

Erhaltung von Marmorskulpturen unter mitteleuropäischen Umweltbedingungen



Beobachtungen und Zustandsbewertungen zur Marmorverwitterung und Konservierung im Rahmen des Monitoringprogramms in Berlin

THOMAS SCHUBERT & WANJA WEDEKIND

Die Blütezeit des Kulturschaffens in Berlin fällt in die Epoche des Klassizismus. In Berlin dominieren zwei Materialien die Skulpturen und Denkmale des 19. Jahrhunderts: Metall, in erster Linie Bronze, und Marmor. Marmor gilt im Allgemeinen als das edelste der Bausteine, kein Wunder also, dass sich auch die Bildhauer über alle Jahrtausende menschlichen Kulturschaffens dieses Materials bedienten. Aus seiner feinen, kristallinen Struktur lassen sich hervorragende plastische Werke gestalten.

1. Denkmal versus Pflege

Die Diskussion um die kontinuierliche Pflege von Denkmälern als Grundvoraussetzung für ihre Erhaltung ist so alt wie die Denkmalpflege selbst und wird auch in der Charta von Venedig, die in diesem Jahr ihr 40jähriges Jubiläum feiert, festgeschrieben. Tatsächlich wurden jedoch nur selten tragfähige Modelle entwickelt, die eine kontinuierliche Pflege ermöglichen, denn der traditionellen Inventarisierung als ein Grundpfeiler der institutionalisierten Denkmalpflege fehlt in der Regel eine Erfassung des Erhaltungszustandes im Sinne einer konservatorischen Bestandsaufnahme. Letztere schafft jedoch erst die Grundlage, um gezielt eingreifen zu können und Schaden vom Denkmal abzuwenden.

Konkrete Konzepte und Modelle für Pflege- und Wartungsprogramme werden seit rund 10 Jahren verstärkt in der Denkmalpflege diskutiert, sowohl für weitläufige archäologische Parks als auch für Denkmale desselben Typs wie die Grabmonumente historischer Friedhöfe oder die Standbilder im historischen Zentrum von Berlin (WEDEKIND 2005, WEDEKIND ET AL. 2013, RIEFFEL 2009 a & b).

Als Folge dieser Debatte wird seit 2010 auf Initiative des Berliner Denkmalamtes ein ambitioniertes Pflege- und Wartungsprogramm an zahlreichen Skulpturen aus Metall und Stein durchgeführt. Die notwendigen Vorarbeiten umfassen die Dokumentation der Restaurierungsgeschichte und eine Kartierung des Erhaltungszustandes. Auf Grundlage der Kartierungen und einer Checkliste werden die jährlichen Inspektionen durchgeführt. Zu den Pflegemaßnahmen zählen die zweijährig angesetzten Reinigungen und die Erneuerung des Anti-Graffiti-Schutzes.

Als die zuständigen Restauratoren für die Skulpturen aus Marmor sind wir für den Zeitraum von 2013 bis 2016 damit beauftragt, die Pflege und Wartung an 17 Denkmälern mit 35 Einzelskulpturen durchzuführen. Die Arbeit erlaubt uns, durch intensive Beobachtungen mögliche Veränderungen an den Denkmälern nachzuvollziehen und mit weiteren Beobachtungen an Denkmälern aus Marmor, die wir in den letzten Jahren machen konnten, vergleichend zu diskutieren. Monitoringprogramme haben hierbei den Charakter einer Langzeitstudie.

1.1. Objektzustände

Im Fall von Kunstdenkmälern aus Marmor können wir grundsätzlich vier Objektsituationen unterscheiden:

1. unbehandelte, ungeschädigte Objekte
2. unbehandelte, geschädigte Objekte
3. behandelte, konservierte Objekte
4. behandelte, geschädigte Objekte

Die Frage ist, weshalb bestimmte Objekte unter bestimmten Bedingungen verwittern bzw. eine hohe Verwitterungsresistenz aufweisen und welche Konservierungsmaßnahmen in der Lage sind, die Erhaltung der Objekte langfristig zu gewährleisten. Zur Festigung von Objekten aus Marmor wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl von Materialien eingesetzt. Für die prominenten Marmorskulpturen im historischen Zentrum von Berlin ist nach Recherchen des Denkmalamtes belegt, dass so gut wie jedes Mittel, das zeitabhängig vorgab, Erfolg zu versprechen, an den Objekten zur Anwendung kam. Seit den 1980er Jahren werden Restaurierungsmaßnahmen zunehmend dokumentiert. Seit dieser Zeit sind an den Marmordenkmälern in erster Linie Silicon- und Acrylharze zur Festigung eingesetzt worden.

Zu den Skulpturen, die bis heute unbehandelt geblieben und deren Zustand als weitgehend ungeschädigt zu bezeichnen sind, gehören in erster Linie diejenigen, die vor direkter Bewitterung geschützt sind. Selbst bei neu geschaffenen Skulpturen aus Marmor oder Ergänzungen setzt bei freier Bewitterung verhältnismäßig schnell eine sogenannte Initialverwitterung ein, die durch eine deutlichen Abnahme der Laufzeiten der Ultraschallwerte ablesbar ist (RÜDRICH 2003, WEDEKIND ET AL. 2014).

Geschädigte und unbehandelte Marmorobjekte sind meist der freien Bewitterung ausgesetzt oder werden zumindest zeitweise von der Sonne beschienen.

Der Zustand behandelte, konservierter Objekte kann in der Regel nur in den ersten Jahren nach einer konservatorischen Maßnahme als stabil bezeichnet werden. Im Fall konventioneller Restaurierungsmethoden setzt hiernach erneut ein deutlich sichtbares Fortschreiten der Verwitterung ein. Im Fall einer Acrylharzvolltränkung (AVT) bleibt die Objektoberfläche in der Regel stabil. Bei einer Überprüfung von Skulpturen sieben Jahre nach der Tränkung konnte noch keine nennenswerte Reduzierung des Festigungserfolges konstatiert werden (SNETHLAGE ET AL. 1999), jedoch muss von einer Abnahme des erzielten Festigkeitsanstieges um etwa 8% nach einem Zeitraum von 10 Jahren ausgegangen werden (PAMPLONA & SIMON 2012).

Als behandelte, aber geschädigte Objekte müssen die Mehrzahl der Objekte bezeichnet werden, an denen in den letzten Jahrzehnten konventionelle konservatorische Maßnahmen durchgeführt wurden.

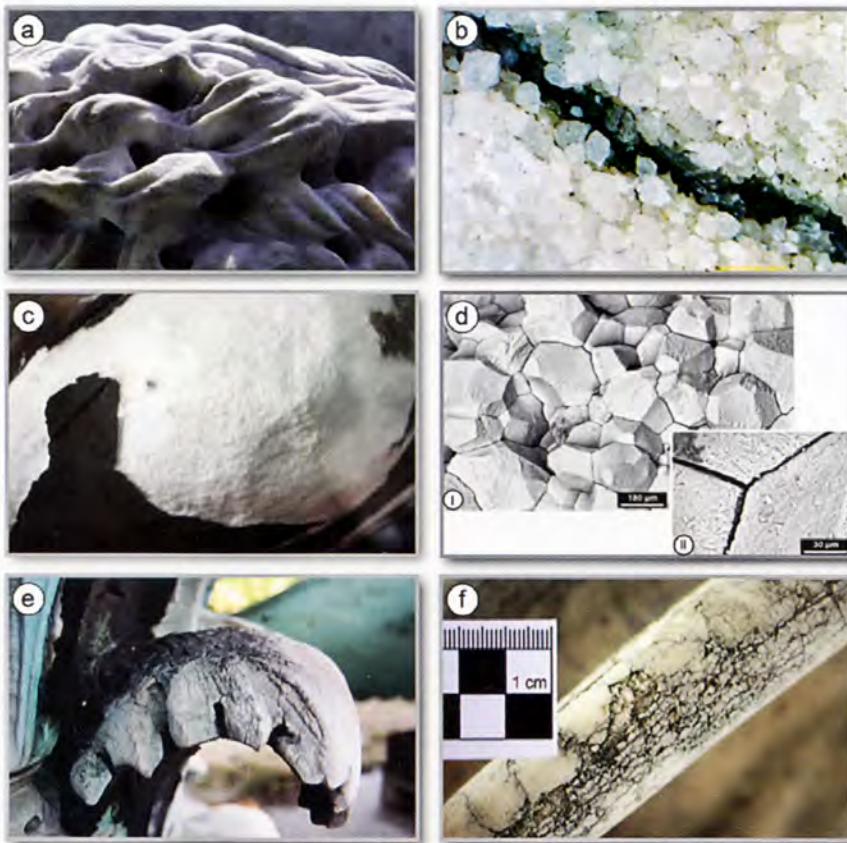


Abb. 1: a) Abzuckern der Objektoberfläche, das Lösen der einzelnen Kristalle wird an den Spinnenweben deutlich und spricht für einen aktiven Verwitterungsprozess (Marmordenkmal für Friedrich II. im Schlosspark von Neuhardenberg/Brandenburg). b) feiner Riss mit deutlich losen Einzelkristallen bei 200facher Vergrößerung (Artemis-Skulptur, Schloss Tegel/Berlin). c) Unter der dichten Oberflächenkruste wird eine strukturelle Entfestigung durch Verzuckerung offenkundig (Überreste der Knöchelspieler-Skulptur, Potsdam/Brandenburg) d) Risswachstum an den Kristallgrenzen im Rasterelektronenmikroskop, I bei 180 μm und II bei 30 μm (Quelle: Jörg Rüdrieh 2013). e) Krakelee-Bildung durch Bindemittelverlust an einem Akantusblatt des Kapitells der Friedenssäule (Berlin) und f) Krakelee-Bildung aufgrund der Überfestigung der Oberfläche an einer Figurengruppe der Schlossbrücke.

1.2. Verwitterung und Verwitterungsformen

Marmore, die der Witterung ausgesetzt sind, erfahren durch physikalische, chemische und biologische Prozesse eine Gefügeauflockerung, die im Laufe der Zeit zur Zerstörung des Gesteins führen können. Alle drei und hierbei insbesondere der physikalische und chemische Angriff auf die Substanz können zu Wechselwirkungen führen, die die Verwitterungsdynamik stark beschleunigen können. Als gesteinstypische Verwitterungsform für Marmor tritt in erster Linie eine flächige Rückwitterung der Oberfläche auf. Diese ist zumeist auf chemische Verwitterungsprozesse zurückzuführen, wobei sich einzelne Kristallkörner aus der betroffenen Fläche lösen und quasi abzuckern können (Abb. 1a). Eine strukturelle Entfestigung eines Objektes aus Marmor kann durch Aufbrechen der Korngrenzen der Calcitkristalle auftreten.

Die Hauptminerale des kristallinen Marmors (Calcit und Dolomit) besitzen eine vergleichbar hohe thermische Ausdehnung und eine ausgeprägte Richtungsabhängigkeit. Bereits 1829 konnte Destigny eine Ausdehnung von Carrara-Marmor von 0,848mm/m bei 80°C feststellen. Dies kann bei entsprechenden klimatischen Verhältnissen ausschlaggebend für eine Entfestigung der Gesteinskomponenten und somit eine Gefügeauflockerung sein (GRIMM 1984, GRIMM & SCHWARZ 1985). Im Gegensatz zu vielen anderen Gesteinen, die im Wesentlichen eine Gefügeauflockerung in oberflächennahen Bereichen aufweisen, können Marmore auch eine gesteinsdurchdringende Schädigung entwickeln. Hierbei spricht man von einer sogenannten Kernverwitterung (Abb. 1c). Der Entfestigungsprozess, der sich mikroskopisch als Risswachstum an Korngrenzen und/oder kristallinternen Schwachstellen beschreiben lässt, ist zumindest im Initialstadium thermisch bedingt (Abb. 1d).

Viele Verwitterungsformen, wie Lösungserscheinungen oder Krustenbildungen treten nur oberflächlich auf (KOCH 2005). Dies konnte auch durch die aktuellen Forschungsergebnisse im Rahmen des DBU-Projektes an der Schlossbrücke und eine Diplomarbeit an der FH Potsdam bestätigt werden (RÜDRICH ET AL. 2013, NÄGL, 2008). Die Form und das Ausmaß der Verwitterung sind dabei neben der Exposition und den umweltbedingten Einflüssen wesentlich vom Gestein selbst abhängig. Die Prozesse, die zur Deformation (Expansion, Verbiegung) von Marmor führen, sind struktureller Natur. Sie werden durch von außen einwirkende (extrinsische) Einflussparameter wie Temperaturwechsel (Tag-Nacht-Zyklen) und Feuchtigkeit ausgelöst (KOCH 2005). Letzterer nimmt eine Schlüsselrolle ein, die in Forschungsarbeiten der letzten Dekade das Verständnis zur Marmorverwitterung erweitern konnte (GRELK ET AL. 2004, KOCH & SIEGSMUND 2004). Ist das Gefüge erst einmal geschädigt, erhöht sich mit fortschreitender Rissausbreitung die Porosität und bedingt dadurch eine verstärkte Einwirkung von eindringender Feuchtigkeit (FRANZIMI 1995, WIDHALM ET AL. 1996). Resultierend können weitere Verwitterungsmechanismen, wie chemische Lösung, Frostsprengung und auch hygrische Dehnungsvorgänge initialisiert werden (s. Diskussion IN POSCHLOD 1989, GORALCZYK ET AL. 1988, KÖHLER 1991). Insbesondere CO₂- und SO₂-belastete Luft führt in Verbindung mit Wasser durch Calcitauflösung zu weiterer Schädigung. Eine Krakeleebildung kann ähnlich der Karstverwitterung an stark verwitterten Marmoroberflächen durch den Verlust von Bindemittel im Rahmen chemischer Verwitterung entstehen. (Abb. 1e). Auf den Skulpturen des Monitoringprogrammes sind entsprechende Krakelees jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit auf eine Festigung bzw. Überfestigung, also eine übermäßige Zufuhr von Material zurückzuführen (Abb. 1f).

Abb. 2: Methoden zur Zustandsermittlung im Rahmen der konservatorischen Bestandserfassung; a) die Kartierung, b) die Ultraschall-Diagnostik, c) Messungen der Wasseraufnahme mit dem Karstenschen Prüfröhrchen und d) Messung der Oberflächenhärte.



Wesentlich seltener ist eine Schalenbildung anzutreffen. Diese kann in Einzelfällen auf die Einwirkung von Feuchte, Salz und Frost zurückgeführt werden.

1.3. Zustandsbewertung

Die Ausbildung der Verwitterungsform ist in Hinblick auf konservatorische Maßnahmen von zentraler Bedeutung. Die unterschiedlichen Untersuchungsmethoden sollten deshalb mit dem Ziel eingesetzt werden, möglichst genaue Aussagen über die Beschaffenheit der unterschiedlichen Objektzustände zu gewährleisten, dem man sich über eine Kombination unterschiedlicher Methoden annähern kann.

Methoden und Messgeräte

Instrumente der Beobachtung sind die fotografische Dokumentation, die digitale Mikroskopie und die Kartierung sowie deren quantitative Auswertung. Bei einer quantitativen Ermittlung der einzelnen Zustandsphänomene kann die Kartierung auch als ein Messinstrument eingesetzt werden. Weitere Erkenntnisse können mit Messverfahren der angewandten Konservierungswissenschaften, wie die Wasseraufnahme nach Karsten, die Ultraschallanalytik und Oberflächenhärtemessungen gewonnen werden (Abb. 2).

Die quantitative Kartierung wurde mit der Software meti-gomap der Focus GmbH Leipzig durchgeführt. Für die Messungen der Ultraschallgeschwindigkeiten kamen zwei unterschiedliche Signalgeber zum Einsatz. Dabei wurden die Skulpturen mit einem 250 kHz Kompressionswellenschwinger über eine Flächenankopplung durchschallt. Für die Postamente wurde ein 48 kHz-System, ebenfalls Flächenankopplung, gewählt. Als Impulsgeber kam das System USG 30 der Firma Geotron zur Anwendung. Für die Oberflächenhärtemessungen wurde ein equotip 3 Gerät der Firma Proceq eingesetzt. Das Gerät zeichnet sich durch eine hohe Messgenauigkeit ± 4 HL (0,5 % bei 800 HL) aus und verfügt über eine automatische Schlagrichtungskorrektur. Zur Anwendung kam ein Rückprallhärte-Schlaggerät mit dem Härtegrad D. Die Equotip Rückprallhärteprüfung ähnelt der Rückprallhärtemessungen mit dem Schmidt-Hammer. Letzterer wurde in erster Linie für die Ermittlung der Betonhärte entwickelt. Das Equotip Gerät ist wesentlich kleiner dimensio-

niert und seine Schlagenergie geringer eingestellt. Das eigentliche Schlaggerät ist nicht viel größer als ein Kugelschreiber (Abb. 2d).

An Einzelbeispielen und weiterführenden Detailbeobachtungen soll im Folgenden auf die Verwitterungsformen und eingesetzten Materialien eingegangen werden. Hierbei handelt es sich um die beiden Generäle Bülow und Schadow (Unter den Linden/Berlin), die Skulpturen der Gebrüder von Humboldt (Humboldt-Universität) und am Rande die Schlossbrückenfiguren sowie das Helmholz- und Komponisten-Denkmal.

2. Die Marmorskulpturen Unter den Linden

2.1. Standbilder Bülow und Scharnhorst

Die Skulpturen der Generäle Bülow und Scharnhorst gelten als das Hauptwerk des Bildhauers Christian Daniel Rauch (1777-1857). Sie wurden 1822 nach Plänen Karl-Friedrich Schinkels (1781-1841) links und rechts der Neuen Wache postiert. Die beiden Skulpturen erlebten im 20sten Jahrhundert eine wahrlich bewegte Geschichte, überlebten den zweiten Weltkrieg hinter Schutzwällen am Aufstellungsort und wurden danach eingelagert. In den 1970er Jahren wurde die Scharnhorst-Skulptur nach einer umfangreichen Restaurierung gegenüber der Neuen Wache aufgestellt, erst 2002 kam auch die Skulptur Bülow dazu.

Beide Skulpturen erlebten eine umfangreiche Restaurierungsgeschichte. Mindestens drei Restaurierungen sind seit den 1960er Jahren dokumentiert (BIELEFELD, SÜSS 2010). In Folge eines Farbanschlages im Jahr 2005 wurden unsachgemäße Reinigungsarbeiten mittels Hochdruck durchgeführt, die zu erheblichen Schäden an den Skulpturen führten. Zum Abschluss der letzten Restaurierungsarbeiten 2006 fanden Ultraschalluntersuchungen an beiden Skulpturen statt, die 2013 mit demselben Gerät an denselben Messpunkten wiederholt wurden (WEDEKIND ET AL. 2014). Im Rahmen der letzten Messung wurden außerdem Wasseraufnahmetests nach Karsten und Oberflächenhärtemessungen an unterschiedlichen repräsentativen Bereichen, die unterschiedliche Verwitterungszustände aufweisen, durchgeführt (Abb. 3).

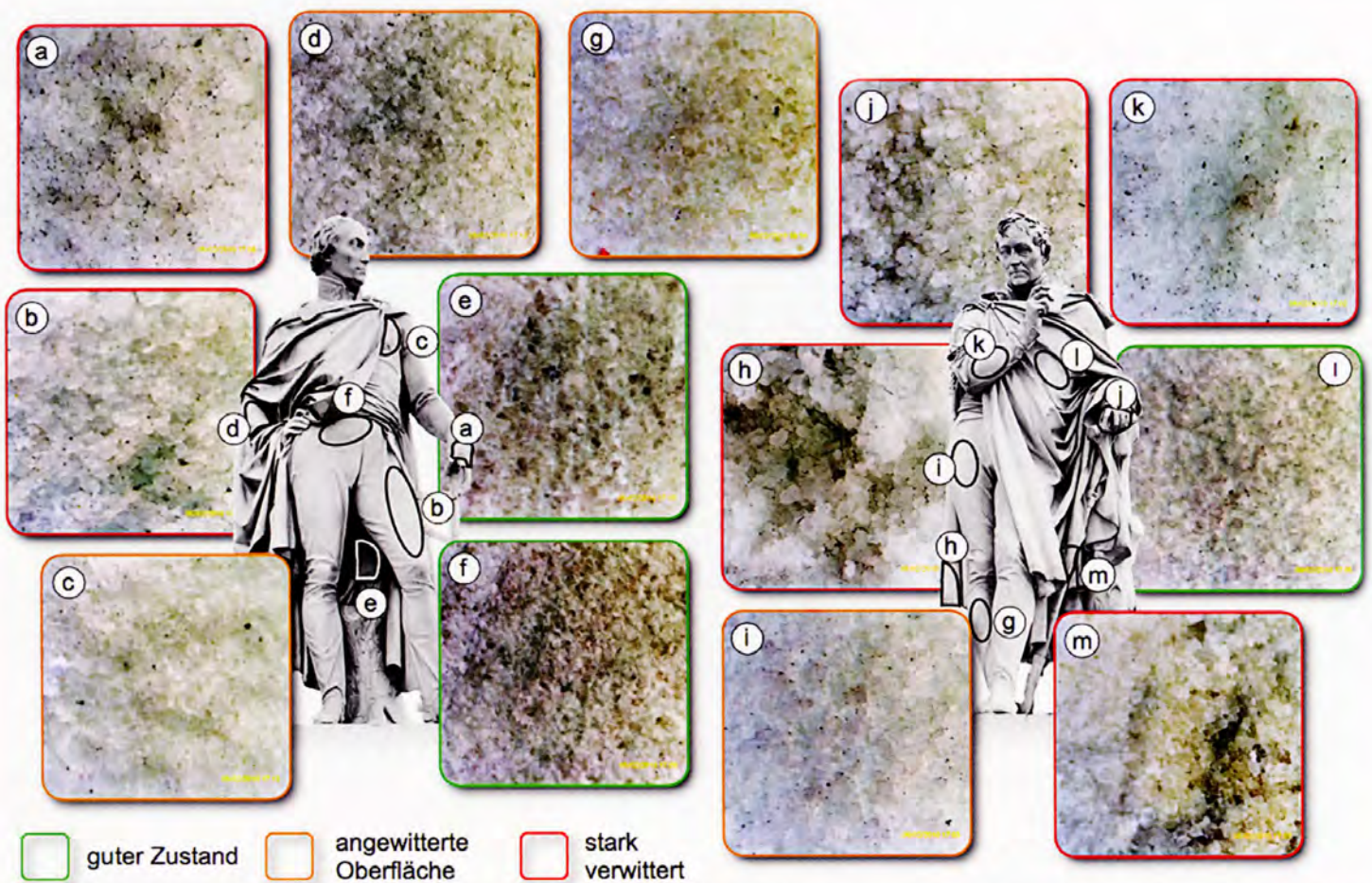


Abbildung 3: a) stark aufgelockerter Kristallverband an der linken Hand der Skulptur führt zu einer deutlichen Reliefbildung. b) deutlich aufgelockerter Kristallverband auf dem witterungsexponierten Oberschenkel der Skulptur. c) mäßig angewitterte Marmoroberfläche. d) deutlich aufgelockerter Kristallverband. e) verschmutzte, aber weitgehend ungeschädigte, geschliffene Marmoroberfläche. f) nur gering angewitterte Marmoroberfläche. g) leicht angewitterte Oberfläche. h) der stark aufgelockerte Kristallverband führt zu einer deutlichen Reliefbildung mit Verschmutzungen und mikrobiologischem Befall. i) deutlich angewitterte Marmoroberfläche mit geringfügigen Verschmutzungen. j) stark verwitterte Oberfläche mit Reliefbildung und Schmutzeinlagerungen. k) stark aufgelockerter Kristallverband mit leichter Schmutzeinlagerung. l) angewitterte Oberfläche mit leichter Reliefbildung und vereinzelt auftretenden Schmutzpartikeln. m) stark aufgelockerter Kristallverband führt zu einer deutlichen Reliefbildung mit Schmutzeinlagerung und Mikrobiologie.

Durch die Kombination der unterschiedlichen Messmethoden konnte eine deutliche Tendenz der Korrelation zwischen der Entfestigung der Oberfläche und der Ultraschallgeschwindigkeit festgestellt werden (Abb. 4 und 5). Doch an einigen Messbereichen zeigten sich auch deutliche Abweichungen, die eine differenzierte Interpretation der Verwitterungsformen zulässt: So weisen z.B. die Messbereiche b und d an der Scharnhorst-Skulptur eine vergleichbar geringe Oberflächenhärte, aber eine hohe Ultraschallgeschwindigkeit auf (Abb. 4). Dies spricht für eine oberflächennahe Verwitterung oder Beschädigung, die z.B. auf die unsachgemäße Reinigung zurückgeführt werden kann. Die idealisierte Korrelationslinie im Fall der Bülow-Skulptur verläuft flacher zugunsten höherer Ultraschallwerte (Abb. 5). Interessant ist der Messbereich g, der hohe Oberflächenhärtewerte, aber vergleichbar geringe Ultraschallgeschwindigkeiten aufweist, die deshalb mehrfach gemessen wurden. Die Werte sprechen für eine strukturelle Entfestigung bei Ausbildung einer Kruste. Die relativ geringen Werte der Oberflächenhärte an den Messpunkten e und f könnten hier ebenfalls mit den Beschädigungen durch die Reinigung verbunden sein. Die Bülow-Skulptur erreichte 2006 einen durchschnittlichen Ultraschallwert von 3,4 km/s und 2013 von 3,06 km/s. Die Scharnhorst-Skulptur weist mit einem durchschnittlichen Wert von 3,66 km/s höhere

Ultraschallgeschwindigkeiten als die Scharnhorst-Skulptur und mit 3,44 km/s in 2013 auch eine geringere Abnahme des Durchschnittswertes. Die Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeit für einzelne, in erster Linie kleindimensionierte Messbereiche ist bei der Scharnhorst-Skulptur jedoch wesentlich deutlicher ausgeprägt, was mit der längeren Außenexposition der Skulptur im Zusammenhang stehen könnte (WEDEKIND ET AL. 2014).

Eine Wasseraufnahme mit dem Karstensenen Prüfröhrchen konnte nur an den Punkten a für beide Skulpturen gemessen werden. Beide Bereiche erreichten lediglich Ultraschallgeschwindigkeiten zwischen rund 1,5 km/s bis 1,8 km/s und können nach der Klassifikation von KÖHLER (1991) als brüchig bezeichnet und mit einer Porosität zwischen 3-5 % angegeben werden.

2.1.1. Partielle Oberflächenfestigung

Die Bereiche, die als angewittert kartiert wurden, weisen auch heute, nach diversen oberflächennahen Festigungen, ein leichtes Abzuckern auf. Einzelne Kristalle sind bei der Reinigung der Oberfläche bei Niederdruck, Bürsten und Wasser abgängig. Auffällig ist, dass es an einigen Bereichen, in denen das ablaufende Wasser abtropft, so z.B. im Saumbereich der Mäntel, teilweise zu gravierenden Rückwitterungen kommt, die wahrscheinlich

Abb. 4: Oberflächenhärte und Ultraschallgeschwindigkeiten an ausgewählten Bereichen der Skulptur Scharnhorst.

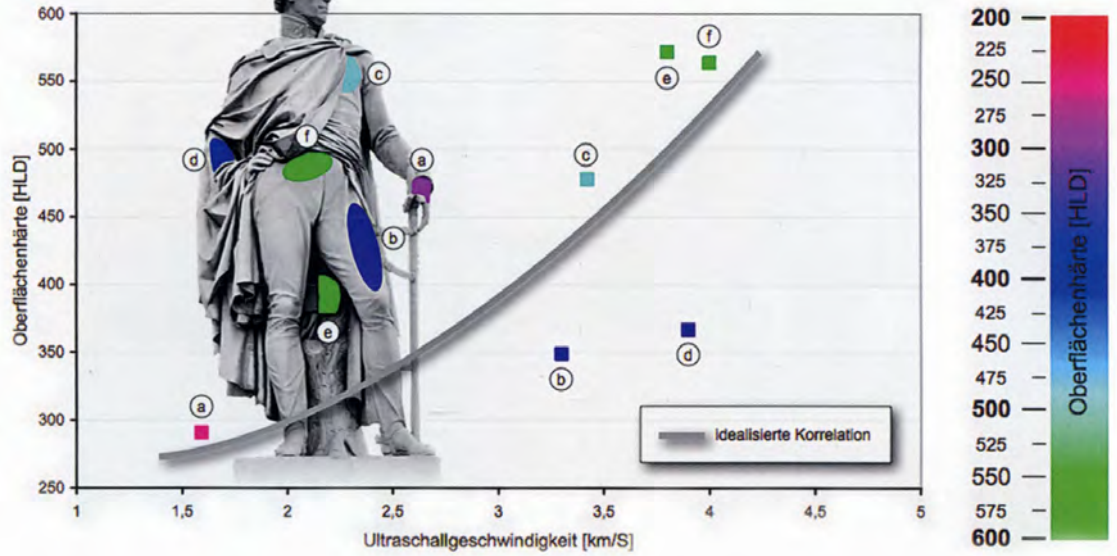


Abb. 5: Oberflächenhärte und Ultraschallgeschwindigkeiten an ausgewählten Bereichen der Skulptur Bülow.

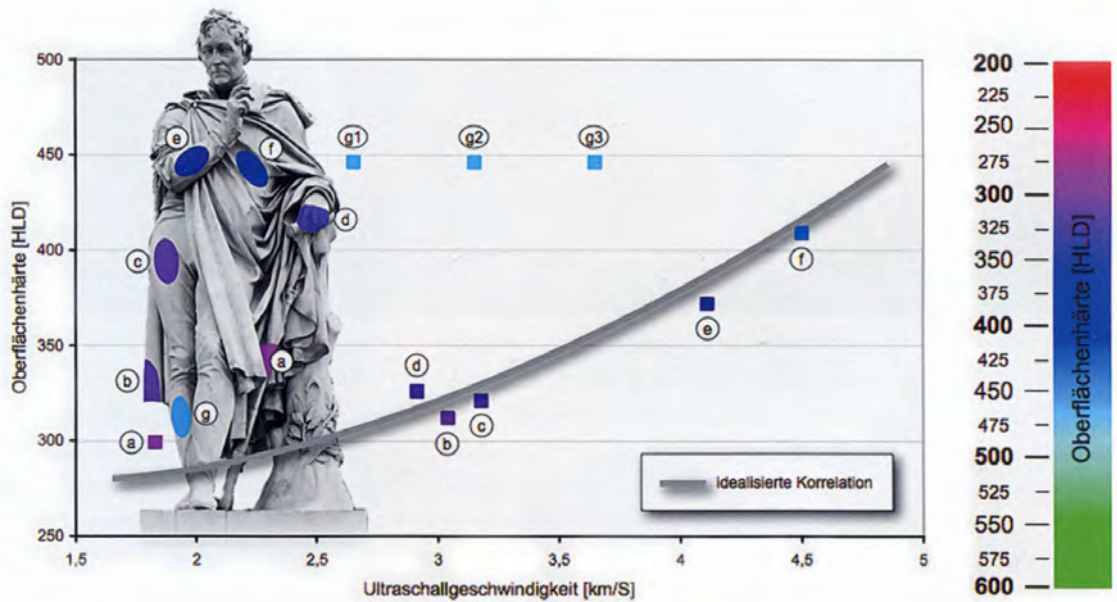


Abbildung 6: a) Algenbewuchs in stark verwitternden Bereichen im Saumbereich des Mantels. b) Algenbewuchs an abwitternden Bereichen am Lockenschopf einer Jünglingsdarstellung der Schlossbrückenfiguren und im Detail. c) Algenbewuchs hinter einer abgewitterten Antragung am Helmholz-Denkmal.

auch auf Frosteinwirkungen zurückzuführen sind (Abb. 6a). In diesen quasi dauernassen Bereichen kommt es auch zu deutlich erkennbarem Algenbewuchs. Ähnliche Beobachtungen wurden auch bei einzelnen Schlossbrückenfiguren und der Skulptur Helmholz vor der Humboldt-Universität gemacht (Abb. 6b und c).

2.1.2. Ergänzungen

Die acrylgebundenen Ergänzungen an den Skulpturen schüsselförmig teilweise massiv ab (Abb. 7a). Unter anderen noch weitgehend intakten Antragungen und Kittungen hat sich Mikrobiologie angesiedelt, was darauf verweist, dass die Anbindung zum Marmor nicht optimal ausgebildet ist. Die Oberfläche der



Abb. 7: a) Abschüsselnde Acrylmörtelkittungen. b) Risse in großen acrylgebundenen Ergänzungen. c) Die Mikrobiologie zwischen Mörtel und Marmor wird in der vergrößerten Detailaufnahme deutlich. d) Verbogene bildhauerische Ergänzung aus PU-Mörtel.



Abb. 8: Die Skulptur des Wilhelm von Humboldt mit neuerlichen Verwitterungen im Detail.

Antragungen wirkt außerdem, stumpf, leicht vergilbt und aufgeraut. Abschüsselnde Antragungen konnten auch am Helmholz-Denkmal ausgemacht werden. Außerdem haben sich hier massive Rissbildungen in Acrylergänzungen, die nach Süden ausgerichtet sind, ausgebildet (Abb. 7b). Mikrobiologie an Ergänzungsbereichen wurden auch an den Schlossbrückenfiguren, nur sechs Jahre nach der letzten Restaurierung, festgestellt (Abb. 7c).

2.2. Alexander und Wilhelm von Humboldt

Die beiden flankierenden Skulpturen zum Eingang des Hauptgebäudes der Universität sind seine Namensgeber Wilhelm und Alexander von Humboldt. Beide Skulpturen sind seit ihrer Aufstellung (1883) an Ort und Stelle verblieben. Die Skulptur Wilhelms ist die ältere und von Martin Paul Otto (1946-1893) hergestellt worden. Die des Alexander von Humboldt wurde von Reinhold Begas (1831-1911) geschaffen. Beide Denkmäler wurden inzwischen mindestens sechs Mal restauriert. Außer-

dem wurden zahlreiche zusätzliche Detailarbeiten ausgeführt (BIELEFELD, SÜSS 2010). Seit 1985 werden beide Denkmäler in den Wintermonaten eingehaust. Beide Denkmäler weisen also zahlreiche Behandlungen und Schäden auf. Im Rahmen der aktuellen Pflege- und Wartungsarbeiten musste ein leichtes Abzuckern an frei bewitterten und bereits deutlich verwitterten Oberflächen während der Reinigungsarbeiten festgestellt werden. Eine Möglichkeit für die Festigungsreduzierung an der Oberfläche führt KÖHLER (1998) auf die Reinigungsmethoden der Restaurierungen zurück.

Im Rahmen der Restaurierung 1998 wurden vom Büro Köhler Ultraschalluntersuchungen vor und nach der Restaurierung durchgeführt (KÖHLER 1998). Hierbei konnte für die Skulptur des Alexander eine Erhöhung der mittleren Schallgeschwindigkeit um etwa 0,2 km/s erreicht werden. Diese lag nach Abschluss der Arbeiten bei 3 km/s. Im Fall des Wilhelm von Humboldt wurde allerdings nach der Restaurierung eine geringere mittlere Schallgeschwindigkeit konstatiert, die schließlich bei 2,8 km/s lag.

2.2.1. Oberflächenfestigung

An den Skulpturen finden wir zwei grundsätzlich unterscheidbare Objektzustände vor. Die frei bewitterten Oberflächenbereiche weisen eine gewisse Entfestigung auf (auf die bereits Köhler in seinem Bericht von 1998 hingewiesen hat), die sich bei leichter mechanischer Beanspruchung durch ein leichtes Abzuckern bemerkbar macht. Die Bereiche, die von direkter Beregnung verschont bleiben, erscheinen offenkundig als weitgehend ungeschädigt, zeigen an einigen Bereichen jedoch eine Krakeleebildung. An einigen Bereichen der Skulptur des Wilhelm von Humboldt haben sich kleine, etwa fingernagelgroße Oberflächenbereiche abgelöst (Abb. 8). Hinter dieser Krustenschicht findet sich eine stark verwitterte, abzuckernde Schicht, was ein Hinweis auf eine mögliche Kernverwitterung sein könnte.

Die deutlichen Rückwitterungen an den Köpfen und Oberkörpern der Figuren ist wahrscheinlich auf unsachgemäße Reinigungen unter Verwendung verdünnter Säuren zurückzuführen. Entsprechende Reinigungsmethoden waren im 19. und frühen 20. Jahrhundert durchaus üblich (Anonymus 1848).

2.2.2. Ergänzungen

Im Gegensatz zu allen anderen Denkmälern im Programm erweist sich der überwiegende Teil der Antragungen und Ergänzungen, ausgeführt mit einem Ergänzungsmörtel mit dem Bindemittel Polyurethan, als nach wie vor stabil. Dieser wurde mit dem 3-Komponentensystem Motema-PUR Marmor ausgeführt, das heute leider nicht mehr verfügbar ist. In einigen Fällen haben sich jedoch Antragungen verformt, was wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, dass das Harz/Härter-Verhältnis nicht genau eingehalten wurde (Abb. 7d).

3. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse machen deutlich, dass die Verwitterungsintensität und Form von unterschiedlichen Faktoren abhängen. Dazu gehören die direkte bzw. indirekte Beregnung bzw. chemische

Verwitterung, die Exposition, Bestrahlung durch das Sonnenlicht und nicht zuletzt die Qualität des Gesteines.

Durch die Kombination unterschiedlicher Messmethoden kann die Interpretation der Verwitterungsformen erleichtert werden. Mögliche Messergebnisse und deren Interpretation sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

				Zustände
+++	+	+++	+	penetrative Verwitterung, „Kernverwitterung“
0	+	0	++	penetrative Verwitterung, mit Krustenbildung
++	+++	0	++	mäßige Oberflächenverwitterung
+++	++	++	+	stärkere oberflächennahe Verwitterung
0	+++	0	+++	intakter Marmor

Tabelle 1: Kombination unterschiedlicher Ergebnisse verschiedener Messmethoden und mögliche Verwitterungszustände.

3.1. Marmorfestigung

Eine erfolgreiche Konservierung ist von der geeigneten Konservierungsmethode abhängig, die auf die jeweilige Verwitterungsform abgestimmt sein muss. Insbesondere für die strukturelle, also tiefgründige Gesteinsfestigung spielt die Porosität eine entscheidende Rolle. Eine Wasseraufnahme per Karsten-Prüfröhrchen konnte lediglich in den Bereichen gemessen werden, die Ultraschallwerte zwischen 1,5 km/s und 2 km/s erreichten. Im Umkehrschluss heißt das, dass eine konventionelle strukturelle Festigung von Marmor unter Atmosphärenbedingungen nur möglich ist, wenn sie eine sekundär ausgebildete Porosität hat, die nach Köhler zwischen 3-5% beträgt.

Festigungen, die mit der Absicht durchgeführt wurden, möglichst tiefgründig in die Gesteinssubstanz einzudringen, also mehrfach bis zur Sättigung aufgetragen wurden (MATERNA 1992), haben in vielen Fällen, wie z.B. bei den Skulpturen der Schlossbrücke oder den Skulpturen von Alexander und Wilhelm von Humboldt zu einer Überfestigung der Oberfläche und zahlreichen Schäden geführt. In beiden Fällen wurden die beschriebenen Festigungsmethoden vollflächig, ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Verwitterungsformen an den Objekten ausgeführt. Tatsächlich ist fraglich, ob nicht schon die Intention der Maßnahme von einem fehlgeleiteten Grundverständnis der Schadenssituation ausging. Eine leichte, gezielt auf die ersten Kristalllagen zielende Festigung an abzuckernden Oberflächen wäre der Objektsituation wahrscheinlich eher gerecht geworden. Objektbereiche, die über eine nachweislich offene Porosität verfügen, können hingegen z.B. mit der Kompressenmethode auch unter konventionellen Bedingungen strukturell getränkt werden. Um der Konservierung eines komplexen Objektes aus Marmor gerecht zu werden, muss unabhängig von der Auswahl des geeignetsten Festigungsmittels die jeweilige Methode auf die entsprechende Verwitterungsform abgestimmt werden. Zwar handelt es sich bei den meisten Festigungsmitteln, die appliziert wurden, um Acrylate, die zumin-



Abb. 9: a) Diplom-Restaurator Martin Lehmann beim Versuch der Reduzierung von Acrylaten von einer Figurengruppe der Schlossbrücke mittels Unterdruck. b) Das Komponisten-Denkmal im Tiergarten in Berlin. c) Risse im Fugenmörtel des Komponisten-Denkmals.

dest theoretisch anlösbar sind, trotzdem ist eine entsprechende Festigung als nicht reversibel einzustufen. Nach dem heutigen Stand der Technik können relevante Mengen an Acrylaten nicht mehr von den Marmoroberflächen entfernt werden, wie Versuche an einer der Schlossbrückenfiguren gezeigt haben (Abb. 9a). Die eingesetzte Unterdruckmethode war im Fall der Reduzierung von Acrylaten an Putzen bzw. Wandmalereien überaus erfolgreich (LEHMANN 2013), stieß am dichten Marmor jedoch an seine Grenzen.

Als Alternative steht die Acrylharzvolltränkung zur Verfügung. Hierbei kommt es im Durchschnitt zu einer Erhöhung der Schallgeschwindigkeit um $1/3$. Doch auch Probleme sollen hier nicht verschwiegen werden. Unter den Denkmälern des Pflege- und Wartungsprogramms befindet sich mit dem Komponistendenkmal im Tiergarten eines, das vollständig auseinander gebaut und Anfang der 2000er Jahre mit dem ATV-Verfahren getränkt wurde. Das Festigungsergebnis ist als ausgesprochen positiv zu bewerten. Weitere Verwitterungsschäden konnten am Marmor bis heute nicht aufgefunden und die Objektsituation als behandelt und konserviert bezeichnet werden. Das Problem besteht allerdings im Fugenwerk, denn das Monument ist aus etwa 145 großformatigen Werksteinen aus Marmor errichtet (Abb. 9b). Der Marmor verfügt nach der Tränkung offenbar über einen höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten, der zu Rissbildungen im Fugenwerk, insbesondere an der Objektseite, die nach Süden ausgerichtet ist, geführt hat (Abb. 9c). Um für diesen Nebeneffekt einen gangbaren Weg zu finden, werden deshalb im Rahmen des Pflegeprogramms unterschiedliche Fugenmörtel getestet.

Eine Alternative für acrylhaltige Festigungsmittel, deren hoher thermischer Ausdehnungskoeffizient grundsätzlich ein Problem darstellt, könnten, insbesondere für oberflächennahe

Festigungen, kolloidiale Calciumhydroxidsole mit Kieselsäureestern als Haftvermittlern darstellen. Erste innovative Untersuchungen an Lockermaterial haben vielversprechende Ergebnisse gezeigt (WILKE 2007).

3.2. Ergänzungsmaterialien

Eine ähnliche Materialkombination aus einem elastifiziertem Steinfestiger auf Basis Kieselsäureester mit hoher Gelabscheidungsrate (KSE 500 STE), Kalkhalbhydrat als Hydrolysebeschleuniger und Marmormehl als Füllstoff könnten eine mögliche Variante als Schlämmörtel und Kittmaterial abgeben, was exemplarisch an Probeflächen am Moltke-Denkmal und einer Marmorskulptur am Schloss Tegel durchgeführt wurde (WEDEKIND, RÜDRICH 2010; WEDEKIND 2010) (Abb. 10).



Abb. 10: a) Verwitterter Saum eines Gewandes einer Marmorskulptur an der Westfassade von Schloss Tegel. b) Nach der Konservierung mit einem KSE-Feinmörtel.

3.3. Mikrobiologie

Grundsätzlich konnte an fast allen Marmorskulpturen ein dramatischer Anstieg der mikrobiellen Besiedlung festgestellt werden. Ein möglicher Grund hierfür kann im allgemeinen Anstieg der Luft- und Oberflächenfeuchte in den letzten Jahrzehnten begründet liegen (WILLET ET AL. 2007). Demnach ist in Bodennähe in den vergangenen drei Jahrzehnten die Luftfeuchtigkeit um 2,2 % angestiegen. Für den Berliner Raum zeigen die Messungen an der Station Potsdam des Deutschen Wetterdienstes innerhalb der letzten 60 Jahre eine jährliche Zunahme von 0,3 %. Der zunehmenden mikrobiologischen Besiedlung muss, als einer der zu erwartenden Herausforderungen der nächsten Jahre, bei der Erhaltung von Denkmälern aus Marmor besonderes Augenmerk geschenkt werden.

4. Wie geht es nun also weiter mit den in diesem Artikel genauer beschriebenen Denkmälern?

Nach den intensiven Untersuchungen an den Schlossbrückenfiguren wurde deutlich, dass eine der Figurengruppen in besonderer Weise geschädigt ist und deshalb mittelfristig durch eine Kopie ersetzt werden sollte. Ähnliches gilt für die Skulpturen der Generäle Bülow und Scharnhorst, die 2025 durch Kopien ersetzt, an ihren ursprünglichen Aufstellungsort an der Neuen Wache zurückkehren sollen. Die Skulpturen der Gebrüder Humboldt bedürfen dringend erneuter vergleichender Untersuchungen.

Unklar ist, auf welcher Grundlage in der Vergangenheit Einschätzungen getroffen wurden und welche Konservierungsmaterialien tatsächlich am ehesten Erfolg versprechen, um marmorne Denkmäler am nachhaltigsten zu erhalten. Mit anderen Worten, es gibt noch viel zu tun in der Marmorkonservierung.

Literatur

- Anonymus 1829: Destigny, über die Ausdehnung der Steine. Polytechnisches Journal, 1829, Band 33, Nr. LXIX, S. 295–305.
- Anonymus 1884: Gourlier, über Verfahrensweisen Marmor und Steine zu reinigen. Polytechnisches Journal, Band 107, Nr. CIX, S. 450-455.
- BIELEFELD, T., SÜSS, C. 2010: Denkmal Alexander von Humboldt – Objekt- und Restaurierungsgeschichte. Bearbeitungsstand: März 2010. Unveröffentlichter Bericht des Landesdenkmalamtes Berlin.
- BIELEFELD, T. SÜSS, C. 2010: Standbild Gerhard Johann David von Scharnhorst – Objekt- und Restaurierungsgeschichte. Bearbeitungsstand: März 2010. Unveröffentlichter Bericht des Landesdenkmalamtes Berlin.
- FRANZINI, M. 1995: Stones in monuments: natural and anthropogenic deterioration of marble artefacts. Eur. J. Mineral. Nr. 7, S. 735-743.
- GORALCZYK, P., BEEGER, D. & MATERNA, H. 1988: Zur Verwitterung und Konservierung von Skulpturen aus Carrara Marmor (Schlossbrückenskulpturen und Humboldt-Denkmale in Berlin). Abh. des Staatl. Museums f. Min. Geol. Dresden Nr. 35, S. 47-59.
- GRELK, B., GOLTERMANN, P., SCHOUBENBORG, B., KOCH, A., ALNAES, L. 2004: The laboratory testing of potential bowing and expansion of marble. Proceedings of the International Conference on Dimension Stone 2004, 14-17 June 2004, Prague, S. 253-259.
- GRIMM, W.D. & SCHWARZ, U. 1985: Naturwerksteine und ihre Verwitterung an Münchner Bauten und Denkmälern – Überblick über eine Stadtkartierung. Arbeitsheft des Bayer. Landesamtes für Denkmalpflege Nr. 31, S. 28-118.
- GRIMM, W.D. 1984: Zur Verwitterungen von Naturwerksteinen insbesondere bayerischer Provenienz. Geol. Bav. Nr. 86, S. 507-550.
- KOCH, A. 2005: Deformation von Fassadenplatten aus Marmor: Schadenskartierungen und gesteintechnische Untersuchungen zur Verwitterungsdynamik von Marmorfassaden. PhD Thesis, University of Göttingen, Göttingen.
- KOCH, A., SIEGSMUND, S. 2004: The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble. Environmental Geology Nr. 46, S. 350-363.
- KÖHLER, W. 1998: Untersuchungsbericht – Berlin, Unter den Linden, „Alexander von Humboldt“ Ultraschalluntersuchungen, Nachuntersuchungen. Unveröffentlichter Untersuchungsbericht. Denkmalamt Berlin.
- KÖHLER, W., 1991: Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara-Marmor in Potsdam-Sanssouci. Berichte zu Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland, Steinschäden - Steinkonservierung 2, S. 50-55.
- LEHMANN, M. 2012: Die Konservierung der Gewölbmalereien in der Krypta der Stiftskirche St. Servatius in Quedlinburg im Rahmen eines Forschungsprojektes der HfBK Dresden 2001-2006. In: DANZL, T., EXNER, M., RÜBER-SCHÜTTE, E. (Hrsg.) Wandmalereien in Krypten, Grotten, Katakomben, ICOMOS-Hefte der Deutschen Nationalkomitees LVI, S. 127-140.
- MATERNA, H. 1991: Konservierungsprobleme an Kalkstein und Marmor. In: MÖLLER, H.-H. (Hrsg.) Steinschäden – Steinkonservierung. Berichte zu Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland 2, Hildesheim, S. 58-61.
- NÄGL, S. 2008: Zwei Skulpturen aus Carrara-Marmor auf der Schlossbrücke in Berlin. Diplomarbeit in der Studienrichtung Konservierung und Restaurierung von Stein an der FH-Posdam, Berlin.
- PAMPLONA, M., SIMON, S. 2012: Long-term condition survey by ultrasonic velocity testing of outdoor marble sculptures. In: Proceedings of the 12th International Conference on the Deterioration and Conservation of Stone, New York, Oktober 22 – 26, 2012 (in print).
- POSCHLOD, K., 1989: Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluss auf die Verwitterung. Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Nr. 7.
- RIEFFEL, Y. 2009: Denkmal versus Pflege – Anspruch und Wirklichkeit der präventiven Denkmalpflege in Berlin, S. 195-201.
- RIEFFEL, Y. 2009: Pflege als strategisches Konzept. In: Swiss association of Restorers (SCR/SKR), Preventive Conservation – Practice in the Field of build heritage, Villars sur Glane 2009, S. 46-52.

- RÜDRICH, J., KNELL, C., RIEFFEL, Y., ENSELEIT, J., SIEGESMUND, S. 2013: Stability assessment of marble statues of the Schlossbrücke (Berlin, Germany) based on rock strength measurements and ultrasonic wave velocities. *Environmental Earth Science* Nr. 69, S. 1451-1469.
- RÜDRICH, J. 2003: Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore, Dissertation, Georg-August-Universität zu Göttingen, Göttingen.
- SNETHLAGE, R., Ettl, H., Sattler, L. 1999: Ultraschallmessungen an PMMA-getränkten Marmorskulpturen. In: *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* Nr. 150/2, S. 387-396
- WEDEKIND, W., RÜDRICH, J., SIEGESMUND, S., RIEFFEL, Y. 2014: Long-term evaluation of the conservation state of marble statues. In: *Proceedings of the ICOMOS-ISCN International Conference on Conservation of Stone and earthen Architectural Heritage*, May 20-23, 2014, Kongju National University, Gongju, Republic of Korea, S. 35-41.
- WEDEKIND, W., KRACKE, T., RÜDRICH, J., BRUCH, A., SIEGESMUND, S. 2013: Der Bartholomäus Friedhof in Göttingen als Beispiel für die nachhaltige Revitalisierung und Erhaltung eines Gesamtensembles. In: SIEGESMUND, S., SNETHLAGE, R. (Hrsg.) *Natursteine in der Kulturlandschaft*. Mitteldeutscher Verlag, Leipzig, S. 322-333.
- WEDEKIND, W. 2012: Skulpturen der Westfassade am Schloss Tegel, Untersuchung und Konservierungsvorschlag. Unveröffentlichter Untersuchungsbericht, Berlin Oktober 2012, Landesdenkmalamt Berlin.
- WEDEKIND, W., RÜDRICH, J. 2010: Standbild Moltke, Restauratorische Untersuchung. Unveröffentlichter Untersuchungsbericht, Göttingen, 16.10.2010, Landesdenkmalamt Berlin.
- WEDEKIND, W. 2005: Preventive conservation for the protection of the sandstone facades in Petra/Jordan. *Biuletin -- Journal of Conservation-Restoration*, Vol. 16 Nr. 1 (60) 2005, S. 48-53.
- WIDHALM, C., TSCHEGG, E. & EPPENSTEINER, W., 1996: Anisotropic thermal expansion causes deformation of marble cladding. *J. of Performance of Constructed facilities*, ASCE Nr. 10, S. 5-10.
- WILLET, K.M., GILLET, N. P., JONES, P. D., THORNE, P. W. 2007: Attribution of observed surface humidity changes to human influence. *Nature* Nr. 449, S. 710-712.
- WILKE, V. 2007: Marmorkonservierung - Möglichkeiten der Marmorkonsolidierung mit kolloidalem Calciumhydroxidsol und KSE mit Haftvermittlern. Diplom-Arbeit an der HAWK Hildesheim/Holzwinden/Göttingen.