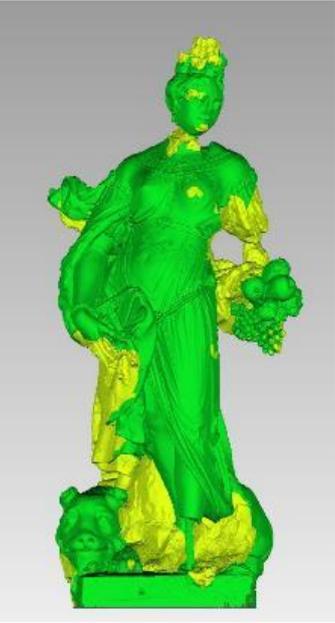
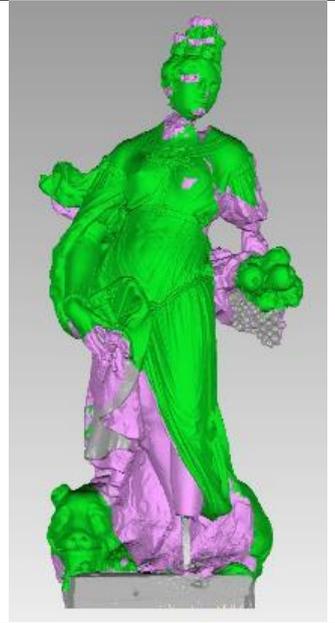
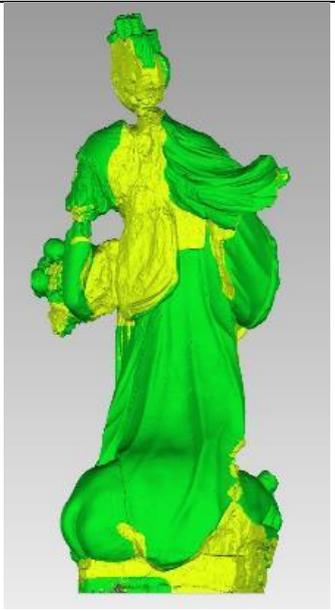
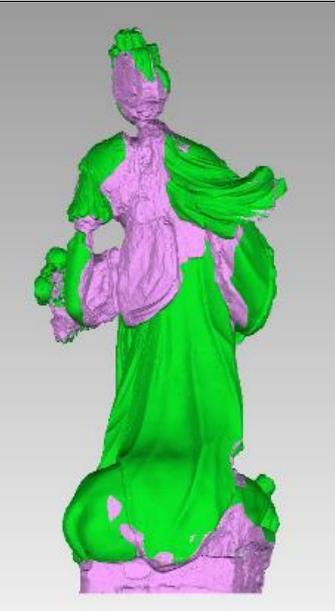
9.7 Kartierung Hera (Kopie), Barockgarten Großsedlitz, Heidenau

	
<p>Kartierung der Rauheit, Vorderseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Vorderseite</p>
	
<p>Kartierung der Rauheit, Rückseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Rückseite</p>

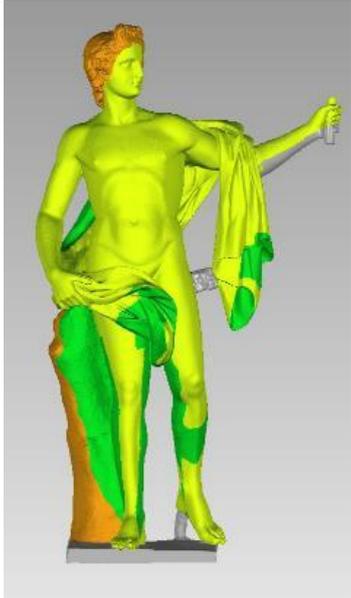
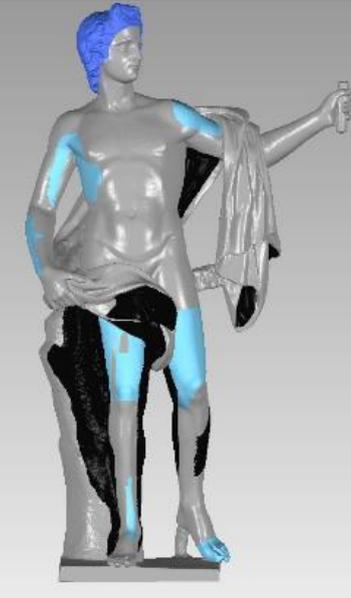
9.8 Kartierung Hera (Original), Barockgarten Großsedlitz, Heidenau

	
<p>Kartierung der Rauheit, Vorderseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Vorderseite</p>
	
<p>Kartierung der Rauheit, Rückseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Rückseite</p>

9.9 Kartierung Rhea (Original), Barockgarten Großsedlitz, Heidenau

	
<p>Kartierung der Rauheit, Vorderseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Vorderseite</p>
	
<p>Kartierung der Rauheit, Rückseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Rückseite</p>

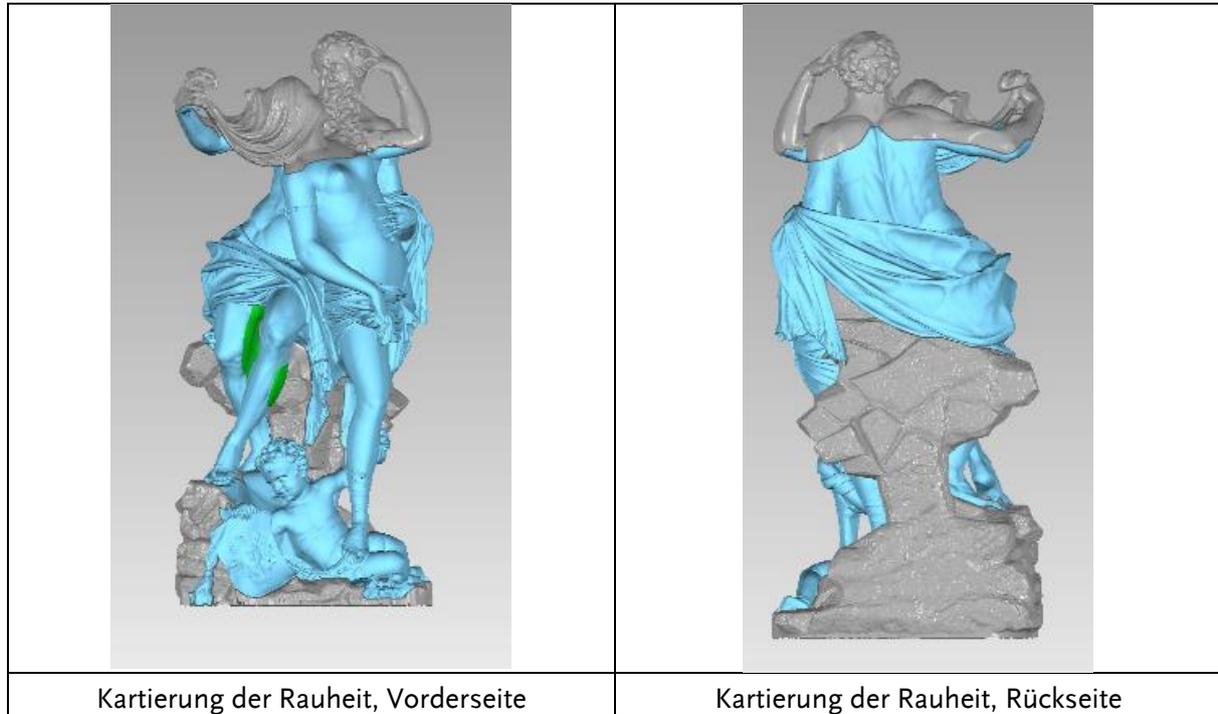
9.10 Kartierung von Apoll, Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg, Sammlung im Depot in Potsdam

	
<p>Kartierung der Rauheit, Vorderseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Vorderseite</p>
	
<p>Kartierung der Rauheit, Rückseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Rückseite</p>

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

	
<p>Kartierung der Rauheit, Vorderseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Vorderseite</p>
	
<p>Kartierung der Rauheit, Rückseite</p>	<p>Kartierung der Verwitterungsphänomene, Rückseite</p>

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



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 Schluze-Delitzsch aufgezeigt.

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]

Tab 1: Gestaltabweichungen von Festkörperoberflächen nach DIN 4760

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

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-Laserscanningmikroskopie, 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 verfahren. 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 taktilen bzw. berührendes Messverfahren bezeichnet wird.

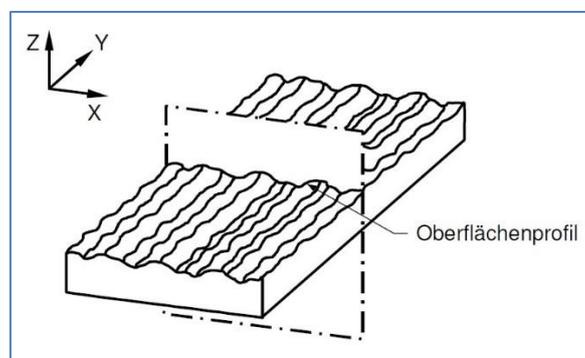


Abb 1. Oberflächenschnitt [6]

Das gemessene Rauheitsprofil hat folgende Form (Abbildung 2):

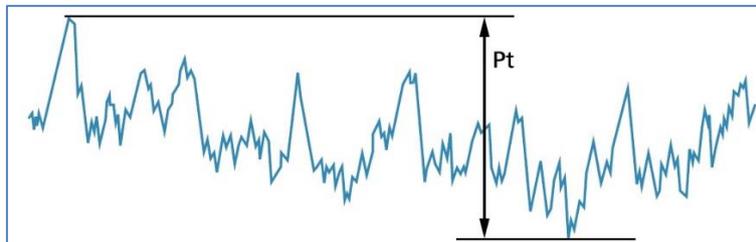


Abb 2: Ungefiltertes Rauheitsprofil

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 [μm]
- R_z – gemittelte Rautiefe [μm]
- R_t – Gesamthöhe des Rauheitsprofils [μm]

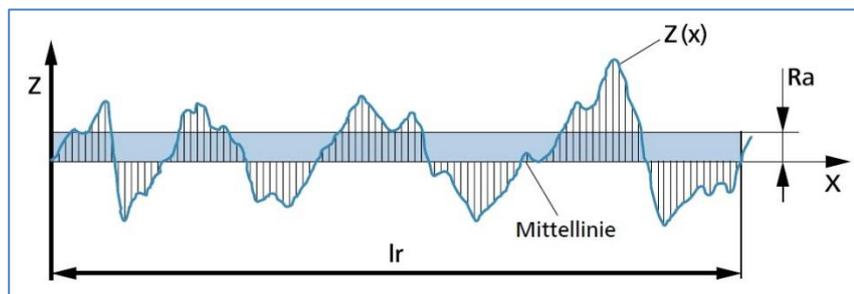


Abb 3: arithmetischer Mittelrauwert R_a

Die Berechnungsformeln sind in der DIN EN ISO 4287 festgelegt

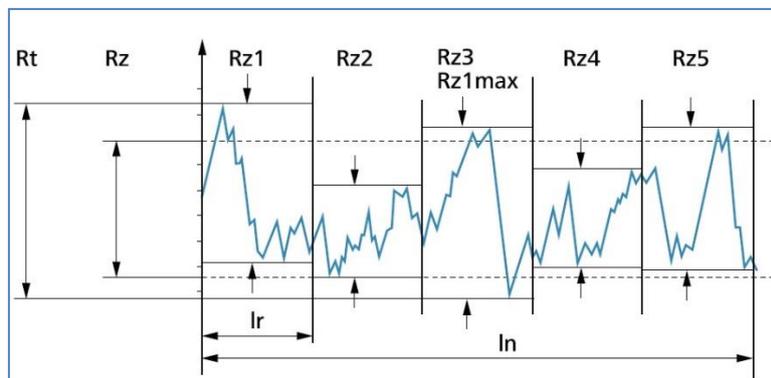


Abb 4: gemittelte Rautiefe R_z und Gesamthöhe des Rauheitsprofils R_t

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.

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

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

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

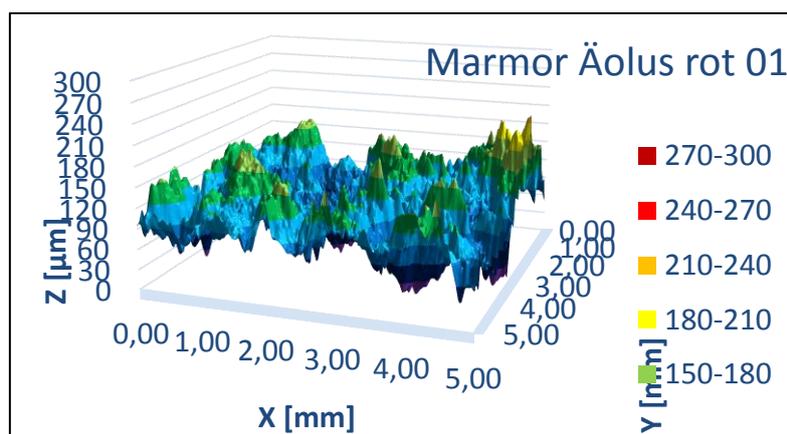


Abb 5: Topographie einer Marmoroberfläche

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.

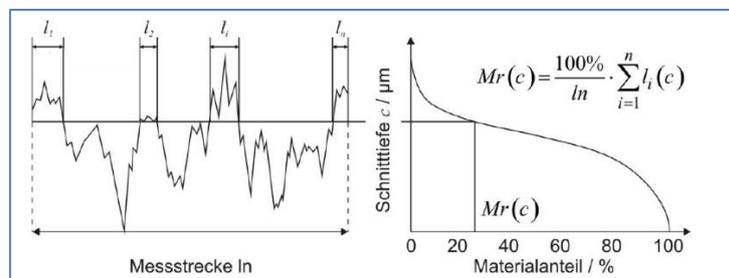


Abb 6: Konstruktion der Abbot-Kurve [7]

Die einzelnen Oberflächenformen unterscheiden hinsichtlich ihrer Abbot-Kurven erheblich.

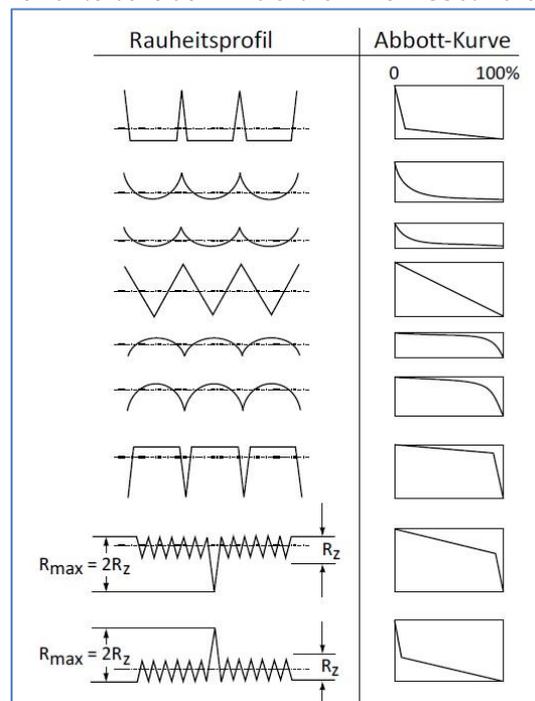


Abb 7: Oberflächenformen und Abbott-Kurven [8]

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 Messgeräten, 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 Objektoberfläche 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.

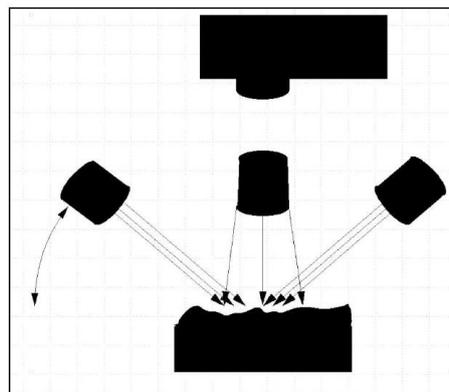


Abb 8: Messprinzip von TRACEiT® (INNOWEP GMBH) [9]

Das Messsystem besteht aus einem Notebook und einem Messkopf, der an diesem mit einem USB-Kabel angeschlossen ist und kann mehrere Stunden netzunabhängig betrieben werden.

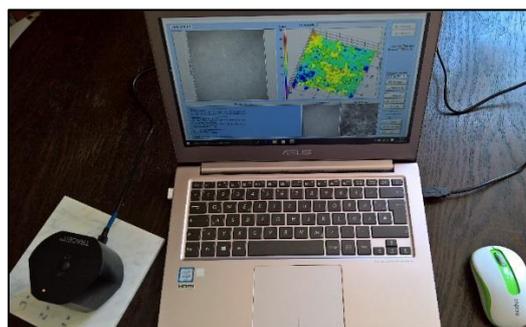


Abb 9: TRACEiT®-System mit Messkopf (links) (Foto: Irene Köhler 2016)

Die Messung ist absolut zerstörungsfrei. Der Messkopf wird auf die zu untersuchende Oberfläche für etwa 30 Sekunden aufgesetzt.



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.

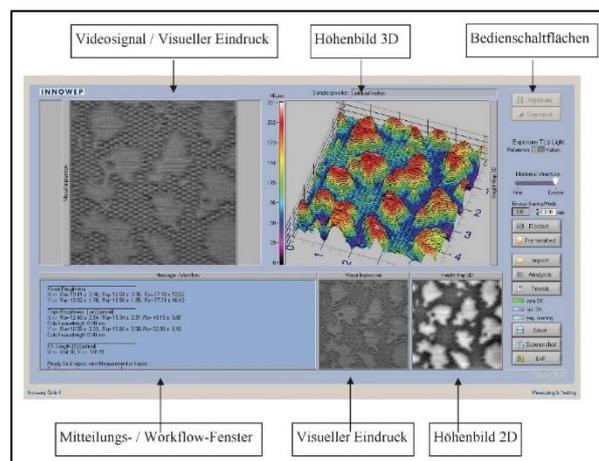


Abb 11: Messfenster der TRACEiT®-Software (INNOWEP GMBH) [9]

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 Ergebnisse sind mindestens fünf Einzelmessungen empfehlenswert. Es können S_z -Werte bis 750 μm 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.

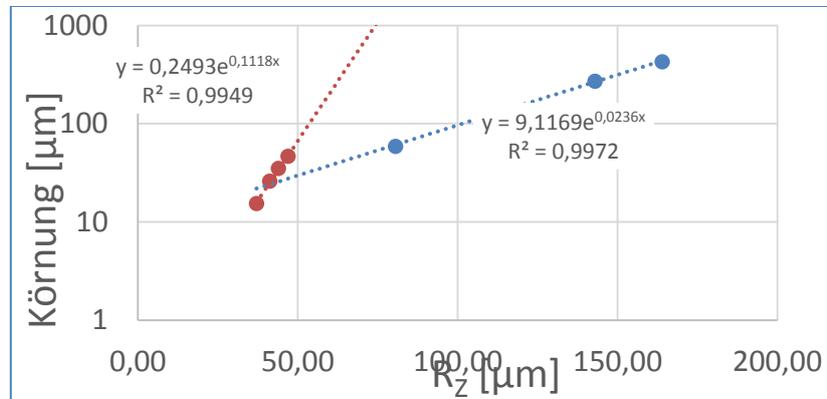


Abb 12: Unterschied zwischen „groben“ Papieren (blau) und „feineren“ Papieren (rot)

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

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

Rauheitsklasse N	Rauheitswert		Taktile Rau- heit N	Rauheit	Schleifpapier
	R_a [µm]	R_z [µm]		R_z [µm]	P
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

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.

Messerfahrten haben gezeigt, dass Gesteinskörner ihren Halt im Gesteinsverband verlieren, wenn sie $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ 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.

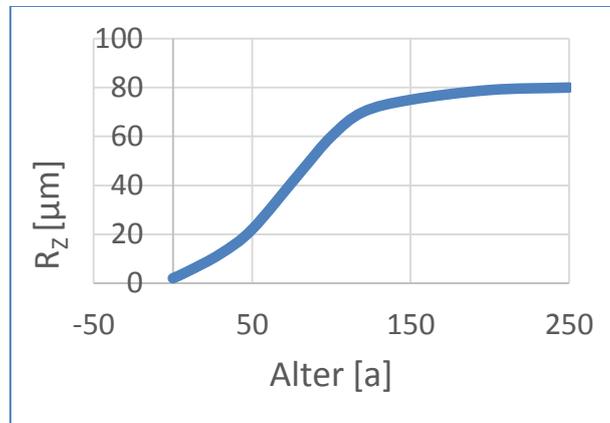


Abb 13: Schematische Entwicklung der Rz-Werte im Laufe der Gesteinsverwitterung

Tab 4: Größenordnungen der möglichen größten Rz-Werte von Oberflächen einiger verwitterter Gesteine

Gestein	Korngrößen [µm]	maximale Rauheit Rz [µm]
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

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 Rz-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.

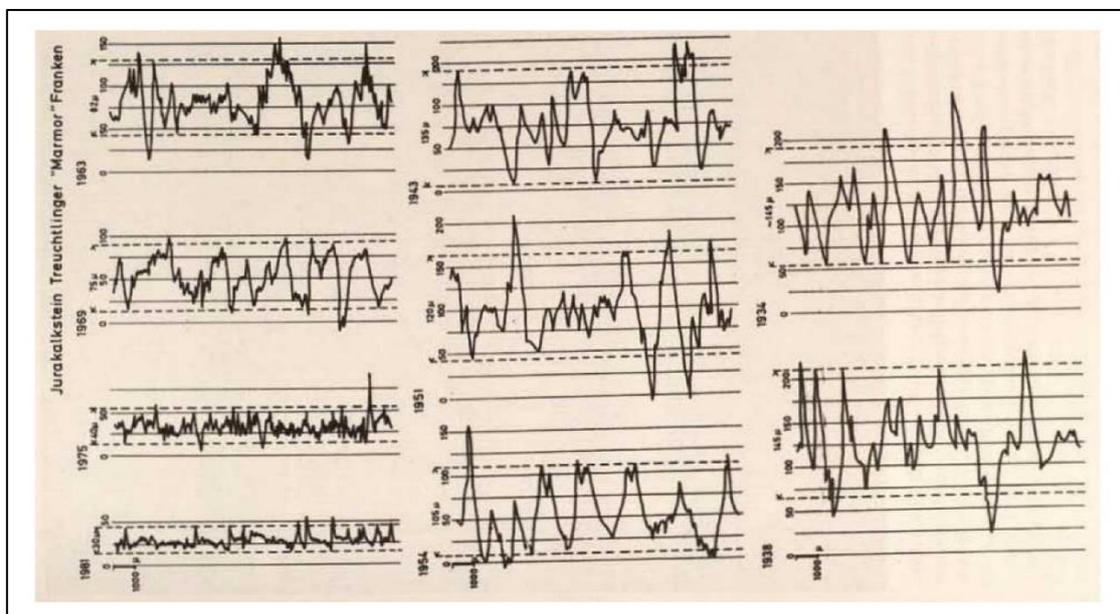


Abb 14: Rauheitsmessungen an Münchner Grabsteinen

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.

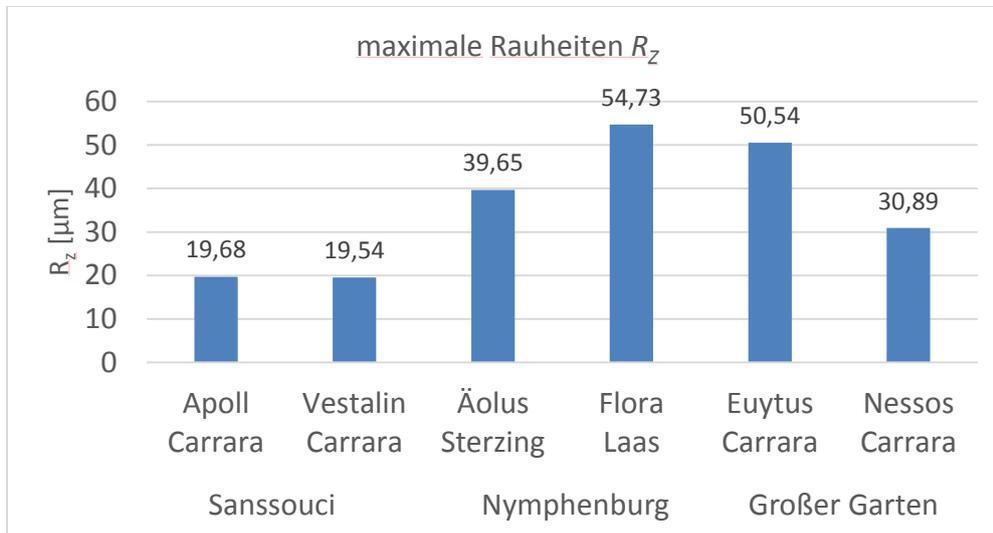


Abb 15: Gegenüberstellung der Rauheitsmessungen an Marmordenkmälern in Potsdam, München und Dresden

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.



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

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.

Tab 5: Ergebnisse der Messungen der Oberflächenrauheit

Messung		Rz [μm]			Rauheits- klasse N
	Beschreibung	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	Gefügebrauflockerung	39,41	36,37	33,32	9
SD01	biogene Kruste ungerieinigt	42,59	46,67	50,75	9
SD02	biogene Kruste gerieinigt	12,95	13,04	13,12	7
SD06	biogene Kruste ungerieinigt	58,05	59,79	61,53	10
SD07	biogene Kruste gerieinigt	19,50	19,48	19,46	7

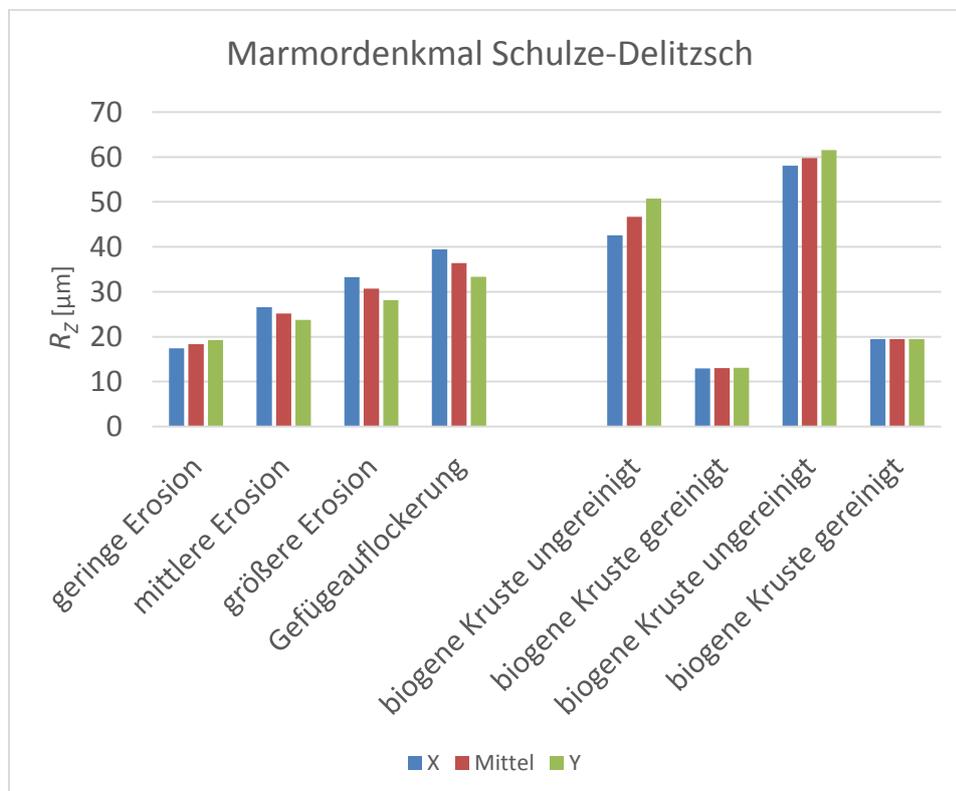


Abb 17: Gegenüberstellung unterschiedlicher Verwitterungszustände und der Reinigungsergebnisse anhand von Rz-Messungen

Die Topographiediagramme bestätigen diese Ergebnisse.

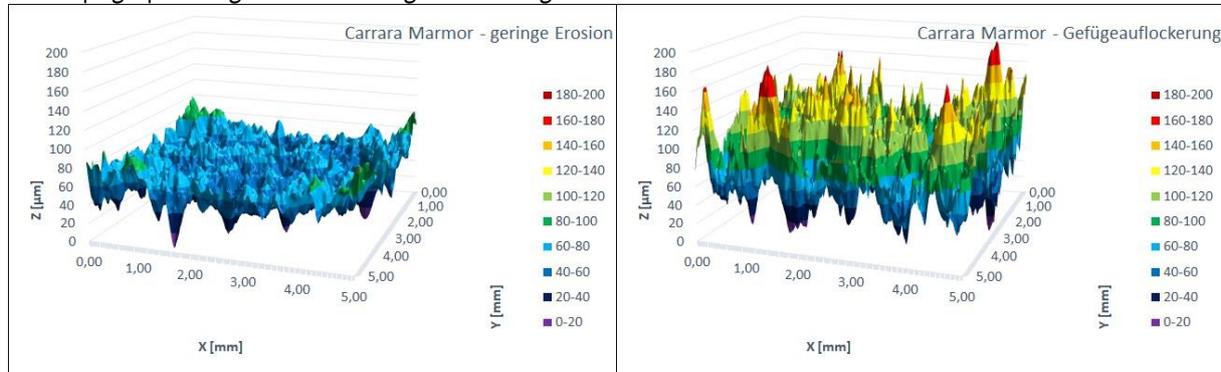


Abb. 18: Gegenüberstellung der Topographien einer gering verwitterten Marmoroberfläche und einer Oberfläche mit Gefügauflockerung

Auch bei der Beurteilung von Reinigungsmaßnahmen ergibt sich ein eindeutiges Topographiebild. Auffällig ist die notwendige Vergrößerung der Z-Skalierung auf 300 μm , da die vorliegende biogene Krustenbildung zu einer starken Erhöhung der Oberflächenrauheit geführt hat.

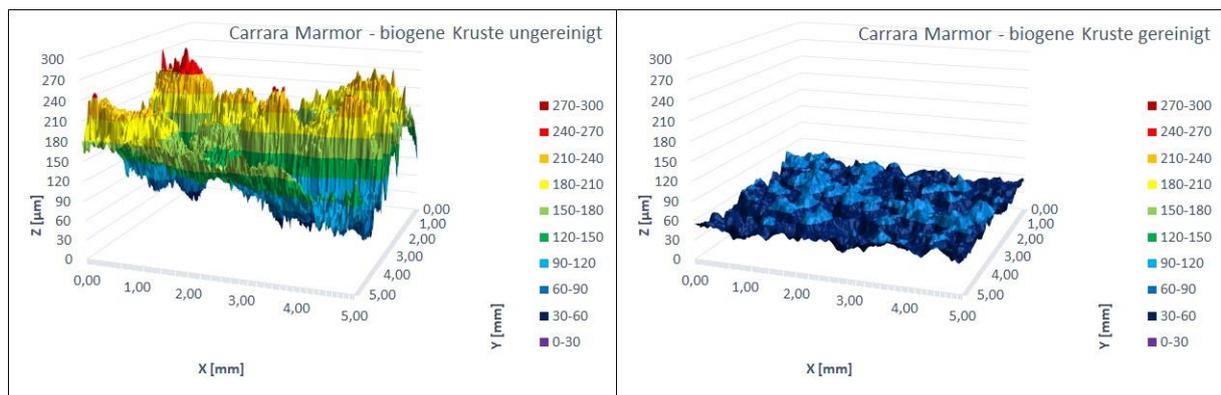


Abb. 19: Topographievergleich vor und nach der Reinigung einer biogenen Kruste.

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

4.3. Rauheitsmessungen an Sandsteindenkmälern

Im Rahmen dieses DBU-Projekts erfolgten auch Rauheitsuntersuchungen an verschiedenen Sandsteinfiguren 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.

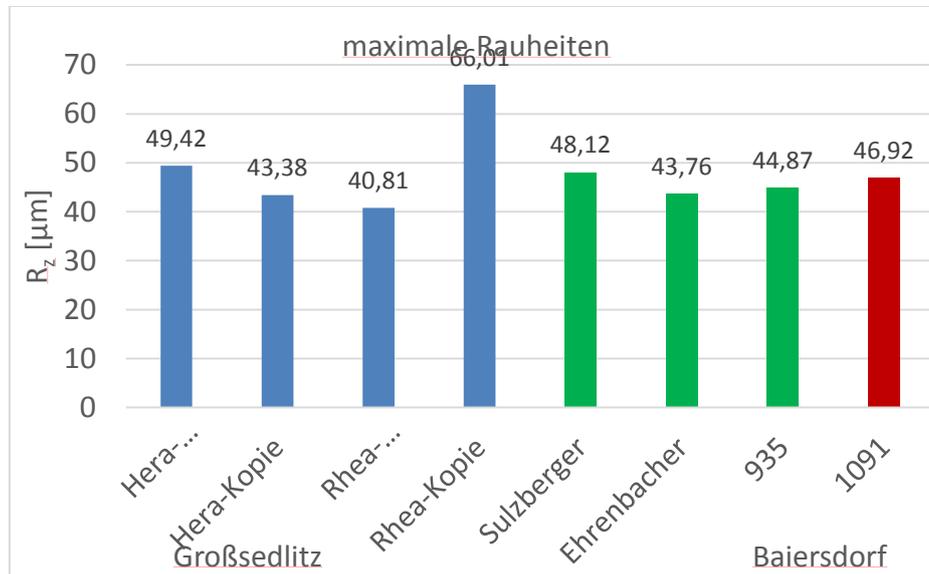


Abb 20: Maximal gemessene Rz-Werte an ausgewählten Sandsteindenkmälern

5. Ausblicke und Perspektiven

Die Methoden der flächenhaften optischen Rauheitsmessungen stellen eine wertvolle Ergänzung der zerstörungsfreien Monitoringmethoden für Denkmaloberflächen 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 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, STRÜMPPEL 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 29 June – 1 July.
- [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 surface 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; Restauero 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

[Wolfram Köhler]

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 Baisersdorf/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.

1. Risikoziffer und Gesteinskennwerte

Die Berechnung der Risikoziffer von Natursteindenkmalen basiert auf der Quantifizierung von verschiedenen Eigenschaften dieser Denkmale. Neben kunstwissenschaftlichen Merkmalen sind dies hauptsächlich 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 μ) 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 der der 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 bedeutet ρ_R die Rohdichte des Festkörpers in g/cm^3 . Es existieren folgende Zusammenhänge:

Primärwelle, Longitudinalwelle, Stoßwelle, Kompressionswelle, P-Welle in m/s oder 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 m/s oder km/s:

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

Dynamischer E-Modul in N/mm² oder Pa:

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

Poissonzahl μ (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 E_{dyn} oder in der Druckpresse aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm als E_{stat} ermittelt werden. E_{dyn} ist meist höher als E_{stat} , 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.

2.2 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.



Abbildung 1: Ultraschallgeschwindigkeit an einem Marmorpostament

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

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

v_p – P-Wellengeschwindigkeit [m/s; km/s]
 l – Messstrecke [cm]
 t – P-Wellenlaufzeit [μ s]

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.

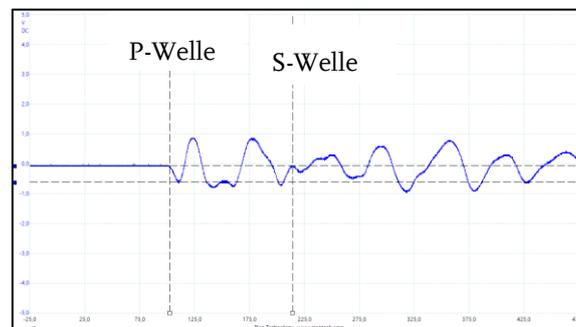


Abbildung 2: Ultraschallsignal mit P- und S-Welle

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 Baustoffes 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 Porenhalte, Luft, Wasser oder Salzlösungen, haben unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten. Diese lassen sich isoliert voneinander in reiner Form oft gut messen.

Tabelle 1: P-Wellengeschwindigkeiten von exemplarischen Gesteinskomponenten und Porenfüllungen

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

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.

Tabelle 2: P-Wellengeschwindigkeiten unterschiedlicher Kalksteine

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

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 Abbaustellen 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.

Tabelle 3: Anisotropie der Calcitkristalle [3]

Calcit	$v(p)$	$\alpha(\text{thermisch})$
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	$10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

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.

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 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.

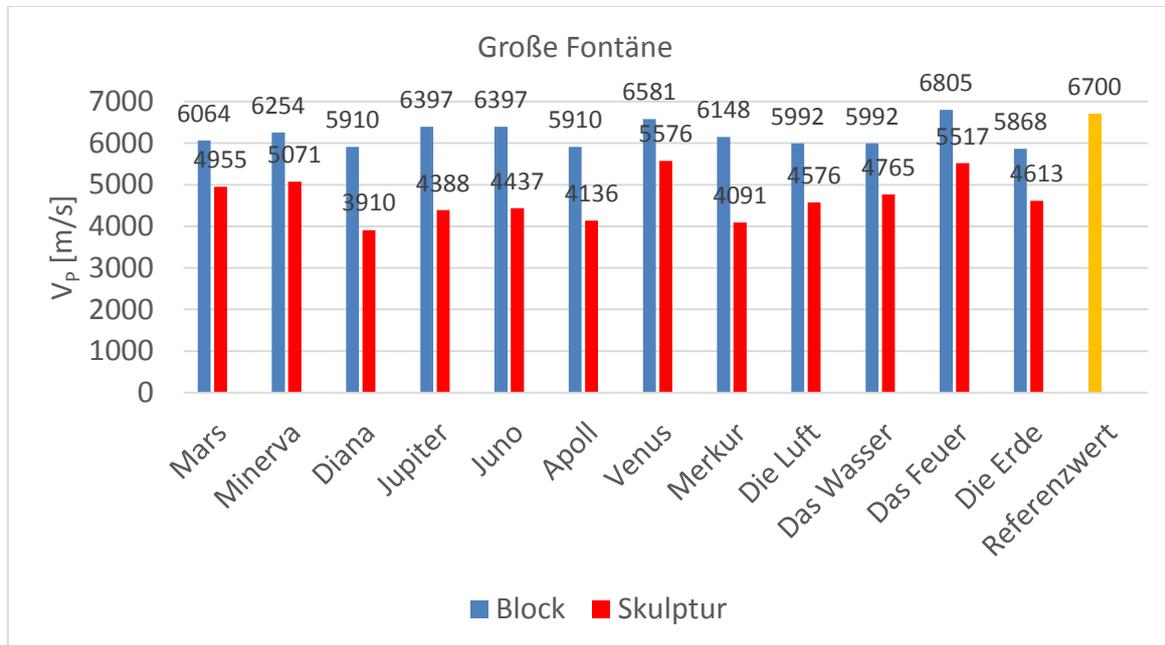


Abbildung 3: Vergleich vom Marmorrohblöcken und daraus für die große Fontäne im Park Sanssouci gearbeiteten Skulpturen

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.

Tabelle 4: P-Wellengeschwindigkeit v_p und Schadensklassen von mittel- und feinkristallinen weißen Marmoren [4]

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

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

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

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.

Tabelle 5: Ultraschallgeschwindigkeit und Gesamtporosität ausgewählter Sandsteinproben nach [7]

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

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

Tabelle 6: Arithmetisches Mittel der Schallgeschwindigkeiten von Elbsandsteinproben

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

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 Baudenkmalen 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 Schallgeschwindigkeiten, etwa 90% des Referenzwertes (unverwitterter Zustand) entsprechen, der für eine Zustandsbeurteilung Verwendung finden kann.

Alle Mittelwerte der 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.

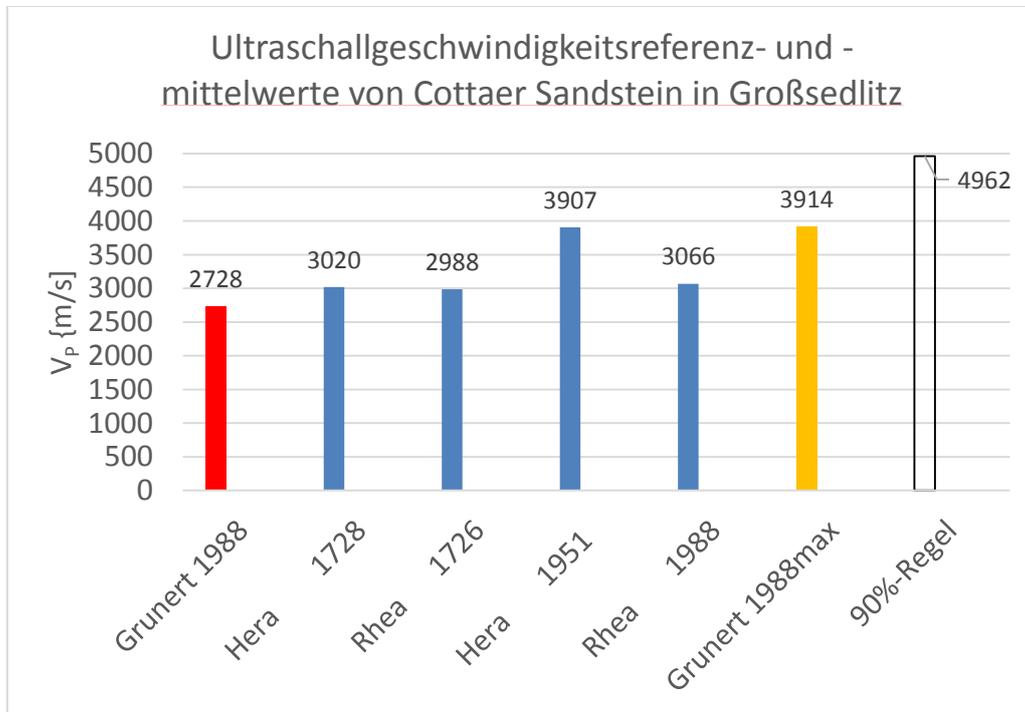


Abbildung 4: „90%-Regel“ für Cottaer Sandstein

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 Großen 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.
- 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.

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.



Abbildung 5: Kartierung der Ultraschallmesspunkte an der Skulptur „Äolus“ im Schlosspark Nymphenburg



Abbildung 6: Kartierung der Ultraschallmesspunkte an der Skulptur „Flora“ im Schlosspark Nymphenburg. Die Zusammenstellung der Messungen vermittelt einen Eindruck vom Zustand der einzelnen Skulpturen.

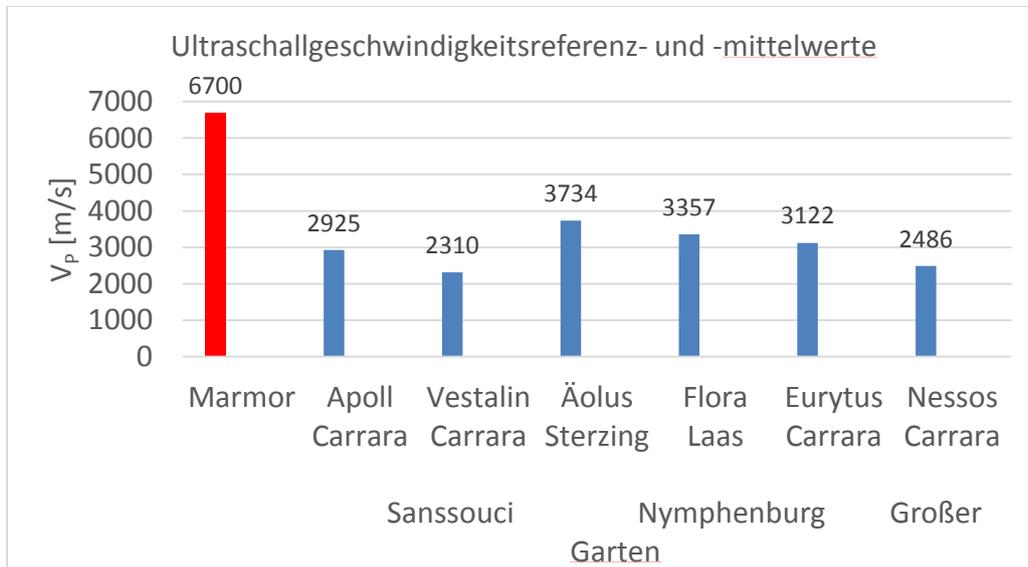


Abbildung 7: Vergleich der mittleren Ultraschallgeschwindigkeiten der untersuchten Skulpturen

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.



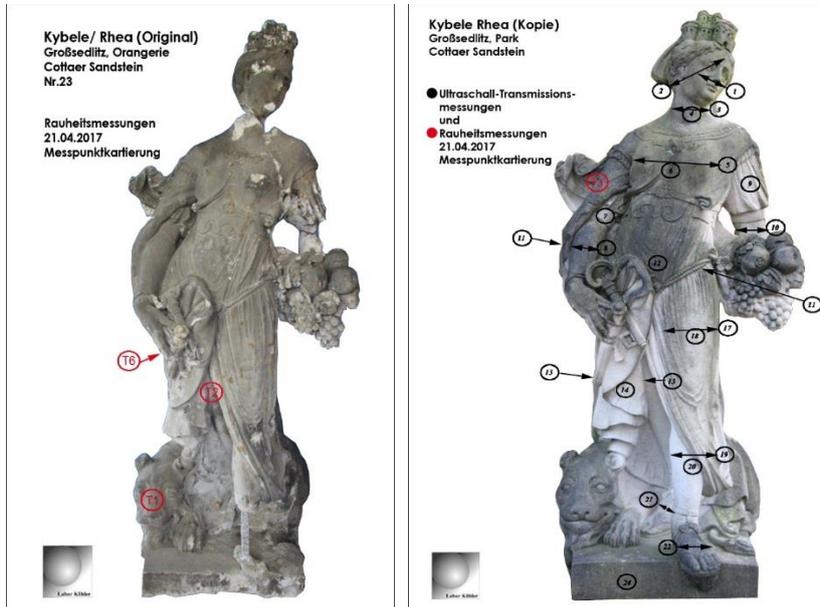


Abbildung 8: Kartierung der Ultraschall- und Rauheitsmessungen an den Originalen (links) und Kopien (rechts) der Sandsteinskulpturen „Hera“ (oben) und „Rhea“ (unten)

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.

Tabelle 7: Lagerungsabhängige P-Wellengeschwindigkeiten

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

Die Messungen wurden kartiert.



Abbildung 9: Messpunktkartierungen der Grabsteine „Sulzberger“ und „Ehrenbacher“



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

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:

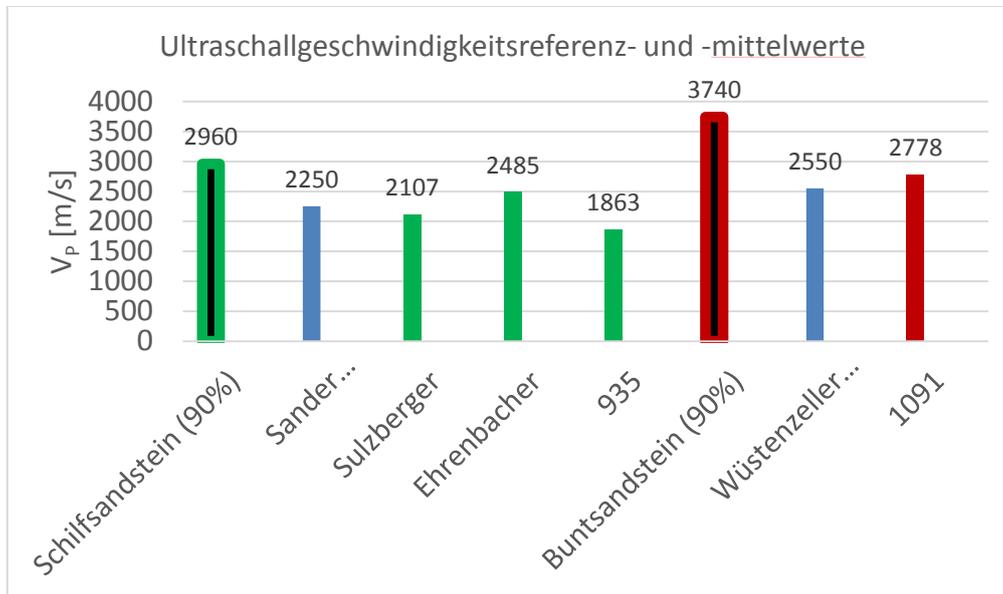


Abb. 11: Referenz- und Vergleichswerte zu den Messungen an den vier Grabsteinen in Baiersdorf

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

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] Rüdric, 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]

Risikoziffer: 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.

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.

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.

	Schlosspark Sanssouci Neue Kammern Apoll Carrara Marmor Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,49$		Schlosspark Sanssouci Neue Kammern Vestalin Carrara Marmor Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,65$
---	--	--	---

	<p>Schlosspark Nymphenburg Äolus Sterzinger Marmor Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,60$</p>		<p>Schlosspark Nymphenburg Flora Laaser Marmor Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,59$</p>
	<p>Barockgarten Großsedlitz Hera Original Sandstein Typ Cotta Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,64$</p>		<p>Barockgarten Großsedlitz Rhea Kybele Original Sandstein Typ Cotta Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,64$</p>
	<p>Barockgarten Großsedlitz Hera Juno Kopie Sandstein Typ Cotta Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,53$</p>		<p>Barockgarten Großsedlitz Rhea Kybele Kopie Sandstein Typ Cotta Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,55$</p>

	<p> Baiersdorf bei Erlangen Jüdischer Friedhof Nr 935 Grabmal Löw Gans Schilfsandstein Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,45$ </p>		<p> Baiersdorf bei Erlangen Jüdischer Friedhof Nr 1091 Grabmal Name unbekannt Buntsandstein Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,36$ </p>
	<p> Schlosspark Sanssouci Halbrondell vor dem Neuen Palais Satyr Carrara Marmor Arithmetisches Mittel: $R_{ges} = 0,39$ </p>		

Abbildung 11: Gesamt-Risikoziffern der bearbeiteten Objekte.

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 zu einem „besseren“, unter Umständen sogar zu einem „schlechteren“ Ergebnis, wie eine kleine Rechnung zeigt.

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

Doppelte Gewichtung eines Parameters:

$$R(\text{ges}) = \sum R(i) / n(i) + R(x) / 1 = [\sum R(i) + R(x)] / (n(i) + 1)$$

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 hygri sche Dehnung und die Wasseraufnahme einen Einfluss auf die Verwitterung aus. Ein Minimalrisiko für Vandalismus besteht bei jeglicher Aufstellung im Freien.

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 werden nie an allen Messstellen den niedrigsten möglichen Wert annehmen, sonst wären die Objekte schon längst zusammengebrochen.

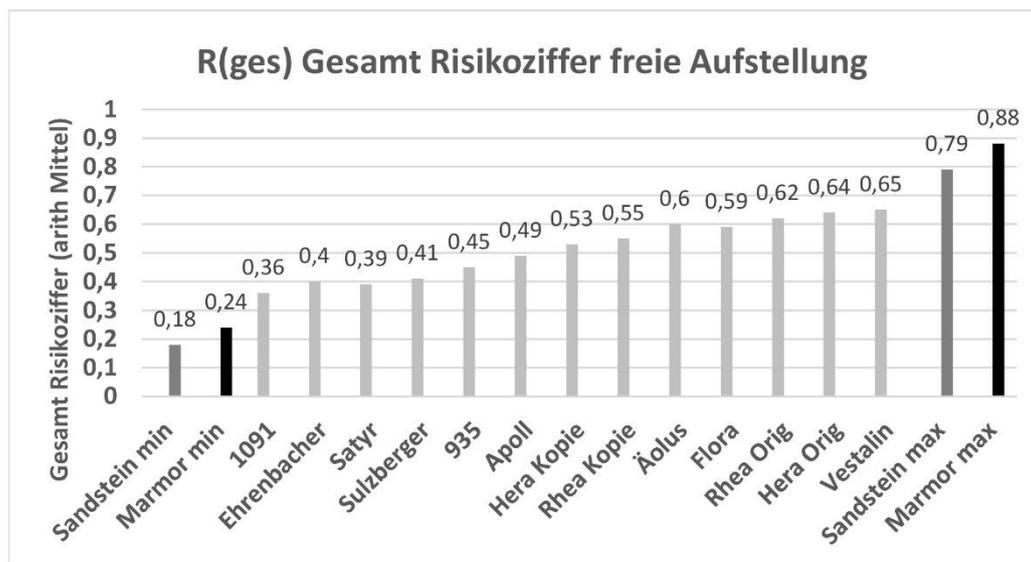


Abbildung 12: Darstellung der Gesamt-Risikoziffern mit realistisch erreichbaren Unter- und Obergrenzen.

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 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 eingegte 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. Im folgenden Bild ist die entstehende Graphik für das Beispiel der Marmorfiguren dargestellt.

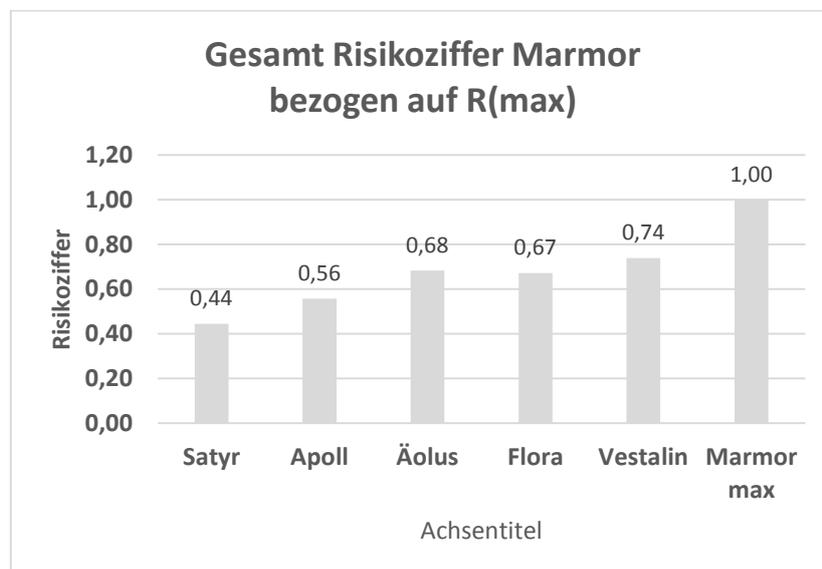


Abbildung 13: Gesamt-Risikoziffern der Marmorobjekte bezogen auf die Obergrenze $R_{max} = 0,88$.

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.

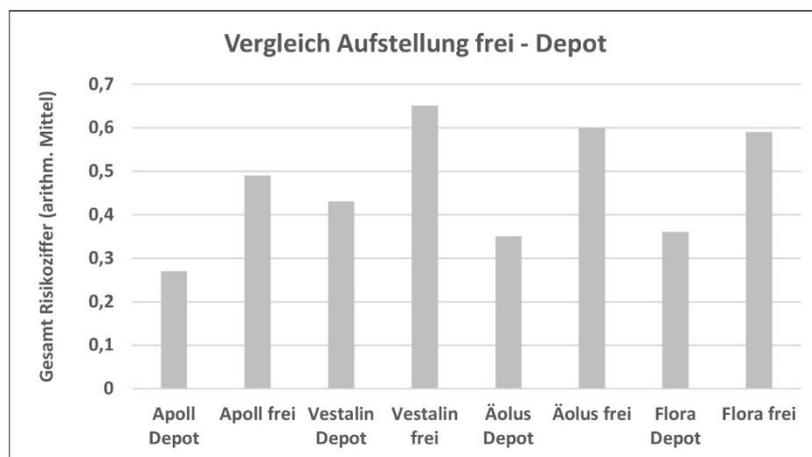


Abbildung 14: Modellrechnung für Aufstellung frei – Depot für die untersuchten Marmorobjekte.

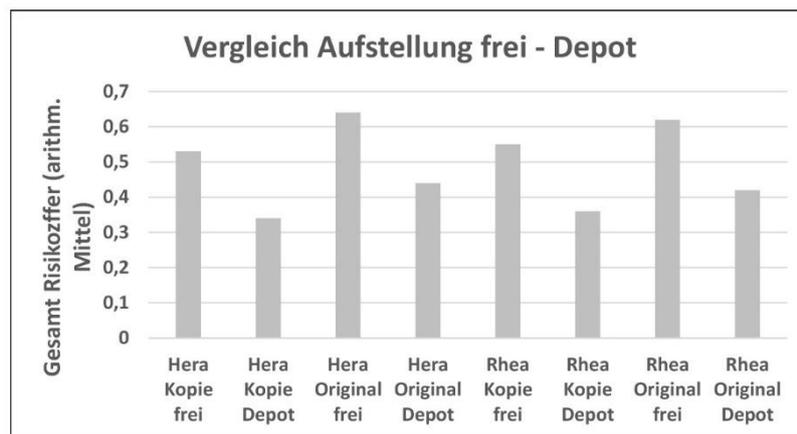


Abbildung 15: Modellrechnung für Aufstellung frei – Depot für die untersuchten Sandsteinobjekte.

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 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 **16** gezeigt.

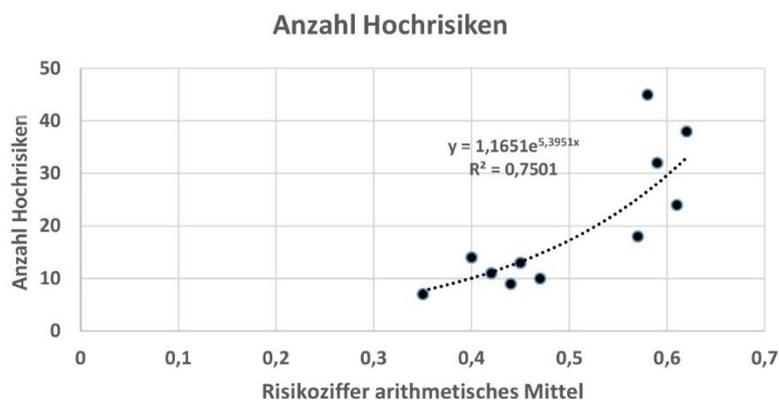


Abbildung 16: Korrelation zwischen Hochrisiken und Gesamtrisikoziffer.

Man erkennt einen exponentiellen Anstieg zu höheren Risikoziffern, was in gewisser Hinsicht auf eine generelle 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 Barockgartens Großsedlitz. Diese Beschädigungen gehen aber auf Einschläge von Granatsplintern 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 Datenblattes $R(i)$ 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 Datenblattes $R(i)$ 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 (Abbildung 17; Abbildung 18).

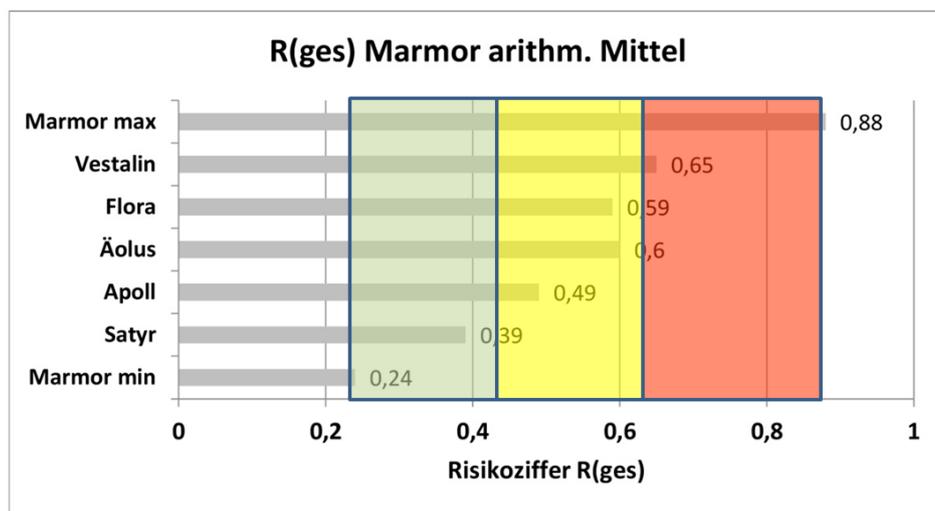


Abbildung 17: Vereinfachte Einstufung wenig gefährdet - gefährdet - hoch gefährdet für Marmor.

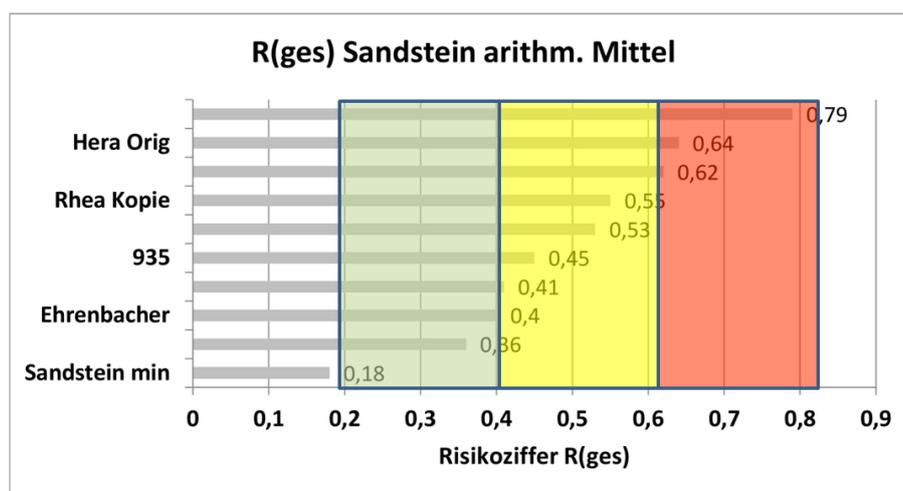


Abbildung 18: Vereinfachte Einstufung wenig gefährdet - gefährdet - hoch gefährdet für Sandstein.

3) Schlussfolgerungen

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 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 die Risikoziffer allen Eigentümern empfohlen werden kann, ihren Skulpturenbestand untersuchen und in seinem 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]

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 nur 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 wurden. 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 „Structure from Motion“ Technik 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 nachgeholt 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 würden, 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, ist eine verlässliche und präzise Anfangserfassung mit Hilfe von 3D Modellen und quantitativen Schadensauswertungen unerlässlich.

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.

Für Interessenten können auf Anfrage Excel Files zur Verfügung gestellt werden, eine Leerversion zum Eintragen der eigenen Daten und eine Beispielfassung zur Veranschaulichung der Vorgehensweise. Weil weiterhin Erfahrungen mit der Risikoziffer gesammelt werden sollen, werden die Resultate vom Verfasser als Gegenleistung erbeten.

[Rolf Snethlage]

Bericht fertiggestellt

Bamberg, im Mai 2018

Prof. Dr. Rainer Drewello

Diplom Restauratorin Carolin Pfeuffer

Diplom Physiker Wolfram Köhler Potsdam

Prof. Dr. Rolf Snethlage Bamberg

KDWT Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien
Otto-Friedrich-Universität Bamberg
Am Zwinger 6
96047 Bamberg

SEKRETARIAT
Monika Vogler
Am Zwinger 6
96047 Bamberg
Tel. 0951/863-1610
Monika.vogler@uni-bamberg.de

info.kdwt@uni-bamberg.de
