

Aktuelle Probleme der Marmorrestaurierung

Actual problems of conserving marble

von

Andreas ROHATSCH

mit 14 Abbildungen und 3 Tabellen
with 14 figures and 3 tables

Schlüsselwörter:

Denkmalpflege

Steinfestigung

Marmor

Gesteinsverwitterung

Physikalische Eigenschaften

Keywords:

*Restoration and
conservation of monuments*

Consolidation of stone

Marble

Deterioration of stone

Physical properties

Anschrift des Verfassers, address of the author:

Ao.Univ. Prof. Mag. Dr. ANDREAS ROHATSCH

Institut für Ingenieurgeologie

TU-Wien

Karlsplatz 13

1040 Wien

Österreich.

Inhalt

Zusammenfassung, Abstract.....	130
1. Einleitung.....	130
2. Fallbeispiele.....	131
2.1. Marmor-Büste des Fürsten Wenzel Anton Kaunitz-Rietberg in Schloß Schönbrunn.....	131
2.2. Attikafiguren des Wiener Parlaments.....	132
2.3. Colin-Brunnen in Schloß Schönbrunn.....	132
3 Festigungsversuche im Labor.....	134
3.1. Ergebnisse.....	135
3.2. Diskussion und Ausblick.....	136
Literatur.....	137

Contents

Zusammenfassung, Abstract.....	130
1. Introduction.....	130
2. Case studies.....	131
2.1. Memorial of prince Wenzel Anton Kaunitz-Rietberg in the Schönbrunn castle.....	131
2.2. Figures of the Parliament in Vienna.....	132
2.3. Colin-fountain in Schönbrunn castle.....	132
3 Consolidation experiments in the laboratory.....	134
3.1. Results.....	135
3.2. Discussion and outlook.....	136
References.....	137

Zusammenfassung

Die Festigung von historisch bedeutsamen und künstlerisch wertvollen verwitterten Steinobjekten mit organischen und anorganischen Steinfestigern ist eine Chance für die Denkmalpflege, die Zerstörung durch chemische und physikalische Verwitterungsprozesse, im idealen Falle für einige Jahrzehnte, zu verzögern. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen uns aber auch, daß durch die Steinfestigung die gesteinsphysikalischen Eigenschaften, hier von verwittertem Marmor, durchaus noch verschlechtert werden können. So wird beispielsweise durch eine Festigung mit gelöstem PMMA (Polymethylmetacrylat) die Spaltzugfestigkeit durch Versprödung um bis zu 40 % reduziert und die Austrocknungszeit stark verlängert.

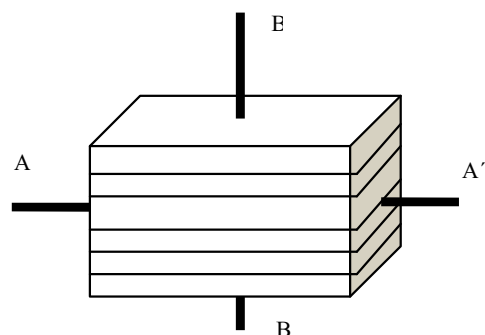
Abstract

The consolidation of historic monuments of stone with organic and inorganic stone strengthening products is a possibility to delay natural processes of chemical and physical deterioration. The results of this study shows us that the physical properties of weathered marble sometimes are getting worse by consolidation. The tension strength (Brazilian test) was reduced about 40 % by using dissolved PMMA (Polymethylmetacrylate) and the dry out behaviour was heavily delayed.

1. Einleitung

Aufgrund der besonderen Verwitterungseigenschaften von

Marmoren insbesondere von feinkörnigen, wie jenen aus Carrara oder Laas sowie die häufige Verwendung dieser Dekorgesteine im Wiener Raum für Brunnenanlagen, Grab- und andere Denkmale sowie Figurengruppen und den damit verbundenen Problemen, die bei einer konservierenden Restaurierung auftreten, war es ein besonderes Anliegen, die derzeit verwendeten handelsüblichen Steinfestiger unter Laborbedingungen auf ihre Wirksamkeit hin zu überprüfen. Auch international wurden in letzter Zeit vermehrt das Verwitterungsverhalten und die Konservierungsmöglichkeiten von Marmoren studiert¹.



$$US\text{-geschwindigkeit } AA' > US\text{-geschwindigkeit } BB'$$

Abb. 1: Schematische Darstellung der Abhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeit von textuellen Gegebenheiten (Schieferung, sedimentäre Schichtung, etc.).

Fig. 1: Schematic view of the correlation between ultrasonic-velocity and structure (cleavage, sedimentary layering, etc.).

¹ z. B. EU-Projekt EUROMARBLE und Themenheft Marmor-Konservierung der Deutschen Geologischen Gesellschaft.

Vereinfacht kann die Verwitterungsproblematik bei Marmor primär auf das anisotrope Ausdehnungsverhalten der Kalkspäte bei Erwärmung zurückgeführt werden, das im Laufe der Zeit zu einer massiven Gefügauflockerung, vor allem bei feinkörnigen Marmoren führt. Grobkörniger Marmor, wie zum Beispiel jener aus Sterzing², der seit dem 16. Jahrhundert häufig in Wien verwendet wurde, verhält sich im Allgemeinen „gutmütiger“ und weist einen besseren Erhaltungszustand auf, als gleich lang exponierte feinkörnige Marmore. Dieser Umstand ist auf die wesentlich geringere Spaltporenoberfläche zurückzuführen. Selbstverständlich spielt auch die kristallographische Vorzugsorientierung der Kalkspäte eine eminente Rolle, da sie die im Gefüge auftretenden maximalen Spannungen und somit das Deformationsverhalten kontrolliert (TSCHEGG, WIDHALM & EPPENSTEINER 1999; SIEGESMUND, WEISS, VOLLBRECHT & ULLEMEYER 1999). Die durch die Gefügauflockerung hervorgerufene Wasserwegigkeit führt in weiterer Folge zu einer Erhöhung der Empfindlichkeit gegenüber Frost- und Salzsprengung. Auch die Besiedelung durch Bakterien und Algen wird begünstigt. Methodisch kann der Verwitterungszustand eines Gesteines mit geringem Aufwand und vor allem zerstörungsfrei mit Ultraschallmessungen (z. B. KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER 1966, DÜLLMANN 1976) festgestellt werden. Richtwerte für die Ultraschallgeschwindigkeit für den Verwitterungsgrad von Carrara Marmor gaben KÖHLER & SIMON (1993):

nicht verwitterter Marmor:	>5 km/s
erhöhte Porosität:	3-5 km/s
fortgeschrittene Gefügauflockerung	
beginnende Gefahr:	2-3 km/s
Gefahr des Objektverlustes:	<2 km/s
vollständige Gefügauflockerung:	<1,5 km/s

Wesentliche Faktoren, neben den textuellen Gesteinseigenschaften, welche die Ultraschallgeschwindigkeit beeinflussen, sind Temperatur und Feuchtigkeit. Warme Gesteine weisen geringere Geschwindigkeiten auf als kalte, feuchte Gesteine weisen höhere Geschwindigkeiten auf als trockene. Aus diesem Grund sollte bei jeder Meßkampagne auch die Temperatur und die Feuchtigkeit von Gesteinen dokumentiert werden.

2. Fallbeispiele

Anhand der folgenden Fallbeispiele sollen einige Probleme der Marmorrestaurierung aus jüngster Vergangenheit vorgestellt werden.

2.1. Marmor-Büste des Fürsten Wenzel Anton Kaunitz-Rietberg in Schloß Schönbrunn

Die Kaunitz - Büste aus dem Jahre 1780 besteht aus feinkörnigem Carrara-Marmor und ist an der Rückseite signiert

² Korngröße durchschnittlich zwischen 4 und 6 mm

und datiert (*Jos. Ceracchi Romanus / Faciebat Vindobonae / 1780*)³. Die Büste ist auf einem Säulenstumpf aus Sterzinger Marmor aufgestellt (dat. 1871), der schieferungsparallele Risse aufweist. Die Auswertung der Ultraschall-Meßdaten ergab, daß die Büste gegenüber bruchfrischem

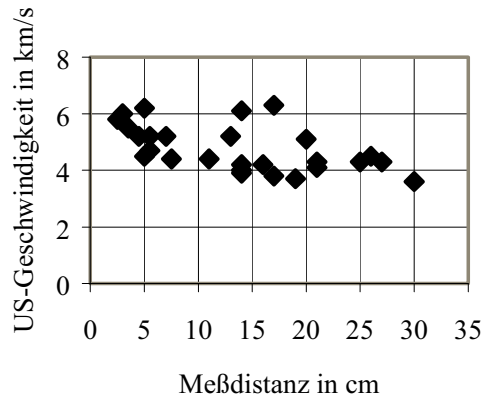


Abb. 2: Ultraschallgeschwindigkeiten der Kaunitz-Büste (Mittelwert: 4,8 km/s)

Fig. 2: Ultrasonic-velocities of the Kaunitz-memorial (Carrara marble) in the castle Schönbrunn (Vienna).

Carrara-Marmor bereits erhöhte Gefügauflockerung aufweist. Risse konnten nicht beobachtet werden. Die etwas stärkere Gefügauflockerung konnte vor allem im oberen Bereich, also an den Schultern und im Schädelbereich, festgestellt werden.

Bereits bei einer einmaligen Erwärmung von Carrara Marmor um 60 °C wird die Ultraschallgeschwindigkeit von >5 km/s auf rund 3,5 km/s abgesenkt. Der errechnete Mittelwert von rund 4,8 km/s für die Kaunitz-Büste liegt deutlich über diesem Wert. Eine längere, mehrere Jahre andauernde Aufstellung im Freien würde aufgrund der schwankenden Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüsse eine wesentlich stär-

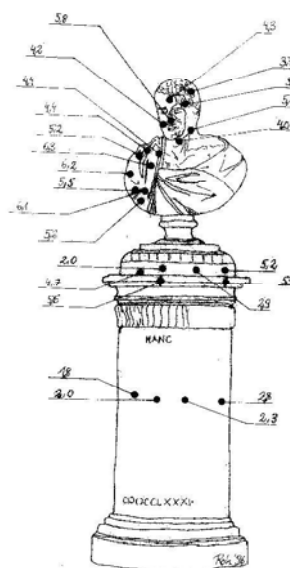


Abb. 3: Skizze der Kaunitz-Büste.

Fig. 3: Drawing of the Kaunitz-memorial.

³ Kunsthistorisches Museum, Sammlung für Plastik und Kunstgewerbe, Inventar Nummer 6894, Standort Schloß Schönbrunn, Erdgeschoß, östliches Ovalekabinett.

kere Gefügeauflockerung erwarten lassen und ist daher auszuschließen (z. B. KÖHLER 1996, SNETHLAGE 1993). Es besteht aber auch für die nächsten Jahre keine Gefahr, daß diese kunsthistorisch bedeutsame, geschützt aufgestellte Plastik zerstört werden würde. Somit ist auch eine Steinfestigung in diesem Fall nicht notwendig.

2.2. Attikafiguren des Wiener Parlaments

Völlig anders gelagert ist jedoch die Problematik der Attikafiguren des Wiener Parlamentes, die überwiegend aus Laaser Marmor bestehen. Hier mußten aufgrund der exponierten Aufstellung der Figuren schon alleine aus Sicherheitsgründen tiefgreifende Festigungsmaßnahmen ergriffen werden, um so mehr als einzelne, vor allem feingliedrige Figurenteile, wie Hände, Arme, Gewandfalten und diverse Attribute alarmierend niedrige Ultraschallwerte aufwiesen⁴ und die Marmoroberfläche bereichsweise stark absandete⁵. Bereichsweise konnten auch Risse beobachtet werden, die auf Frostsprengung zurückzuführen sind.

Erste urkundliche Belege über die Nutzung des Laaser Marmors gehen auf das Jahr 1717 zurück (KLEBELSBERG 1948)⁶. Charakteristisch für den Laaser Marmor ist die nach Jahren bis Jahrzehnten auftretende homogene lichtgelbe, elfenbeinerne Tönung des ursprünglich reinweißen Gesteines, die auf einen geringen Eisengehalt der Kalkspäte zurückgeführt werden kann.

Die Ultraschalluntersuchungen nach den Festigungsmaßnahmen zeigte bei allen Figuren eine deutliche Zunahme der Geschwindigkeit, also eine Verdichtung des Gefüges. Gefestigt wurde mit Paraloid B72, einem gelösten PMMA (Polymethylmetacrylat). Ein unabsichtlich abgebrochener Unterarm einer Figur zeigte eine Eindringtiefe des Festigers von rund 25 mm. Der Vergleich der Meßwerte vor und nach der Festigung zeigt ein sehr heterogenes Bild.

Vor allem bei feingliedrigen Figurenteilen bis etwa 10 cm Dicke zeigte sich eine deutliche Zunahme, in den massiveren Bereichen der Körper konnte aufgrund der im Verhält-

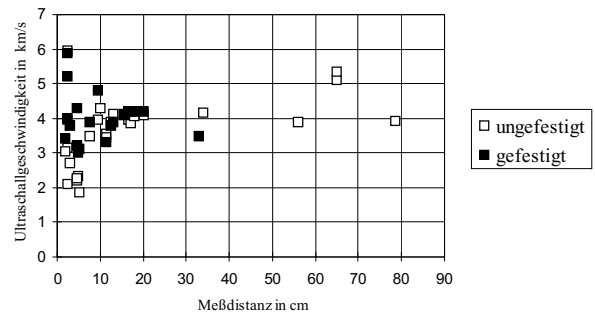


Abb. 4: Ultraschallgeschwindigkeiten der Attikafigur “Bergbau” aus Laaser Marmor im ungefestigten und gefestigten Zustand.

Fig. 4: Ultrasonic-velocities of the figure “mining” (marble from Laas/Italy) of the parliament in Vienna before and after conservation with PMMA.

nis zu geringen Eindringtiefe des Steinfestigers keine Veränderung festgestellt werden.

2.3. Colin-Brunnen in Schloß Schönbrunn

Der derzeit in seine Einzelteile zerlegte rund 5 m hohe Brunnen soll im Mai 2000 wieder vor der Orangerie des Schlosses aufgestellt werden und auch mit Wasser befüllt werden. Die Frage nach dem Erhaltungszustand und notwendigen Restaurierungsmaßnahmen für eine Neuaufstellung führten zu dieser Untersuchung. Zusätzlich zur visuellen Befundung wurden die Einzelteile des um 1572 für das Schloß Neugebäude hergestellten Brunnens mit Hilfe von Ultraschalluntersuchungen auf ihren Erhaltungszustand hin untersucht⁷. Die beiden Brunnenschalen, die Löwen (4 Stück) und die Einzelteile des zentralen Schaftes bestehen aus Sterzinger Marmor. Die drei Hermen des Brunnens bestehen aus Laaser Marmor⁸.

Zustand	US in km/s	Festigung	Hydrophobierung
sehr gut	>4,4	nicht notwendig	nicht notwendig
gut	3,7 - 4,4	nicht notwendig	empfehlenswert
ausreichend	2,9 - 3,7	notwendig	unbedingt notwendig
schlecht	2 - 2,9	unbedingt notwendig	unbedingt notwendig
sehr schlecht	<2	unbedingt notwendig	unbedingt notwendig

Tab. 1: Zustandsbeschreibung durch Ultraschallgeschwindigkeit und notwendige Restaurierungsmaßnahmen.

Tab. 1: Description of the state of deterioration and inevitable conservation measures.

⁴ Diese Untersuchungen wurden gemeinsam mit Univ.Ass.Dr. Johannes WEBER (Universität für Angewandte Kunst) und DI Karol BAYER (Bratislava) durchgeführt.

⁵ Interessant ist in diesem Zusammenhang vielleicht die Beobachtung, daß einzelne grobkörnigere Kalkspataggregate, da sie besser verwitterungsbeständig sind, pustelförmig über die Verwitterungsoberfläche herausragen. Als beschreibenden Begriff könnte man hier von „Marmorakne“ sprechen.

⁶ Auch dieser Marmor besaß überregionale Bedeutung (Lieferungen bis Regensburg, Düsseldorf, Trier, New York, Philadelphia, etc.) und wurde vorwiegend für Bildhauerarbeiten, aber auch für Brunnen und Maßwerke verwendet.

⁷ Die Ultraschallmessungen erfolgten am 19. Februar 1999 unter Mitarbeit von Frau CHALUPAR (TU-Wien) und Herrn Ing. RETZL (Büro Machatschek & Schermann). Von Herrn Ing. RETZL wurde für die Auswertung der Untersuchungsergebnisse eine umfangreiche Fotodokumentation und Planskizzen freundlicherweise zur Verfügung gestellt (herzlichen Dank!).

⁸ Der von Alexander Colin angeblich im Jahre 1567 aufgefundene Oberberger Marmor aus dem Oberberger Tal bei Gries am Brenner gelangte für diesen Brunnen nicht zur Verwendung. Bei diesem Marmor handelt es sich um einen feinkristallinen, zuckerkörnigen weißen bis blaßrosa Marmor, der als inländischer Ersatz des Marmors von Carrara dienen sollte (KLEBELSBERG 1948).

Der grobkörnige, in Schönbrunn allgegenwärtige Sterzinger Marmor (Neptunbrunnen, Parkfiguren, etc.) wurde seit dem Spätmittelalter für dekorative Steinmetz- und Bildhauerarbeiten bis ins 20. Jhdt. verwendet (z. B. Grabsteine im Kreuzgang des Domes zu Brixen, Haupttreppen Parlament, Naturhistorisches Museum, etc.).

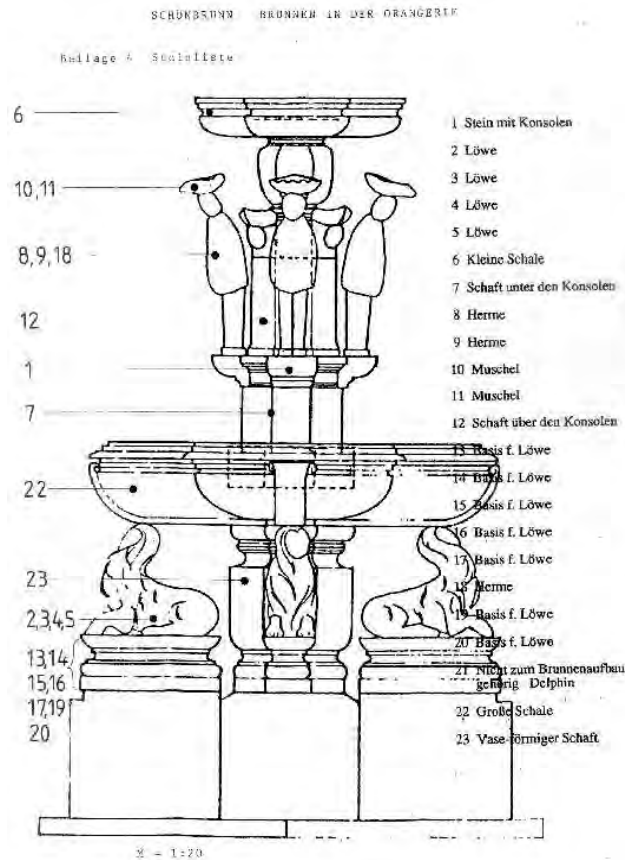


Abb. 5: Schematische Darstellung des Colin-Brunnens.

Fig. 5: Drawing of the Colin-fountain.

Physikalische Kennwerte von nicht verwittertem Sterzinger Marmor:

- Rohdichte: 2,69 g/cm³ (2,64-2,74)
- Würfeldruckfestigkeit:
 trocken: 61 N/mm² (54-69)
 wassersatt: 54 N/mm² (45-64)
- Wasseraufnahme: 0,1 M.% (0,09-0,11)
- Ultraschallgeschwindigkeit: 4,5-5,2 km/s

Die zusammenfassende Darstellung der Ultraschallmeßwerte (Abb. 7) zeigt, daß der Erhaltungszustand der Brunnenteile erfreulicherweise, überwiegend als zumindest "ausreichend" und besser anzusprechen ist, wobei der Zustand "ausreichend" nicht bedeutet, daß bei diesen Teile auf konservierende Maßnahmen verzichtet werden kann. Für die Steinfestigung muß derzeit, mangels alternativer Produkte noch gelöstes PMMA verwendet werden, obwohl bei der Festigung von Carrara - Marmorproben unter Laborbedingungen mit Paraloid bis jetzt nicht bekannte Probleme

(siehe Kapitel 3ff.) aufgetreten sind. Für die Hydrophobierung können die derzeit handelsüblichen Silane und Siloxane verwendet werden, wobei jedoch eine Hydrophobierungscreme⁹ empfohlen wird, da diese auf-

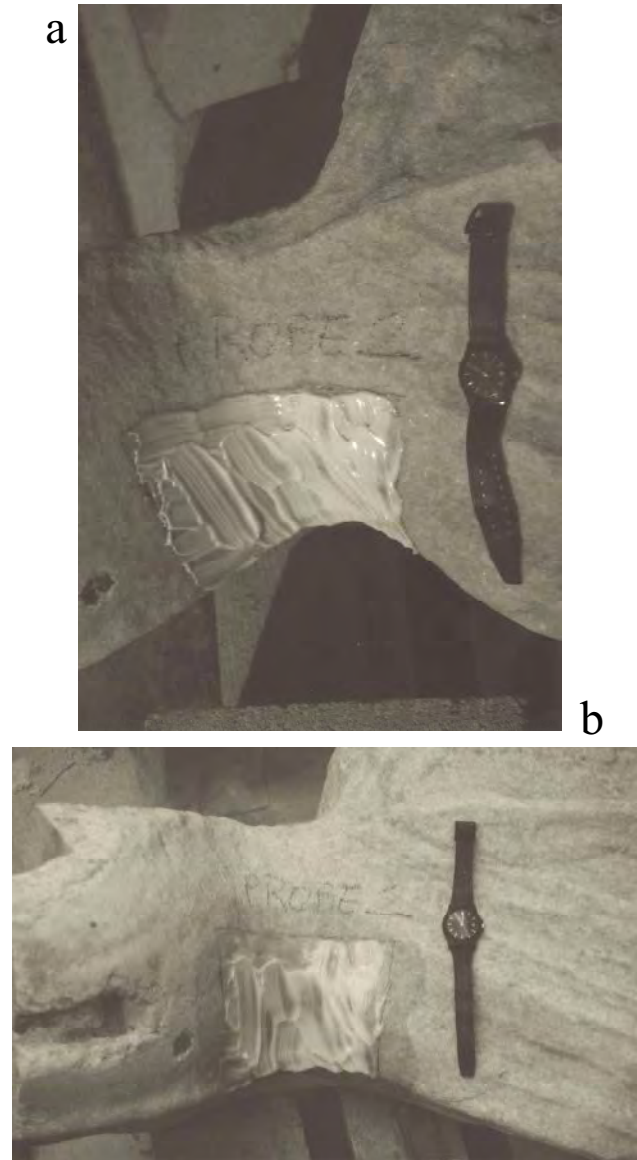


Abb. 6: Versuchsfeld 2 für die Hydrophobierungscreme: Bild 1 Versuchsbeginn, Bild 2 nach 55 Minuten.

Fig. 6: Test area 2 for hydrophobic creme: picture 1 start, picture 2 after 55 minutes.

grund der überaus langen Kontaktzeit, dem Stein eine optimale Aufnahmemöglichkeit bietet. Die Untersuchung von Bohrkernen ergab, daß es bei gesundem Gesteinsgefüge zu einer Hydrophobierung an der Oberfläche kommt. Nur bei aufgelockertem Gefüge kann eine Tiefenwirkung erzielt werden. Da eine nur partielle Hydrophobierung nicht sinnvoll erscheint, da sich auch ein gewisser Anfeuerungseffekt und Glanz nicht vermeiden läßt, sollte die gesamte Anlage hydrophobiert werden. Dieser

⁹ Produkte der Firmen WACKER oder REMMERS.

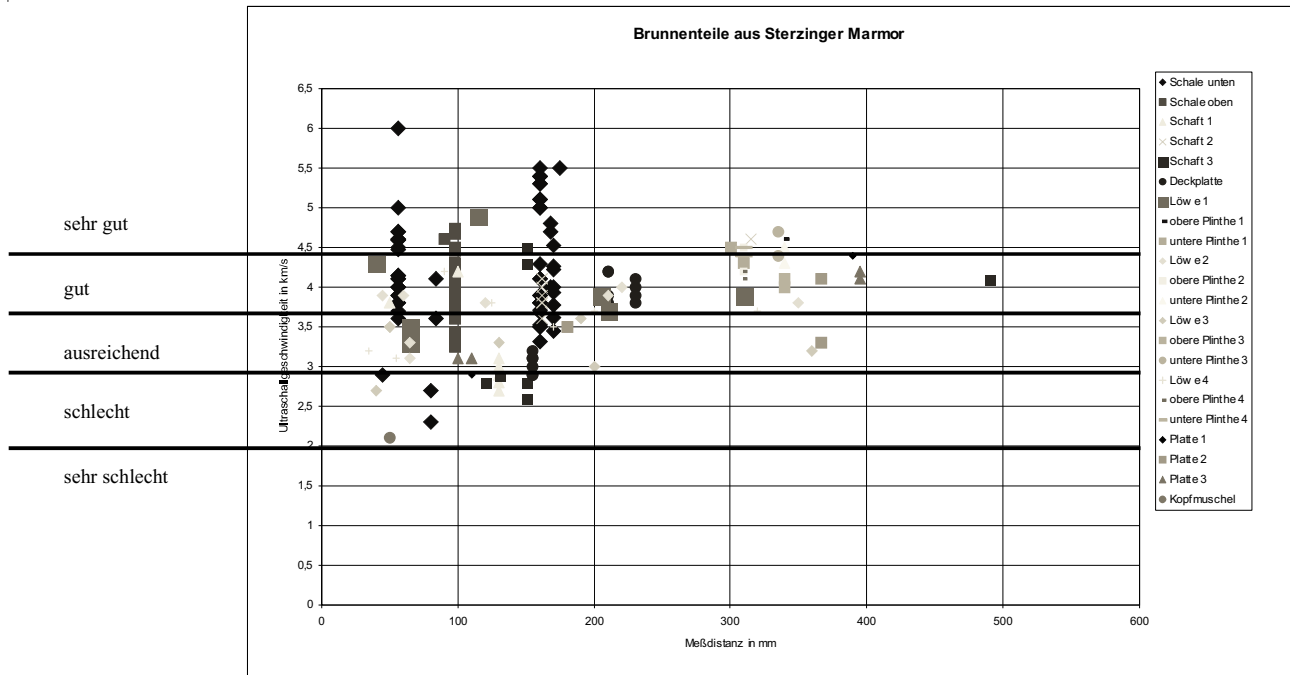


Abb. 7: Graphische Darstellung aller Meßergebnisse an den Brunnenteilen aus Sterzinger Marmor.

Fig. 7: Diagram of all dates of the fountain parts (marble of Sterzing).

Anfeuerungseffekt, der die ursprünglich vorhandene Transparenz des Marmors betont, ist auch aus ästhetischen Gründen zu vertreten, da die Marmorteile ursprünglich sicherlich poliert waren.

3. Festigungsversuche im Labor

Aufgrund der Häufigkeit der Marmorrestaurierungen in den letzten Jahren und den immer wieder beobachteten Schadensphänomenen an bereits restaurierten Steinobjekten, die immer wieder auf Restaurierungsschäden hinwiesen, beschlossen wir ein Untersuchungsprogramm zu formulieren und die rund 25jährige Marmorrestaurierungstradition kritisch zu hinterfragen. Gemeinsam mit den Restaurierwerkstätten des österreichischen Bundesdenkmalamtes¹⁰ wurde ein Untersuchungsprogramm mit vier Steinfestigern konzi-

piert und am Institut für Ingenieurgeologie durchgeführt¹¹. In erster Annäherung wurden als wesentliche Anforderungen an die Steinfestiger, eine möglichst große Eindringtiefe, keine Verschlechterung des Austrocknungsverhaltens und eine Verklebung der einzelnen Kalkspäte somit eine Erhöhung der Kornbindungsfestigkeit gefordert. Die grundlegende Fragestellung dieser Untersuchungsreihe war: „Wie wirken sich die unterschiedlichen Festigungsmaßnahmen, verbessernd oder verschlechternd, auf die physikalischen Eigenschaften des Marmors aus?“

Untersuchungsablauf

1. Ultraschallgeschwindigkeit
2. Rohdichte nach ÖNORM B 3121
3. Wasseraufnahme nach ÖNORM B 3122
4. Wasseraufnahmeverhalten
5. Austrocknungsverhalten
6. Zylinderdruckfestigkeit nach ÖNORM B 3124 Teil 1

	nicht verwittert	verwittert
Rohdichte	2,71 - 2,72 g/cm ³	2,70 - 2,71 g/cm ³
Wasseraufnahme	0,1 - 0,25 M. %	0,1 - 0,23 M. %
Ultraschallgeschwindigkeit	4 - 5 km/s	1,3 - 2 km/s
Zylinderdruckfestigkeit	110 - 130 N/mm ²	49 - 52 N/mm ²
Spaltzugfestigkeit	10 - 14 N/mm ²	3,1 - 5,6 N/mm ²

Tab. 2: Gesteinsphysikalische Kennwerte des verwitterten und nicht verwitterten Marmors (Carrara Bianco CD).

Tab. 2: Physical properties of weathered and fresh marble (Carrara Bianco CD).

¹⁰ Den Herren HR.Univ.DoZ.Dr. Manfred KOLLER, HR Dr. Hubert PASCHINGER und Mag. Johann NIMMRICHTER danke ich für diese kollegiale und hilfreiche Zusammenarbeit.

¹¹ Frau Ines CHALUPAR führte großteils die sehr zeitaufwendigen Serienversuche im Labor durch, wofür ich mich gerne bedanke.

7. Spaltzugfestigkeit (Brazilian Test) nach ÖNORM B 3124 Teil 4.

Anforderungen an die Steinfestiger

1. Große Eindringtiefe ohne Überfestigung der äußeren Bereiche
2. Verklebung der Kalkspäte – Erhöhung der Kornbindungs-festigkeit - Erhöhung der Zugfestigkeit
3. Keine Verlängerung der Austrocknungszeit
4. Keine zusätzlichen Spannungen bei thermischer und hygri-scher Beanspruchung
5. Beständigkeit gegenüber schwachen Säuren und Laugen sowie UV-Strahlung
6. Keine klebenden Oberflächen nach dem Abschluß der Reaktion – unempfindlich gegenüber Verschmutzung
7. Keine wesentlichen Veränderungen von Farbe und Glanz an den Oberflächen
8. Reversibilität, um später folgende Restaurierungs-maßnahmen nicht ungünstig zu beeinflussen
9. einfache Manipulation auf Baustellen (Pinsel, Sprühfla-schen, etc.)
10. Ungiftig nach dem Aushärten.

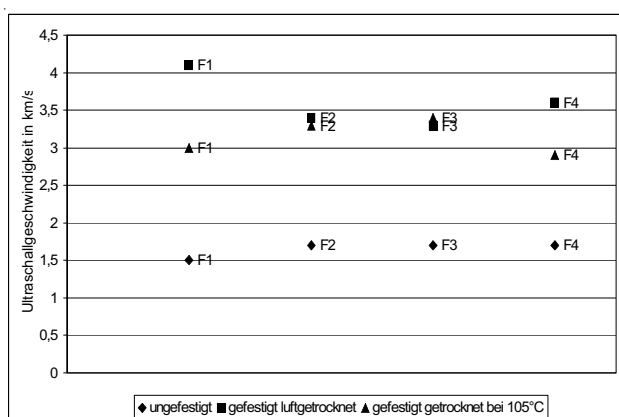


Abb. 8: Ultraschallgeschwindigkeiten vor und nach der Festigung (Mittelwerte).

Fig. 8: Ultrasonic-velocity before and after consolidation (mean).

Verwendete Steinfestiger

- F1:** Hydrophobe Mischung von Siloxan (Wacker 290) und Kieselsäureester (Wacker 100 OH) gelöst in Ethanol im Verhältnis 6:4:5
- F2:** Paraloid B72 - 7 %ig (PMMA) gelöst in Methoxypropylacetat, Butylacetat und Xylol (1:1:1)
- F3:** Schwach hydrophobe Mischung von Siloxan (VP1321) und Paraloid B72 gelöst in Methoxypropylacetat, Butylacetat und Xylol (1:1:1)
- F4:** Hydrophobe Mischung von Kieselsäureester und Siloxan (Fertigprodukt Rhodorsil (RC90) = Ethylsilikat + Katalysator + Methylphenylharz) gelöst in Testbenzin.

Probenmaterial

Aus einem 60x40x20 cm großen homogen verwitterten Marmorquader (Carrara Bianco CD) wurden 40 Bohrkerne mit 200 mm Länge und 50 mm Durchmesser entnommen. Als Vergleichsmaterial diente nicht verwitterter Carrara

Bianco CD.

Festigungstechnik

Die Hälfte jeder Probenserie wurde mit einem Pinsel 2x naß in naß bestrichen, die restlichen Bohrkerne wurden für 20 Stunden in einer Wanne getränkt. Nach der Behandlung wurden die Bohrkerne mit Vlies und Kunststoffolie für 120 Stunden eingewickelt. Die Bestimmung der gesteinsphysikalischen Kennwerte erfolgte nach 4 Wochen, nachdem die Reaktion der Harze und Kieselsäureester abgeschlossen war, wobei ein Drittel der Prüferserie bei Raumtemperatur und 50 % rel. Luftfeuchtigkeit, ein Drittel bei 60 °C und ein Drittel bei 105 °C getrocknet wurde.

3.1. Ergebnisse

Nach der Applikation der Steinfestiger konnte bei allen Probekörpern eine deutliche Erhöhung der Ultraschallgeschwindigkeit, also Verdichtung des Korngefüges festgestellt werden, wobei sich die Ultraschallgeschwindigkeit der mit KSE gefestigten Probekörper bei thermischer Beanspruchung (Trocknung) wieder deutlich reduzierte. Dieser Effekt ist auf die verbesserte Austrocknung durch Verdampfung des restlichen Lösungsmittels und die sich einstellenden finalen Trockenrisse des Kieselsgels zurückzuführen. Die Ermittlung der Rohdichte und Wasseraufnahme mit den in den entsprechenden ÖNORMEN (B 3121, B 3122) festgelegten Methoden, erbrachte, selbst bei Wassersättigung im Vakuum, keine signifikanten Unterschiede zwischen verwittertem und nicht verwittertem Marmor (Tab.2). Weitaus interessantere Ergebnisse lieferten die Wasseraufnahme- und Wasserabgabeversuche. Bei nicht gefestigtem Marmor erfolgt ein Großteil der Wasseraufnahme innerhalb der ersten 20 - 30 Minuten der Wasserlagerung. Die kapillare Steighöhe innerhalb der Zeit, die für eine Steinfestigung relevant ist, beträgt rund 25 - 35 mm, deshalb kann auch in der Praxis eine vergleichbare Eindringtiefe des Festigers bei vergleichbarer Gefügeflockerung erwartet werden. Die Wasserabgabe verläuft ähnlich, jedoch aufgrund der ausgeprägten Kapillarität etwas zeitverzögert.

Das Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten wurde

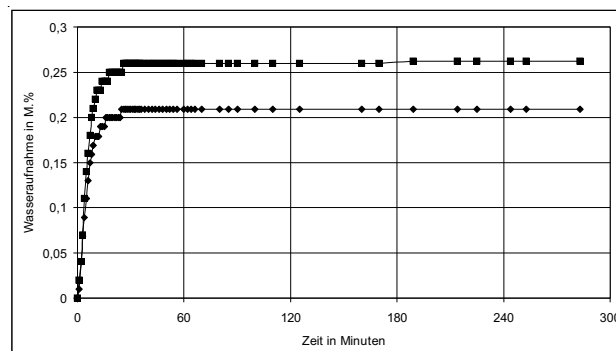


Abb. 9: Wasseraufnahmeverhalten des verwitterten, ungefestigten Marmors.

Fig. 9: Characteristic water adsorption behaviour of the weathered, not consolidated marble.

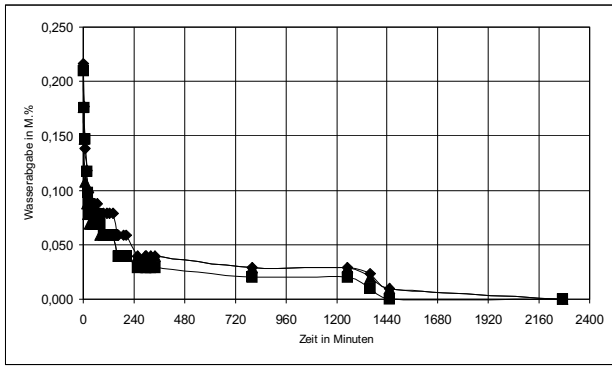


Abb. 10: Austrocknungsverhalten des verwitterten, nicht gefestigten Marmors. Der zweite Knickpunkt der Kurven zwischen 1200 und 1440 Minuten ist auf das kapillare Wasserrückhaltevermögen zurückzuführen.

Fig. 10: Characteristic dry out behaviour of the weathered, not consolidated marble.

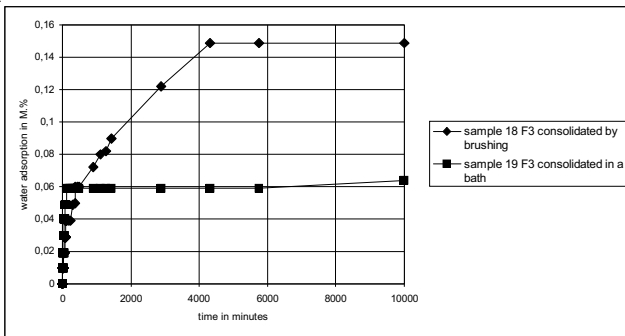


Abb. 11: Ein Beispiel für unterschiedliches Wasseraufnahmeverhalten durch unterschiedliche Festigungstechnik.

Fig. 11: Example for different water adsorption behaviour caused by different consolidation technique.

durch die Festigung grundlegend verändert. Die hydrophob eingestellten Festiger F1 und F4 führten erwartungsgemäß zu einer um 75-90 % verringerten und stark verzögerten Wasseraufnahme. Bei den mit Festiger F2 (PMMA ohne Hydrophobierung) behandelten Bohrkernen wurde das Wasseraufnahmeverhalten hinsichtlich der Quantität nicht verändert, jedoch, im Vergleich mit den nicht gefestigten

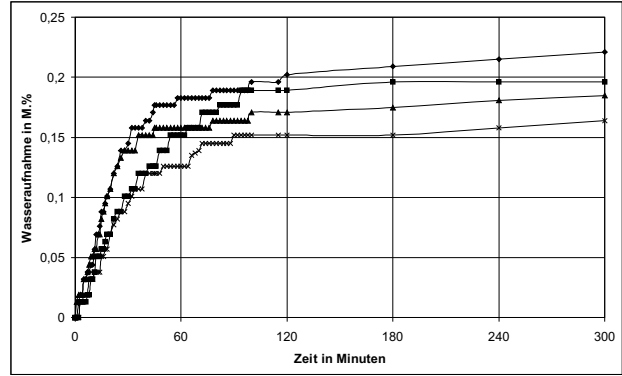


Abb. 12: Wasseraufnahmeverhalten nach Festigung mit F2.

Fig. 12: Water adsorption behaviour after consolidation with F2.

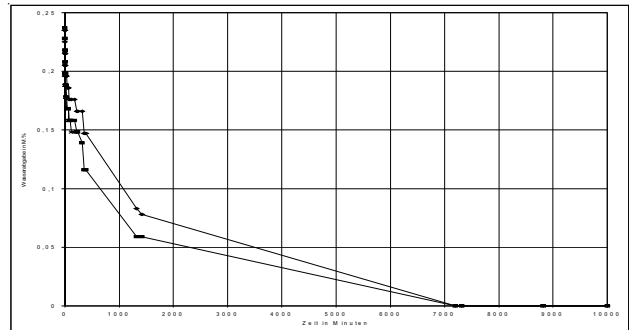


Abb. 13: Wasserabgabeverhalten nach Festigung mit F2.

Fig. 13: Dry out behaviour after consolidation with F2.

Marmorproben um mehrere Stunden verzögert. Die Abgabe des aufgenommenen Wassers wurde enorm behindert. Die Trockenmasse (luftgetrocknet bei 25 °C) wurde erst nach 117 Stunden erreicht, im nicht gefestigten Zustand bei identen Lagerungsbedingungen bereits nach 38 Stunden. Diese überaus lange Verweildauer, der mit Schadstoffen belasteten Niederschläge, wird unter Freiluftbedingungen zu Folgeschäden, zum Beispiel in Form von verstärkter Frostempfindlichkeit und chemisch induzierten Schadensprozessen (Lösung, Salzsprengung, etc.) führen. Auch Bakterien, Algen und Pilze besiedeln mit Vorliebe Gesteine mit gutem Wasserrückhaltevermögen und schädigen ihrerseits durch ihre Stoffwechselfvorgänge (z. B. Produktion von

	F1	F2	F3	F4
Eindringtiefe	2- 3 cm	2- 3 cm	2- 3 cm	2- 3 cm
US-Geschwindigkeit	verdoppelt	verdoppelt	verdoppelt	verdoppelt
Wasseraufnahme	-85 %	gleich	-58 % verzögert	-58 %
Wasserabgabe	verzögert	stark verzögert	stark verzögert	nicht verzögert
Druckfestigkeit	+30 %	+20 %	+20 %	+49 %
Spaltfestigkeit	-21 %	-40 %	-30 %	+7 %

Tab. 3: Zusammenfassende Bewertung der Steinfestiger und ihr Einfluß auf die gesteinsphysikalischen Eigenschaften.

Tab. 3: Evaluation of the stone strengthening products and their influence to the physical properties of the investigated marble.

Oxalsäuren) das Korngefüge. Die mit F3 (PMMA + Siloxan) gefestigten Bohrkerne zeigen generell ein ähnliches Bild. Die aufgenommene Wassermenge konnte um 50-75 % reduziert werden. Die Wasserabgabe bis zur Trockenmasse erfolgt in rund 150 Stunden, die Verweildauer wurde durch die Hydrophobierung also zusätzlich um rund 30 % verlängert. Auch die Art der Festigung, Lagerung im Festiger oder zweimaliges Bepinseln führte zu unterschiedlichem Wasser-aufnahme- und Austrocknungsverhalten (als Beispiel siehe Abb. 11).

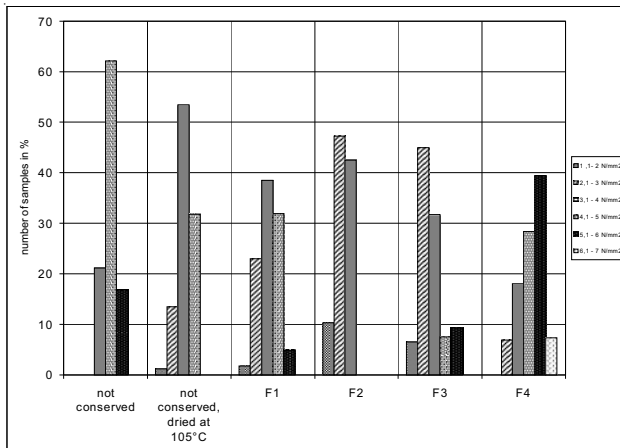


Abb. 14: Klasseneinteilung der ermittelten Spaltzugfestigkeiten (n=160).

Fig. 14: Diagram of the tension strength values (Brazilian test; n=160).

Die Bestimmung der Zylinderdruckfestigkeit und der Spaltzugfestigkeit erfolgte auf einer Prüfpresse (QTS 100) mit einer Lastaufbringung von 10N/s. Bei allen gefestigten Proben wurde eine Steigerung der Zylinderdruckfestigkeit¹² erreicht (siehe Tab. 3). Die Spaltzugfestigkeit (indirekter Zugversuch), spricht praktisch direkt die Kornbindungsfestigkeit an und führte zu alarmierend niedrigen Kennwerten der gefestigten Prüfkörper¹³. Alarmierend auch deswegen, da ein Großteil der Verwitterungsmechanismen die Zugfestigkeit eines Gesteines ansprechen und nur selten Druck- oder Biegezugfestigkeit. Diese Verringerung der Spaltzugfestigkeit, bei gleichzeitiger Erhöhung der Zylinderdruckfestigkeit, ist, verbunden mit der Ausbildung der Risse, ein Hinweis auf eine Materialversprödung. Auch die einmalige Erwärmung der Proben führte bereits zu einer deutlichen Reduktion der Spaltzugfestigkeit (siehe Abb. 14). Lediglich Steinfestiger F4 zeigte im Mittelwert praktisch keine Änderung der Spaltzugfestigkeit, jedoch stellt die Streuung der Werte von extrem schlecht bis hervorragend auch keinen befriedigenden Zustand dar.

¹² Zylinder 50x100 mm.

¹³ Zylinder 50x25 mm.

3.2. Diskussion und Ausblick

Nach der Evaluation der bis jetzt untersuchten Steinfestiger ist davon auszugehen, daß in näherer Zukunft eine Reihe von Restaurierungsproblemen auftreten werden, für die es gegenwärtig keine befriedigende Lösung geben kann¹⁴. Es hat sich aber auch gezeigt, daß ein wesentliches Problem die zum Teil extreme Verlängerung der Austrocknungszeit darstellt. Dieses Problem kann in der Konservierungspraxis relativ einfach durch den Einsatz von hydrophobierenden Steinschutzstoffen bewältigt werden. Für das Problem der Gefügeversprödung ist derzeit noch keine Lösung in Aussicht. Ein durch Simulation von Verwitterungsvorgängen (Frost-Tau-Wechsel und Salzsprengtest) erweitertes Untersuchungsprogramm wird diese ersten Ergebnisse ergänzen. Geplant ist zudem auch eine Aufstellung von gefestigten Proben im Freien, sodaß über mehrere Jahre die Möglichkeit einer Beobachtung besteht und der wesentliche Faktor Zeit, der im Labor nur sehr unzulänglich simuliert werden kann, besser verstehbar wird. Außerdem gelangten 6 zusätzliche Steinfestiger zu Einsatz. Mit den ersten Ergebnissen dieser Forschungen ist Ende 2000 zu rechnen. Vorerst wird sich eine Marmorfestigung mit gelöstem PMMA nicht vermeiden lassen, wesentlich ist aber in jedem Falle das Aufbringen einer wirkungsvollen Hydrophobierung, deren Funktion in relativ kurzen Abständen überprüft werden muß.

Literatur

- DÜLLMANN, H. (1976): Die Ermittlung der elastischen Kennwerte von Gesteinen mittels Ultraschall-Laufzeitmessungen und einaxialer Druckversuche unter besonderer Berücksichtigung einer durch das Korngefüge bedingten mechanischen Anisotropie. - Mitt. Ing.- u. Hydrogeol., 1: 1-244, 1-90 Abb., 1-15 Tab., Aachen.
- KLEBELSBERG, R. v. (1948): Tiroler Werksteine. - Veröff. d. Mus. Ferdinandeum in Innsbruck, 20/25, (1940/45), Innsbruck.
- KÖHLER, W. & SIMON, S. (1993): The Monument to Gustav II Adolf in Göteborg - Ultrasonic Investigations on the Carrara Marble Base. - Proceedings of the 3rd Workshop Göteborg, September 30 - October 3 1992, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege - Zentrallabor (Ed.), Forschungsbericht 11/1993: 117-121, München.
- KÖHLER, W. (1996): Investigations on the increase in the rate of weathering of Carrara marble in Central Europe. - Proceedings of the 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 30.9. - 4.10.1996 Berlin, Vol. I: 167-173, Berlin.
- KRAUTKRÄMER, J. & KRAUTKRÄMER, H. (1966): Werkstoffprüfung mit Ultraschall. - 1-522, 1-456 Abb., 1-10 Taf., (Springer) Berlin Heidelberg New York.
- ÖNORM B 3121 - Prüfung von Naturstein. Reindichte, Rohdichte, Schüttdichte, 1. Juni 1978.
- ÖNORM B 3122 - Prüfung von Naturstein. Wassergehalt und Wasseraufnahme, 1. September 1988.
- ÖNORM B 3124 - Teil 4 - Prüfung von Naturstein. Mechanische Gesteinseigenschaften, Einaxiale Zugfestigkeit (Spaltzugfestigkeit), 1. März 1981.
- ÖNORM B 3124 Teil 1 - Prüfung von Naturstein. Mechanische Gesteinseigenschaften, Einaxiale Zylinderdruckfestigkeit, 1. März 1981.

¹⁴ Die Produktion von Festiger F4 wurde 1998 eingestellt!

- SIEGESMUND, S., WEISS, Th., VOLLBRECH, A. & ULLEMEYER, K. (1999): Marble as a natural building stone: rock fabrics, physical and mechanical properties. - Z. dt. geol. Ges., **150**/2: 237-257, 1-12 fig., 1 tab., Stuttgart.
- SNETHLAGE, R. (1996) (Ed.): Natursteinkonservierung in der Denkmalpflege. - Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, **80**, (Ernst & Sohn) Berlin.
- TSCHEGG, E.K, WIDHALM, C. & EPPENSTEINER, W. (1999): Ursachen mangelnder Formbeständigkeit von Marmorplatten. - Z. dt. geol. Ges., **150**/2: 283-297, 1-9 Abb., Stuttgart.
- WIDHALM, C., TSCHEGG, E. K. & EPPENSTEINER, W. (1995): Anisotropic thermal expansion causes deformation of marble claddings. - Proceedings of the 5th Workshop EUROCARE - EUROMARBLE Innsbruck 1994, Forschungsbericht **15/1995**.