https://doi.org/10.20378/irbo-51862

Rolf Snethlage

8. Risikoziffer V: Erläuterungen zu den Datenblättern

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

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

Datenblatt 1: Objektbeschreibung
Die hier verlangten Angaben sind selbsterklärend und bedürfen keiner weiteren Erklärung.

Datenblatt 2: Kunstwissenschaftliche Bewertung B(KB)
Dieses Datenblatt geht im Wesentlichen auf Saskia Hüneke und Kathrin Lange von der SPSG 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 SPSG in Potsdam hat Hüneke (2017 pers. Mitteilung) einen kunstgeschichtlich und konservatorisch basierten Diskussionsprozess entwickelt, der in der letzten Stufe in konkrete Erhaltungsmaßnahmen einmündet:

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

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

Datenblatt 3: Restaurierungsgeschichte R(RGS)
Die Restaurierungsgeschichte eines betrachteten Objekts stellt in der Reihe der anderen Datenblätter einen Sonderfall dar. Sie ist nicht unmittelbar mit dem Begriff „Risiko“ verbunden. Zu Recht wird man annehmen, dass eine Restaurierung die Gesamtsituation der Skulptur verbessert und das Schadensrisiko

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

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

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

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

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

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

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

über die Zahlenwerte, die in diesem Projekt verwendet wurden.

Dresden			NO_2 (µg/m³)	PM10 (µg/m³)
2015	**Großer Garten**		18	18
	Winckelmann-straße	Hinter-grund urban	18	18
	Umland (niedrigste Messstellen in Sachsen)	Hinter-grund Land	8	17
	Großsedlitz		18	17
München	**Schlosspark Nymphenburg**		32	19
2015	Lothstraße	Hinter-grund urban	32	19
	Johanniskirchen	Hinter-grund Land	8	12
Potsdam	**Schlosspark Sanssouci**		17	20
2015	Zeppelinstraße	Belastung urban	32	27
	Zeppelinstraße	Hinter-grund urban	17	20
	Umland Lütte (Belzig)	Hinter-grund Land	12	17
Baiersdorf	**Jüdischer Friedhof**		20	22
2015	Nürnberger Flughafen	Hinter-gund urban	20	22
	Andechs Rothenfeld	Hinter-grund Land	8	12

Tab. 1: Schadstoffkonzentrationen NO_2 und PM10 für verschiedene Umweltsituationen.

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

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

Tab. 2: Niederschlagswerte der Objektorte

Die hier aufgeführten Daten wurden entnommen aus:
Bayerisches Landesamt für Umwelt (2016): Lufthygienischer Jahresbericht 2015.
Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (2016): Luftqualität in Sachsen. Jahresbericht 2015.
Landeshauptstadt Potsdam (2011): Luftreinhalte- und Qualitätsplan für die Landeshauptstadt Potsdam. Fortschreibung 2010 – 2015.
Niederschlagsmengen: Climate-data.org

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

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

- **W-Wert Kapillare Wasseraufnahme**

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

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

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

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

Zum Überblick sind hier Vergleichswerte von Konietzky & Siedel (2015) dargestellt (Tabelle 3).

Porosität Vol %	24,2 Vol % 13,8 Vol % 6,8 Vol %	Modalbestand	Quarz 90 %, Feldspat, Glimmer, Glaukonit. Illit Kaolinit
Rohdichte	2,08 g/cm³	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

Tab. 3: Literaturwerte zu den Eigenschaften von Elbsandstein Typ Cotta. Aus Konietzky & Siedel (2015).

Bei den hydrophobierten Objekten Äolus in Nymphenburg, Rhea Kopie und Hera Kopie ist genauso verfahren worden. Der niedrigste, an den 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 4 bringt einige Vergleichswerte für Schilfsandsteine und verwandte Werksandsteine aus der Literatur. Man erkennt sofort, wie groß die Streubreite ist.

Sandstein	w-Wert kg/m² √h	Literatur
Schleerieth Werksandstein Probenmaterial	7,8	Snethlage (1984)
Maulbronn Schilfsandstein Probenmaterial	4,8	Snethlage (1984)
Schleerieth Werksandstein Schloss Schillingsfürst	1,5 bis 2,0	Snethlage (1996)
Diebach Schilfsandstein Schloss Schillingsfürst	3,2 bis 4,4	Snethlage (1996)
Obernesselbach (?) Schilfsandstein Kloster Birkenfeld	1,6 bis 2,8	Snethlage (1996)
Obernesselbach (?) Schilfsandstein Kloster Birkenfeld	2,8 bis 3,4	Snethlage (1996)

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

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

		P Vol %	W kg/m² $h^{0,5}$
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

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

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

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

Tab. 6: Wasseraufnahme von Marmor allgemein aus Siegesmund & Dürrast (2014).

Carrara Marmor	
Rohdichte g/cm³	2,71
Porosität Vol %	0,46
α hydrisch mm/m	0,08

Tab. 7: Rohdichte, Porosität und Hydrische Dehnung von Carrara Marmor. Aus Siegesmund & Dürrast (2014)

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

Kapillarzug = Schweredruck

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

σ = Grenzflächenspannung Wasser - Kapillaroberfläche
ρ = Dichte des Wassers
g = Erdbeschleunigung

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

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

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

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

Kapillarkraft = Viskoser Widerstand

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

h = Eindringtiefe
r = Kapillarradius
σ = Grenzflächenspannung Wasser - Kapillaroberfläche
θ = Randwinkel
η = Viskosität
u = Umwegfaktor (Zahl für Verbiegungen der Kapillarröhren)

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

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

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

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

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

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

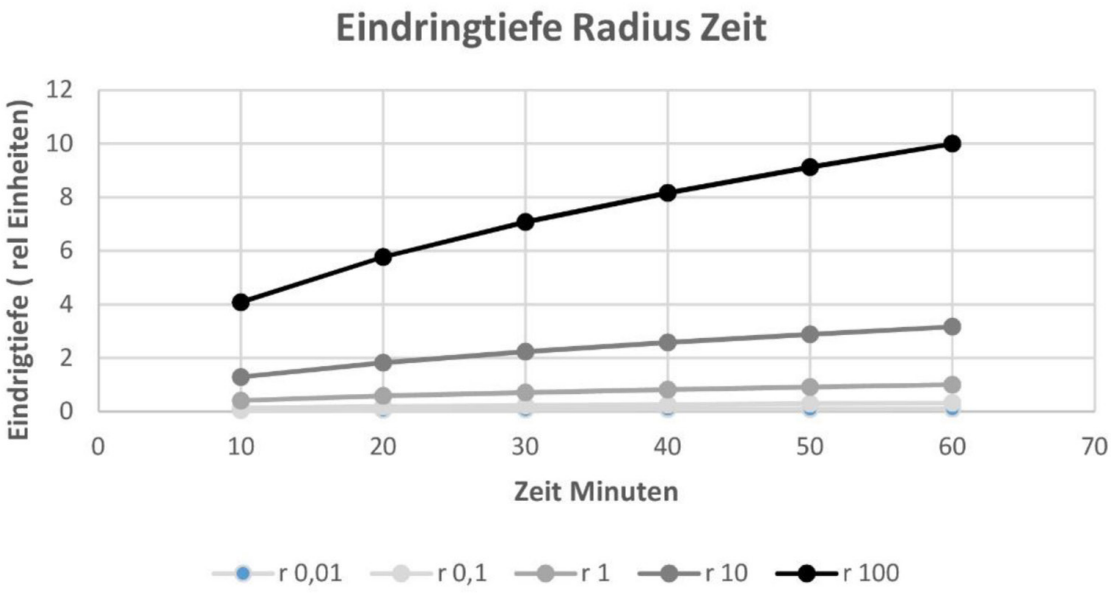

Abb. 2: Eindringtiefe als Funktion von Kapillarradius und Zeit. Radius r = µm.

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

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

Bei gleicher Saugzeit von 1 Stunde ist die Eindringtiefe bei einem Radius von r = 100 µm 10 Mal größer als bei einem Radius r = 1 µm. Der mit Wasser gefüllte Porenraum ist dann ebenfalls 10 Mal so groß.

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

Zu jedem Zeitpunkt nimmt die Eindringtiefe für jeden Porenradienschritt von r = 0,01µm bis r = 100 µm um den Faktor 3,3 zu, so dass die obige Aussage

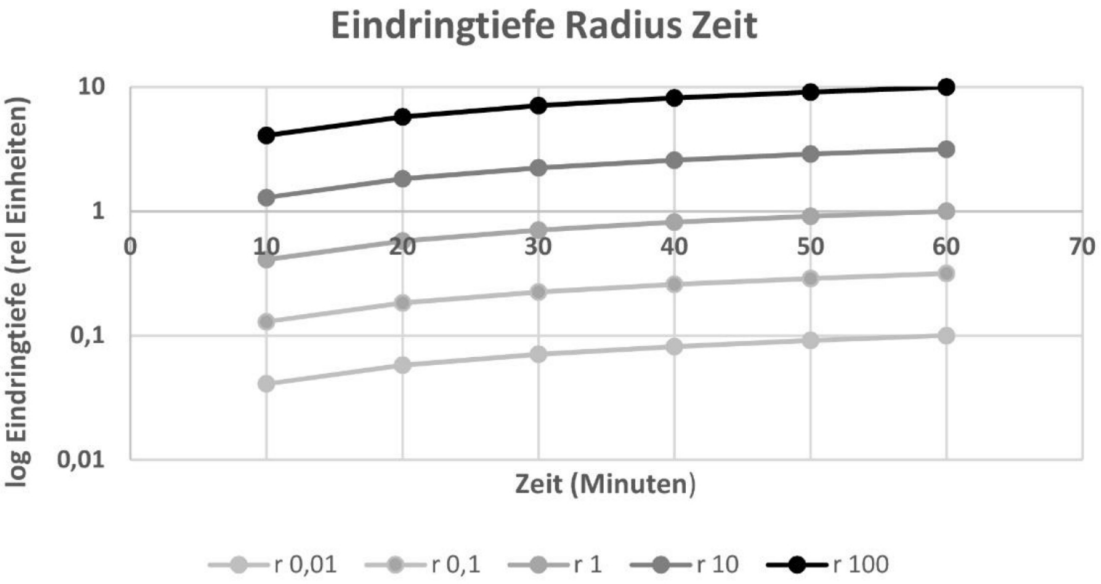

Abb. 3: Die Beziehungen Eindringtiefe, Porenradien und Saugzeit in logarithmischer Darstellung.

„Anstieg der Eindringtiefe bei r = 1 µm bis r = 100 µm 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 √t- Gesetz. Trägt man die Wasseraufnahme pro Flächeneinheit gegen √t (Wurzel aus der Zeit) auf, resultiert eine gerade Linie. Die Steigung dieser Linie ist als W-Wert definiert:

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

In bestimmten Fällen, zum Beispiel wenn auf Grund einer Hydrophobierung nur eine dünne Oberflächenzone kapillar für Wasser zugänglich ist, stellt sich die Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Zeit als eine lineare Gerade dar. Für dieses Wasseraufnahmeverhalten kann man aber kein Ω(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 Ω(o) der Einfachheit halber die Wasseraufnahme zugrunde gelegt, die bei einem W-Wert von 0,1 kg/m² * √t in 1 Stunde erreicht wird, nämlich 0,1 l/m². Graphisch stellt sich die Festlegung folgendermaßen dar (s. Abb. 4):
Als Beispiel dient das Grabmal Ehrenbacher auf dem Jüdischen Friedhof in Baiersdorf. Hier zeigt die Wasseraufnahme ein lineares Verhalten in Abhängigkeit von der Zeit gemäß dem Ω-Wert. Die schwarze, schräge Linie entspricht der Aufnahmemenge 0,1 Liter nach 1 Stunde. Sie stellt den Bezugspunkt für Ω(o) dar. Die aktuellen Ω(i) Werte für das Grabmal Ehrenbacher betragen 0,75, 0,65 und 0,38 l/m².

- **Thermische Dehnung**

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

Carrara	x	y	z	mean	Anisotropy
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 %

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

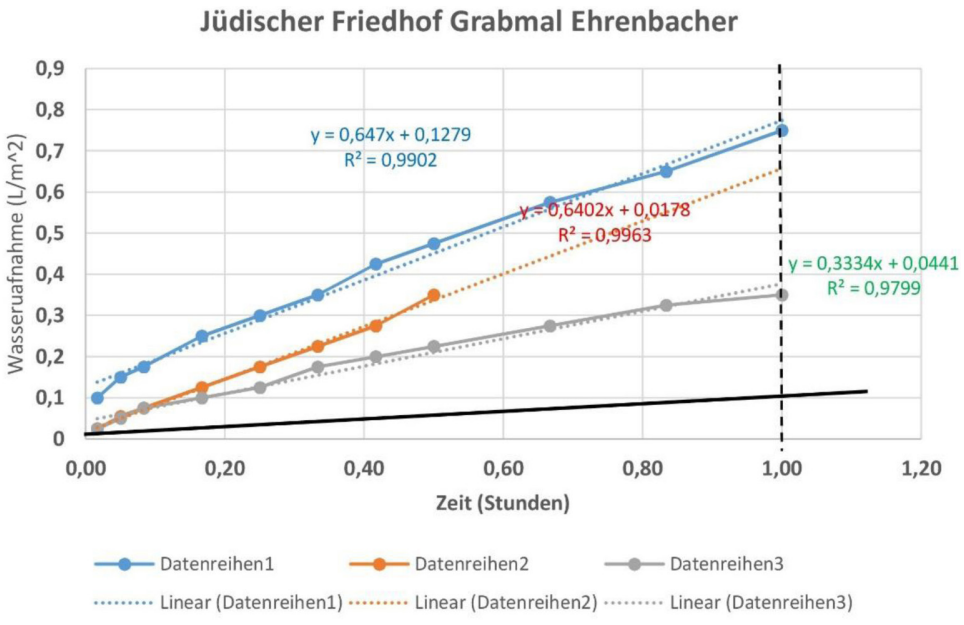

Abb. 4: Beispiel für den Omega Wert und dessen Definition.

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

Tab. 9: Thermische Dehnung von Carrara Marmorproben vor und nach künstlicher Alterung. Aus Weiss (1999).

Datenblatt 7: Gefahr durch Menschen Vandalismus R(V)

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

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

Datenblatt 8: Mechanische Schäden Materialverlust R(M)

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

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

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

Datenblatt 9: Veränderungen der Oberfläche R(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.

Ablagerungen / Farbveränderungen	Ablagerungen
	schwarze Krusten
	Versinterungen
	Verfärbungen, Rostflecken
	Ausblühungen
Materialverlust durch chemische und 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

Tab. 10: Schadensphänomene gemäß Icomos Iscs Glossar.

- **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 5 zeigt eine Stelle originaler Oberflächenbeschaffenheit beim Kronos im Schlosspark Nymphenburg.

Abb. 5: 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 6).

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

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

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

Im Test mit 10 Probanden (Damjanovic 2013) stellte sich heraus, dass die gröber abgestuften Schleifpapiere besser zugeordnet werden konnten als fein abgestufte. Sehr feine Körnungen konnten nicht mehr unterschieden werden. Für die praktische Anwendung ist deshalb auf eine zu enge Abstufung verzichtet worden. Ebenso wichtig ist es, sich auf entweder Trocken- oder Nassschleifpapier eines einzigen Herstellers festzulegen. Die im Projekt Risikoziffer verwendete Einteilung erfolgt in 200er Schritten der P-Zahl:
P > 700
P 700 – P 500
P 500 – P 300
P 300 – P 100
P<100
Es muss bedacht werden, dass die hohen Zahlen nicht größere Rauheit, sondern größere Feinheit bedeuten und umgekehrt, Rauheiten < 100 sich sehr rau anfühlen.

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

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

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

Mit Hilfe der durch Fühlen ermittelten P-Zahlen lassen sich dann die Bereiche unterschiedlicher Rauheit auf einer Marmorskulptur kartieren. Da die maximal erreichbare Rauheit der Korngröße der Calcitkristalle entspricht, sollte bei einem Carrara Marmor die unterste P-Zahl im Bereich P150 bis P100 liegen. Bei der Erstbegutachtung kann nur der Ist-Zustand festgestellt werden. Wie sich die Rauheit mit der Zeit verändert, kann erst durch Nachmessungen im Laufe eines Monitoring Programms ermittelt werden.

- **Rückwitterung an Ecken und Kanten. Konturverlust**

Durch selektive Rückwitterung entsteht auf der Fläche ein Relief, das im Glossar von Icomos Iscs (2010) als Erosion bezeichnet wird. Kanten und Ecken runden sich; scharfkantige Konturen verschwinden. Im fortgeschrittenen Zustand sind Ornamente oder Schriften nicht mehr zu erkennen.

Abb. 7: Konturverlust an Kybele. Schlosspark Nymphenburg.

Snethlage (2011) hat auf der Grundlage geometrischer Beziehungen festgestellt, dass der Materialabtrag an einer Kante 2 mal so hoch, an einer vorspringenden Ecke 3 mal so hoch ist wie auf der ebenen, dem Regen ausgesetzten Fläche. Neueste Messungen im Jahr 2000 ergaben für Carrara Marmor am Standort München eine Abtragsrate von 8,4 µm/a auf ebenen Flächen. An Kanten beträgt demnach die Rückwitterung 17, an Ecken 25 µm/a. Noch im Jahr 1996 ermittelten Simon & Snethlage (1996) Rückwitterungsraten von 14 – 25 µm/a auf der Fläche, bei Ecken und Kanten demnach bis zu 50 bzw. 75 µm/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 µm für Fläche, Kante und Ecke, für den ungünstigeren Fall der 1990er Jahre bis zu 2500, 5000 und 7500 µm. Diese Zahlenwerte verdeutlichen, dass in relativ überschaubaren Zeiträumen

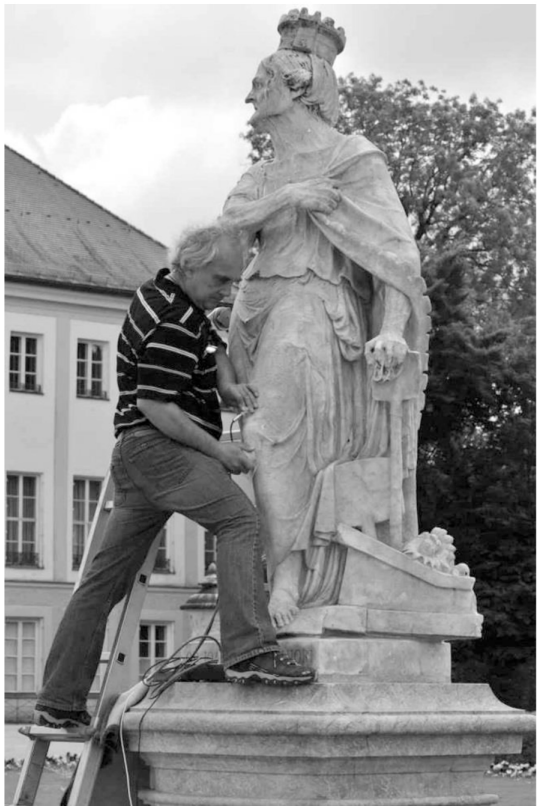

Abb. 8: Ludwig Sattler bei Ultraschallmessungen 2012 an der Figur Kybele im Schlosspark Nymphenburg.

die Präzision und Detailschärfe einer Figur schwerste Schäden erleiden kann.

- **Prognose der Rückwitterung**

Wie oben ausgeführt, finden sich in der Fachliteratur Angaben zu Materialverlust und Rückwitterungsraten von Marmor. Hervorzuheben sind Lipfert (1989), 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)	4 – 34 µm/a
NAPAP (Baedecker 1990)	15 – 30 µm/a
Simon & Snethlage (1996)	14 – 25 µm/a
Snethlage & Kocher (2002)	1 – 8 µm/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 µm/Jahr zu Grunde, dann weicht eine Kante mit einer Rate von 20 µm/Jahr zurück, eine Ecke mit 30 µm/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 8 einer Messung an der Kybele im Schlosspark Nymphenburg.

Allgemein zu den Ultraschallmessungen und zur besonderen Bedeutung der Messgenauigkeit führt Krompholz (2017) aus:

„...die Ultraschallmessung stellt die einzige Möglichkeit dar, innerhalb der verschiedenen Untersuchungen den inneren Zustand einer Skulptur zu bewerten.

Die in den vergangen 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 (Vp=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 (Vp=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 Vp = 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 mes senden 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 Ermitt lung 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 µs ergibt sich eine Vp von 2203 m/s.
Bei einer abweichenden Laufzeit von 2 µs auf 47,4 µ/s beträgt Vp nur 2110 m/s.
Mit einer abweichenden Messstrecke von 5 mm = 9,5 cm beträgt Vp 2092 m/s.
Treten beide Fehler gleichzeitig auf, sinkt Vp auf scheinbar 2004 m/s = 9 % Messfehler!
Ich möchte mit diesen Ausführungen auf keinen Fall die Handhabung des Verfahrens verkomplizieren, es ist aber leider eine Tatsache, dass bei nicht regelmäßig ausgeführten Arbeiten der Mensch ab und an etwas vergisst. Häufig sind dies bei US-Messungen gerade die Kleinigkeiten, die die Messgenauigkeit betreffen bzw. beeinflussen. Ich erlaube mir deshalb, eine Kurzinformation zur gültigen Norm sowie zu typischen Messfehlern beizufügen, die dem Anwender auf einer Seite komprimiert ein Vermeiden dieser häufigsten Fehlerquellen ermöglichen sollte. Darüber hinaus befinden sich auf unserer Homepage weitere zum Thema passende Dokumente ."

Dass die Messgenauigkeit besonders bei Sandstein von entscheidender Bedeutung ist, zeigt folgende Tabelle:

	Vp km/s frisch	Vp km/s 25 FTW
Sander Schilfsandstein	2,2 – 2,4	1,6 – 2,0
Wüstenzeller Sandstein	2,3 – 2,8	2,5 – 3,0
Regensburger Grünsandstein	2,5 – 3,0	1,6 – 2,7

Tab. 12: Ultraschallgeschwindigkeit vp ausgewählter Sandsteine im frischen Zustand und nach 25 Frost-Tau-Wechseln (Bourges 2006)

Zwischen frisch und künstlich verwittert betragen die Unterschiede in vp 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 vp vom verwitterten Objekt höher liegen als die an frischen Gesteinsproben ermittelten vp(o). Die Berechnung der Risikoziffer lässt sich in solchen Fällen nicht durchführen, weil negative Werte auftreten würden. Es stellt sich die Frage, ob Literaturwerte, gemessen an gleichen, aber nicht an Bruchidentischen Sandsteinen überhaupt als Bezugsgrößen dienlich sind, weil die Zuordnung in gewisser Weise willkürlich erscheint. Die Ableitung eines Verwitterungsfortschritts erscheint auf jeden Fall besser begründet, wenn man im System des individuellen Skulpturgesteins bleibt.

Das Ergebnis, warum die Ultraschallgeschwindigkeiten an den verwitterten Objekten höher sind als die an frischen Gesteinen gemessenen Literaturwerte, ist nicht ohne weiteres zu erklären. Es scheint aber wohl so zu sein, dass unsere Kenntnisse der Ultraschallgeschwindigkeiten für Sandsteine allgemein und für Cotta und Schilfsandsteine speziell noch zu begrenzt sind, weil die Varietäten mit den hohen Ultraschallgeschwindigkeiten wahrscheinlich noch nicht beprobt und gemessen wurden. Sie mögen aus Steinbrüchen kommen, die heute nicht mehr bekannt oder in Abbau sind. Die Streubreiten innerhalb dieser Varietäten dürften deshalb wesentlich größer sein als bisher angenommen. Somit taugen die Literaturwerte nicht als Bezugshorizont für diese Objekte. Generell findet sich auch bestätigt, dass die Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit bei Sandsteinen bei weitem nicht so ausgeprägt ist wie bei Marmor.

Erfahrungswerte von Köhler (2017 mündliche Mitteilung) besagen, dass bei Sandsteinen im Lauf der Zeit eine Verminderung der Ultraschallgeschwindigkeit um rund 10 % eintritt. Zur Berechnung wird deshalb der maximale Objektwert vp(i max) um 10 % erhöht und als vp(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 vp(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 vp(min) = 0 km/s sei, kommt man zu unrealistisch kleinen Risikoziffern, weil durch den Divisor 6 = vp(max) (6 km/s) - vp(min) (0 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 = vp(max) – vp(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 gezeigt werden, dass diese Methode nicht zu einer Erhöhung der Gesamtrisikoziffer führt sondern zu einer Verkleinerung, weil der Divisor um 1 zunimmt, der Zähler aber nur um eine Zahl < 1 wächst.

Einfache Gewichtung: $R(ges) = \Sigma R(i) / n(i)$

Doppelte Gewichtung eines Parameters:
$R(ges) = \Sigma R(i) / n(i) + R(x) / 1 = \Sigma R(i) + R(X) / n(i) + 1$

Das Ergebnis wird also nicht im Sinne der Übereinstimmung zwischen Eindruck und Berechnung "verbessert". Der Grund liegt in der Bildung des Mittelwertes. Wird ein Parameter zwei Mal gewichtet, dann muss auch die Anzahl n um eins erhöht werden. Wäre die Skala nach oben hin offen, würden doppelte oder mehrfache Gewichtungen zu höheren Werten, d. h. zu scheinbar höheren Risiken führen. Die Skala wäre dann aber nach oben hin offen und man könnte keine Aussage darüber treffen, wir 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 werden. Dazu wird die Gesamt Risikoziffer R(ges) des Objekts mit dessen kunstwissenschaftlichen Bewertungsziffer B(KB) multipliziert. Mit dieser Prozedur wird eine Rangfolge bestimmt, welches Objekt in einer Sammlung in Anbetracht seiner Gefährdung und kunstwissenschaftlichen Bedeutung zuerst behandelt werden müsste.

- **Signifikanz der Risikoziffer**

Welchen Wert die Risikoziffer eines Objekts auch immer haben möge, es stellt sich die Frage, wie groß die zahlenmäßige Änderung sein muss, um daraus den gerechtfertigten Schluss auf eine größere oder mindere Gefährdung ziehen zu können. Die Gesamtrisikoziffer R(ges) wird berechnet gemäß

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

R(i) = hier Risikoziffer eines Datenblattes, z. B. R(Umwelt)

Im Normalfall beträgt n = 7 (= Anzahl der Datenblätter), so dass

$$R(ges) = \Sigma R(i) / 7$$

Verändert sich ein R(i) um 0,5, so resultiert

$$R(ges) = (\Sigma R(i) + 0{,}5) / 7 = \Sigma R(i) / 7 + 0{,}5 / 7 = R(ges) + 0{,}07.$$

Der kleinen Änderung von 0,07 der Gesamtrisikoziffer R(ges) steht eine große Änderung von 0,5 einer einzelnen Risikoziffer R(i) gegenüber. Kleinste Unterschiede in der Gesamtrisikoziffer R(ges) können bedeutende Risiken in Einzeldatenblättern oder Einzelparametern anzeigen. Allerdings kann eine Änderung um 0,5 auch durch kleine Änderungen der Risikoziffern bei mehreren Datenblättern verursacht werden. Das bedeutet, dass bei der Risikobewertung den Zahlenunterschieden durch Interpretation der Datenblätter nachgegangen werden muss.

Eine weitere Frage stellt sich nach der Qualität der Auswertung. Basiert die Berechnung der Risikoziffer nur auf wenigen Messwerten, so ist die Aussagekraft naturgemäß weniger gut als wenn sie auf vielen Parametern beruht. Es gibt jedoch keine feste Vorschrift, welche Parameter immer ausgefüllt werden müssen. Vielmehr werden bei jeder Auswertung immer mehrere Parameter nicht berücksichtigt, weil sie entweder nicht zutreffend oder nicht verfügbar sind. Diese werden im Rechenprozess jedoch genauso mit Null

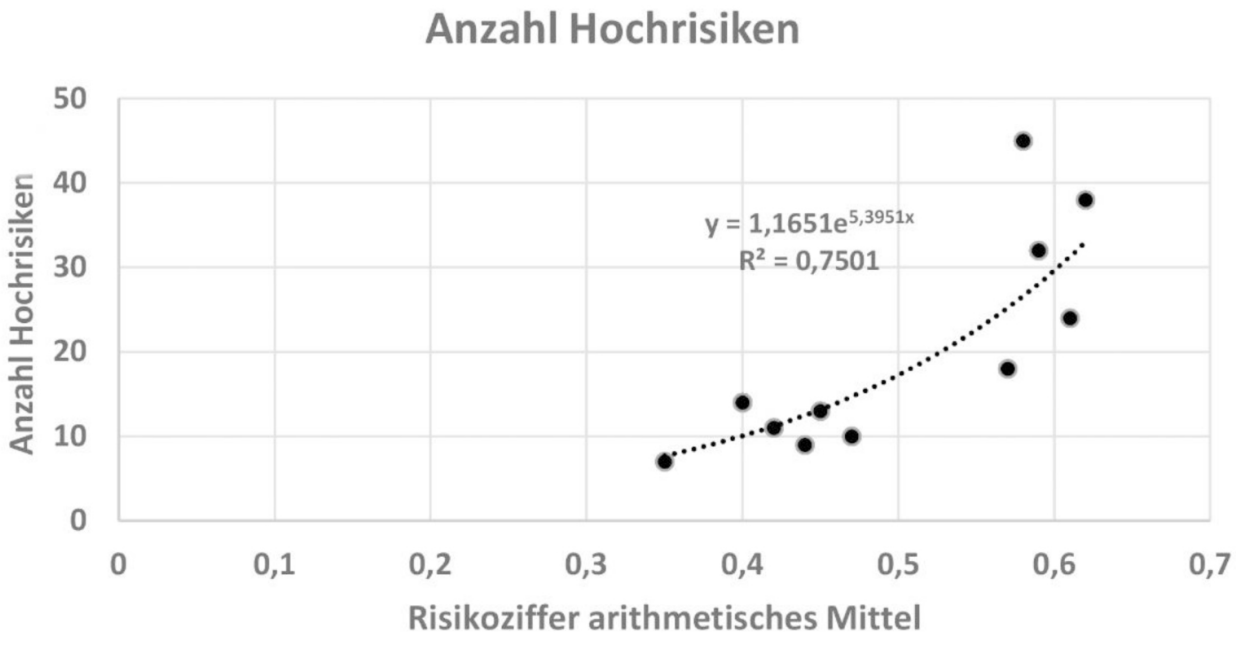

Abb. 9 Anzahl der Hochrisiken.

bewertet wie Parameter, deren Messwert Null beträgt. Eine fixe Vorschrift ist aus diesem Grund nicht möglich. Stattdessen kann aber verlangt werden, dass für eine aussagekräftige Risikoziffer in allen Datenblättern Eintragungen getätigt wurden.

- **Korrelation der Risikoziffer mit Datenblättern**

Konzeptionell wäre zu erwarten, dass die Risikoziffer mit Parametern wie Umwelt, Natursteineigenschaften, Materialverlust, Veränderungen der Oberfläche und Ultraschall korrelieren sollte. In dieser Hinsicht sind Versuche gemacht worden, Korrelationen mit einem oder mehreren Parametern festzustellen, die jedoch in keinem Fall erfolgreich verliefen. Am besten ist noch eine Korrelation mit der Anzahl der Hochrisiken nachweisbar. Die betreffende Graphik ist in der Abbildung 9 gezeigt.

Man erkennt einen exponentiellen Anstieg zu höheren Risikoziffern, was in gewisser Hinsicht auf eine Gesetzmäßigkeit hinweisen könnte. Die höchste Anzahl an Hochrisiken ist der Marmorskulptur Vestalin zugeordnet, wobei 25 Hochrisiken an dieser Figur aber allein auf niedrige Ultraschallwerte zurückgehen. Die nächsthöheren Hochrisiken betreffen die stark beschädigten Originalfiguren von Hera und Kybele im Depot des Schlossgartens Großsedlitz. Diese Beschädigungen gehen aber auf Einschläge von Granatsplittern bei Kämpfen im Zweiten Weltkrieg zurück und nicht auf Folgen natürlicher Verwitterung. Es ist demnach nicht gerechtfertigt, aus dieser Graphik eine allgemeine Gesetzmäßigkeit herauszulesen.

Literaturverzeichnis

Baedecker Pa Et Al (1990): Effects of Acidic Deposition on Carbonate Stone. NPAP Report 19, Section 3, Washington DC. 414 pp.

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

Damjanovic Sandra (2013): Sehen, fühlen, Messen. Erprobung der Profilemssmethode zur Einschätzung der Kantenabwitterung und der Burteilung 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 Denkmalen 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 Sandsteindenkmalen 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. Dis-

sertation Fakultät Mathematik Naturwissenschaften Universität Göttingen

Siegesmund 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, Rasolofosaon Pnj, Siegesmund 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