

Ein Laborversuchsprogramm zur Beurteilung verschiedener Arten von Steinfestigern zur Erhaltung der Sandsteinmonumente von Petra

A Laboratory Test Program for the Evaluation of Various Types of Stone Preservatives for Consolidating the Sandstone Monuments of Petra

1. Einleitung

Das gesamte Areal von Petra ist aufgrund natürlicher Schadensprozesse und mangelnder Pflege unmittelbar bedroht. Einer der wichtigsten Schadensfaktoren ist die Erosion durch Wind und Wasser. Durch die fortschreitende Verwitterung werden Steinkörnchen und größere Partikel aus den ausgesetzten Gesteinsoberflächen herausgelöst. Dieser Verlust des Oberflächenmaterials ist weitgehend entweder der Auflösung des Bindemittels, das die Steinkörnchen zusammenhält, oder der Störung von Bindungsmechanismen innerhalb der Sandpartikel aufgrund erhöhter innerer Zugspannungen zuzuschreiben.¹

Bei Versuchen, die Festigkeit des verwitterten Gesteins und die Bindung innerhalb des Kornverbandes wiederherzustellen, sind verschiedene Arten von Steinfestigern bereits eingesetzt worden. Wenn auch erwiesen ist, daß verwitterter Stein wieder gefestigt werden kann, ist die Langzeitwirkung der meisten Steinfestiger häufig unbefriedigend. In einigen Fällen wurde festgestellt, daß sie dem Gestein sogar größeren Schaden zufügen als die natürlichen Verwitterungsprozesse.²

Es wäre grob fahrlässig, bei einem Kulturdenkmal von solch hohem künstlerischem Wert und historischer Bedeutung wie Petra unerprobtes Material zu verwenden. Die Bausubstanz von Petra muß jedoch dringend behandelt werden. Deshalb sind zuverlässige Verfahren zur schnellen Auswertung möglicher Konservierungsstoffe und Steinfestiger sehr wichtig.

Universell anwendbare Schutzmittel oder Steinfestiger gibt es nicht. Doch läßt sich mit Hilfe des Testprogramms das Risiko verringern, daß Maßnahmen ergriffen werden oder Produkte zur Anwendung kommen, die ungeeignet sind.³

Das Institut für Archäologie und Anthropologie der Yarmouk Universität ist Partner des deutsch-jordanischen Projekts zur Erhaltung der Felsfassaden in Petra. Im Rahmen dieses Projekts hat das Institut Forschungen zur Erprobung und Auswertung verschiedener Steinkonservierungsmaterialien und -techniken durchgeführt, wie u. a. ein Laborversuchsprogramm zur Erprobung und Auswertung verschiedener handelsüblicher Steinfestiger.

Labortests sind deshalb wichtig, weil sich Versuche an den Objekten selbst verbieten. Wissenschaftler müssen daher vom einfachen Modell auf die komplexe Situation am Monument schließen. Die Gesteine der Monumente und deren Reaktion auf Umwelteinflüsse sind jedoch so unterschiedlich, daß nicht alle auftretenden Konservierungsprobleme nur im Laborversuch ohne Feldversuch vorweggenommen werden können.⁴ Deshalb wurden parallel zum Laborerprobungsprogramm auch Feldversuche durchgeführt.

Wenn ein Produkt untersucht wird, das bei einer bestimmten Gesteinsart angewendet werden soll, so ist es unerläßlich, Test-

1. Introduction

The entire site of Petra is under the imminent threat of destruction due to natural processes of deterioration and lack of maintenance. The constant attack of the stone monuments by various weathering agents causes the loss of stone grains and large particles from exposed surfaces. The loss of surface materials is largely attributable to processes which involve either the dissolution of the cementing material that binds the stone grains together or the disruption of intergranular bonds by increased internal tensile stresses.¹

Various types of stone preservatives have been tried in attempts to restore the integrity of decayed stone by re-establishing the bonds between the adjacent grains. While there is evidence that decayed stone can be consolidated, the long-term effectiveness of most consolidants has often been unsatisfactory. In some cases, the consolidants have been found to cause more harm to stone than natural weathering processes.²

It would be greatly irresponsible to apply any unproved material to a cultural monument of such high artistic value and historical importance like Petra. However, the architectural substance is in the most urgent need for treatment. Therefore, reliable procedures for the rapid evaluation of potential preservatives and consolidants are very essential.

A universally applicable preservative or consolidant does not exist. However, with the aid of the pre-testing program, the risk of taking unsuitable measures or products is minimized.³

The Institute of Archaeology and Anthropology at Yarmouk University is a partner of the German-Jordanian project for the preservation of the rock façades in Petra. Within the framework of that project the Institute of Archaeology and Anthropology has initiated and conducted research devoted to the testing and evaluation of various stone conservation materials and techniques. One of the programs executed is a laboratory-testing program for the purpose of testing and evaluating various types of commercially available stone consolidants.

Laboratory tests are important because the experiments cannot be carried out with the objects themselves. The scientists must conclude from the simple models to the complex situation on a monument. However, stone material of the monument and its response to the environmental influence are so different that all problems of a conservation cannot be anticipated in the laboratory experiment alone without undertaking field tests.⁴ Therefore, field testing was executed parallel with the laboratory testing program.

When one wishes to study a particular product to be applied to a certain type of stone, it is essential to run a series of tests that take into consideration the nature of the stone, its weathering behaviour and the ultimate aim of the conservation process.

reihen durchzuführen, die die Gesteinsbeschaffenheit, ihr Verwitterungsverhalten und das endgültige Ziel des Konservierungsprozesses berücksichtigen.

Dem vorliegenden Programm lag eine Versuchsanordnung zugrunde, die geeignet ist, eine Reihe vielversprechender, handelsüblicher Steinfestiger mit dem Ziel zu bewerten, ein geeignetes Material für den Schutz der durch Verwitterung bedrohten Monumente von Petra auszuwählen.

2. Leistungsanforderungen an Steinfestiger

Die wichtigste Funktion eines Steinfestigers ist die Wiederherstellung der Bindung innerhalb des geschädigten Gesteins. Dies wird durch die Einlagerung eines neuen, haltbaren Bindemittels in die Poren des verwitterten Gesteins erreicht.⁵ Außerdem sollten Steinfestiger noch weitere, genau bestimmte Anforderungen erfüllen, um den Grundsätzen und Richtlinien denkmalgerechter Konservierungen zu entsprechen.⁶ Es handelt sich dabei um folgende Anforderungen:

- 1) Gute Eindringtiefe und Ablagerung des Steinfestigers in der gesamten Schichtstärke des verwitterten Gesteins,
- 2) keine schädlichen chemischen oder physikalischen Reaktionen zwischen Steinfestiger und Gestein hervorzurufen,
- 3) Erzielung eines kontinuierlichen Festigkeitsprofils,
- 4) niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient,
- 5) Verträglichkeit mit dem natürlichen Charakter des Gesteins,
- 6) Wasserdampfdiffusionsfähigkeit und hydrophobierende Wirkung dort, wo es angebracht ist,
- 7) leichte Verarbeitbarkeit,
- 8) unbedenkliche und wirtschaftliche Anwendung,
- 9) Langzeitwirkung.

3. Material und Methode

3.1 Gesteinsmaterial

Die Gesteinsproben für diese Untersuchung stammen aus einem alten Steinbruch, den bereits die Nabatäer benutzten. Dieser Steinbruch eignet sich in idealer Weise zur Probenentnahme, da das dortige Gestein in der gleichen Weise wie die Fassaden der Monumente bearbeitet worden ist. Bohrkerne und 5 x 5 x 5 cm große Würfel wurden an verschiedenen Stellen des Steinbruchs entnommen, um alle vorhandenen Sandsteinvarietäten zu erfassen.

Steinfestigungsmittel	Handelsname	Chemische Formel	Funktion
Nr. 1	Wacker OH	Kieselsäureester	Steinfestiger
Nr. 2	Wacker H	Kieselsäureester+ Alkylalkoxysilan	Steinfestiger+ Hydrophobierungsmittel
Nr. 3	Funcosil OH	Kieselsäureester	Steinfestiger
Nr. 4	Befix	Silicate+natürliche Gesteinsprodukte	Steinhärter+ Hydrophobierungsmittel
Nr. 5	Silan Z-6070	Methyltrimethoxysilan	Hydrophobierungsmittel

This program was based on designing a test regime that could be effectively used to evaluate a series of promising commercially available stone consolidants. The aim is to select the suitable material that can be used to protect the threatened and weathered monuments of Petra.

2. Performance Requirements for Stone Consolidants

The most important function of a consolidant is to restore the cohesion of the deteriorated stone. This is achieved by the deposition of new, durable binding materials within the pores of the decayed stone.⁵ In addition, stone consolidants should fulfill other clearly defined requirements in order to be compatible with conservation ethics and guidelines.⁶ These requirements are:

- 1) Substantial penetration depth, accompanied by deposition of the consolidant to the full thickness of the weathered zone of the stone,
- 2) absence of deleterious chemical or physical interactions between the consolidant and the stone,
- 3) creation of a continuous hardness profile,
- 4) low coefficient of thermal expansion,
- 5) compatibility with the nature of the stone,
- 6) water vapour permeability/water repellence (where applicable),
- 7) ease of application,
- 8) safe and economical application,
- 9) long term effectiveness.

3. Materials and Methods

3.1 Stone Materials

The stone samples used in this study were taken from an old quarry that was used by the Nabataeans. The quarry is ideal for taking experimental samples as the stone there was treated in the same way as the façades of the monuments. Drill cores and 5 x 5 x 5 cm cubes were taken from different locations of the quarry to represent all varieties of sandstone existent.

Consolidant	Commercial name	Chemical nature	Function
No. 1	Wacker OH	Silicic acid ester	Stone strengthener
No. 2	Wacker H	Silicic acid ester+ alkylalkoxysilane	Stone strengthener + water repellent
No. 3	Funcosil OH	Silicic acid ester	Stone strengthener
No. 4	Befix	Silicate + natural stone products	Stone hardener + water repellent
No. 5	Silane Z-6070	Methyl trimethoxy silane	Water repellent

3.2 Steinfestiger

Für die Auswertung in der vorliegenden Untersuchung wurden fünf Materialien ausgewählt, die für die Steinfestigung geeignet zu sein scheinen. Es sind handelsübliche Materialien, die von Herstellern und Großhändlern in Europa bezogen wurden. Die Materialien wurden gemäß der Herstellerangaben mit einem Pinsel aufgetragen oder aufgesprüht und anschließend ausgehärtet oder getrocknet. Die vorangestellte Tabelle gibt die allgemeine chemische Struktur der ausgewählten Materialien wieder.

Wacker OH und Wacker H sind Produkte der Firma Wacker-Chemie GmbH, Deutschland. Funcosil wird von der Firma Remmers Bauchemie GmbH, Deutschland, hergestellt. Befix ist ein Produkt der Firma Snoway in Österreich. Silan Z-6070 ist ein Produkt der Firma Dow Corning, USA.⁷

3.3 Laborversuchsprogramm

Es wurde eine Serie von Labortests sorgfältig ausgearbeitet und durchgeführt, um messen und auswerten zu können, in welchem Maße die zu untersuchenden Steinfestiger den vorgegebenen Anforderungen genügen. Diese Tests umfassen:

3.3.1 Eindringtiefe

Bei dieser Untersuchung wurden Bohrkerne mit einem Durchmesser von 4.1 cm und bekanntem Gewicht verwendet. Die Aufnahme des Steinfestigers durch das Gestein erfolgte durch Kapillarwirkung. Die Bohrkerne wurden auf Schwämme gesetzt, die mit den verschiedenen Mitteln getränkt waren. Die Gewichtszunahme und Steighöhe des Steinfestigers wurde als Funktion der Zeit ermittelt und Messungen nach 30, 60, 120, 300, 600, 1200, 1800 und 2400 Sekunden vorgenommen.

3.3.2 Wasseraufnahme

Die Auswirkungen der verschiedenen Steinfestiger auf die Wasseraufnahmefähigkeit des Gesteins wurde in zwei Tests ermittelt:⁸

a) Kapillare Wasseraufnahme

Die Messung der kapillaren Wasseraufnahme wurde nach DIN 52617 durchgeführt. Die Bohrkerne wurden durch Aufsprühen der verschiedenen Steinfestiger behandelt, während unbehandelte Bohrkerne als Kontrollproben dienten. Jede einzelne Probe wurde auf eine wassergetränkte Unterlage gestellt, wobei das Wasser nur durch die Unterseite der Probe eindringen konnte. Nach jeweils 30, 60, 120, 300, 600, 1800, 2400 und 6000 Sekunden wurden der Wasserspiegel und die aufgesogene Wassermenge gemessen und die Steighöhe als auch die Gewichtszunahme notiert.

b) Wasserabsorption unter atmosphärischem Druck

Um die Wasserabsorption unter atmosphärischem Druck zu messen, wurden die Proben (5 x 5 x 5 cm) in Wasser getaucht. Die Absorption wurde als prozentuale Gewichtszunahme aufgezeichnet. Die Meßwerte wurden jeweils nach 10, 30 und 60 Minuten sowie nach 24 Stunden notiert.

3.3.3 Wasserdampfabsorptions-Isotherme

Die Testverfahren wurden nach DIN 52620 durchgeführt. Von jeder Probe wurden sieben Scheiben von etwa 7 bis 10 mm Dicke entnommen und in Klimakammern bei einer Temperatur von 20 °C unterschiedlichen relativen Feuchtigkeitswerten ausgesetzt: 32 % (CaCl₂), 45 % (K₂CO₃), 76 % (NaCl), 86 % (KCl) und 98 % (CuSO₄·5H₂O). Die Gewichtszunahme wurde alle 24

3.2 Consolidating Materials

Five materials that have been claimed to be useful for consolidating stone were selected for evaluation in this study. These materials are commercially available and were obtained from producers and distributors in Europe. The materials were applied with a brush or sprayed and then cured or dried according to manufacturers' recommendations. The selected materials with their general chemical structure are listed in the preceding table.

Wacker OH and Wacker H are products of Wacker-Chemie GmbH, Germany. Funcosil OH is a product of Remmers Bauchemie GmbH, Germany. Befix is a product of Snoway, Austria. Silane Z-6070 is a product of Dow Corning, USA.⁷

3.3 Laboratory Testing Program

A series of laboratory tests were carefully designed and applied to measure and evaluate to what degree the studied stone consolidants fulfill the pre-set requirements. These tests are:

3.3.1 Depth of Penetration

Drill cores with 4.1 cm diameter and known weights were used in this test. The consolidant was added to the stone by capillary rise method. The drill cores were placed on the top of a sponge saturated with different consolidants. The weight increase and rising height of the consolidant were recorded as a function of time. Readings were taken after 30, 60, 120, 300, 600, 1200, 1800, and 2400 seconds.

3.3.2 Water Absorption

The impact of treatment of various consolidants on the ability of the stone to absorb water was measured by two tests:⁸

a) Capillary Water Absorption

The capillary water absorption test was performed according to DIN 52617. Drill cores were treated with the different consolidants by spraying. Some untreated cores were kept as a control. Each test sample was individually placed on top of a water-saturated pad to allow water to penetrate from the bottom surface of the samples only. After 30, 60, 120, 300, 600, 1800, 2400 and 6000 seconds the level of water and the amount of water sucked up were measured and recorded by height and weight increase.

b) Water Absorption under Atmospheric Pressure

To measure water absorption under atmospheric pressure specimens (5 x 5 x 5 cm) were immersed into water. The absorption was recorded as percentage increase in weight. Readings were recorded after 10, 30, and 60 minutes and after 24 hours.

3.3.3 Water Vapour Absorption Isotherm

The testing procedures were applied according to DIN 52620. Seven slices with a thickness of about 7 to 10 mm from each sample were taken and subjected to different relative humidity values, 32 % (CaCl₂·6H₂O), 45 % (K₂CO₃), 76 % (NaCl), 86 % (KCl) and 98 % (CuSO₄·5H₂O) in climatic chambers, at a temperature of 20 °C. The weight increase is recorded every 24

Stunden bis zum Erreichen eines Konstantwertes aufgezeichnet. Diese Behandlung erfolgte über eine Dauer von 1 bis 23 Tagen je nach verwendetem Steinfestiger.

3.3.4 Wasserdampfdiffusion

Diese Untersuchung wurde nach DIN 52615 anhand von sechs Proben durchgeführt. Von jeder Probe wurden jeweils zwei Scheiben von etwa 7 bis 10 mm Dicke, eine für die dry-cup- und eine für die wet-cup-Messung entnommen. Für jede Probe wurden spezielle Schalen mit weitem Hals verwendet. Der eine Behälter wurde bis zu etwa einem Drittel mit einem Trocknungsgel (dry-cup) gefüllt, der andere mit destilliertem Wasser (wet-cup). Anschließend wurden die Scheiben am Hals der Becher mittels einer Paste abgedichtet, um einen Transport von Wasserdampf zwischen Gesteinsscheibe und Glas zu verhindern. Anschließend wurde der Becher in einen Glas-Exsikkator gestellt, der mit einer gesättigten Lösung von Kaliumcarbonat (K_2CO_3) gefüllt ist, um eine konstante relative Luftfeuchte von 45 % sicherzustellen. Alle 24 Stunden wurde die Gewichtszunahme gemessen, bis keine Zunahme mehr zu verzeichnen war.

3.3.5 Salzkristallisationstest

Bei diesem Test, der nach DIN 5211 erfolgte, wurden fünf Bohrkern verwendet. Behandelte und unbehandelte Proben wurden für die Dauer von 16 Stunden in eine Natriumsulfatlösung gelegt, wobei sie nicht mehr als 1 cm tief in die Lösung eingetaucht wurden. Die Proben wurden anschließend aus der Lösung genommen und in einem Ofen 5 Stunden lang bei 110 °C erhitzt. Jeweils ein Tauch- und Erhitzungsvorgang wurde als ein Zyklus bezeichnet. Die Proben wurden einer Serie von Zyklen ausgesetzt, nach jedem Zyklus visuell beurteilt und die Gewichtsverluste bestimmt. Während eines Zyklus wird das Natriumsulfat kristallisiert, hydratisiert und dehydratisiert. Bei jedem Zyklus wurden von dem Stein weitere Mengen Salz aufgenommen, wodurch der zerstörerische Kristallisationsdruck gesteigert wurde. Diese Behandlung dauerte 1–30 Tage.

3.3.6 Mechanische Festigkeit des behandelten Steins

a) Druckfestigkeitsmessungen

Die Druckfestigkeit wurde in Anlehnung an DIN 1164 gemessen. Die zu untersuchenden Steinfestiger wurden auf jeweils zwei gleiche Gesteinsprismen mit den Abmessungen 65 x 150 x 25 mm aufgebracht, während vom unbehandelten Gestein ebenfalls Doppelpismen angefertigt wurden. Die Druckfestigkeit wurde mittels einer hydraulischen Presse gemessen (Maximaldruck 10 T).

b) Biaxiale Biegefestigkeit

Behandelte und unbehandelte Bohrkern wurden in Scheiben von 5 mm Dicke unterteilt. Die mechanische Festigkeit wurde für jede Scheibe getrennt bestimmt.⁹

3.3.7 Widerstandsfähigkeit gegen Frostschäden

In diesem Versuch wurde die Wirksamkeit verschiedener Gesteinsbehandlungen zur Verbesserung der Frostbeständigkeit nach DIN 52104 untersucht. Proben, die mit verschiedenen Steinfestigern behandelt worden waren sowie unbehandelte Kontrollproben wurden für die Dauer von vier Stunden einem schnellen Gefrierprozess bei -25 °C unterzogen, und die gefrorenen Proben anschließend zum Auftauen bei 15 °C in Wasser gelagert. Diese Zyklen wurden kontinuierlich wiederholt und der jeweilige Gewichtsverlust aufgezeichnet.

hours till there is no more increase in weight. The application process took 1–23 days according to the consolidant being applied.

3.3.4 Water Vapour Permeability

The test was carried out according to DIN 52615. Six samples were used; from each sample, two slices, about 7 to 10 mm thick, one for dry-cup and the other for wet-cup, were taken. For each sample special cups with a wide neck were used. One cup was filled (about one third) with a drying gel (dry-cup) and the other cup with distilled water (wet-cup). After that, the slices were fixed onto the neck of the cups by using a paste to prevent the transportation of the water vapour in between the slice and the glass. Then the cups were put in a glass dissector containing a saturated solution of potassium carbonate (K_2CO_3) to establish a constant relative humidity of 45 %. The weight increase was recorded every 24 hours till there was no more increase.

3.3.5 Salt Crystallization Test

The test was carried out according to DIN 5211. Five drill cores were used in this test. Treated and untreated samples were immersed in a sodium sulfate solution for 16 hours, not deeper than 1 cm. Samples were then removed from the solution and heated in an oven for 5 to 7 hours at 110 °C. A one time soaking and heating procedure was considered to be one cycle. The specimens were subjected to a series of cycles; after each cycle they were examined visually and weight losses were determined. During one cycle, sodium sulfate undergoes crystallization, hydration and dehydration. By each cycle additional amounts of salts were absorbed by the natural stone, increasing the disruptive crystallization pressures. The application process took 1–30 days.

3.3.6 Mechanical Strength of the Consolidated Stone

a) Compressive Strength Measurements

Compressive strength measurements were carried in accordance with DIN 1164. The tested consolidants were applied to duplicate prism specimens of stone, 65 x 150 x 25 mm. Duplicate prism specimens of untreated stone were also tested. The compressive strength was measured under a hydraulic press (maximum compression 10 T).

b) Biaxial Flexural Strength

Treated and untreated drill cores were cut into thin slices of a thickness of 5 mm. The mechanical strength of each slab is determined separately.⁹

3.3.7 Resistance to Freeze-Thaw Damage

This test was done to evaluate the effectiveness of different consolidation treatments to improve frost damage resistance of the stone. The tests were performed according to DIN 52104. Samples treated with different consolidants in addition to a control untreated sample were subjected to rapid freezing to -25 °C during a period of four hours, followed by storage of frozen sample in water at 15 °C. The cycles were continuously repeated and weight loss of the samples was recorded.

4. Ergebnisse und Diskussion

Auswertung des Eindringvermögens der Steinfestiger

Die Aufnahme des jeweiligen Steinfestigers wurde als Gewichtszunahme der Bohrproben in Abhängigkeit von der Zeit, während der sie mit der Festigerlösung in Kontakt waren sowie durch Messung der Höhe, die die Festigerlösung in der Probe erreicht hatte, aufgezeichnet. Das Eindringvermögen der verschiedenen Steinfestiger ist in Abbildung 1 dargestellt: Wacker H > Silan > Wacker OH > Funcosil > Befix. Dieses Ergebnis läßt sich durch die Unterschiede in den chemischen und physikalischen Eigenschaften der verschiedenen Steinfestiger erklären. Das geringe Molekulargewicht und die geringe Viskosität der Ethylsilikate und des Silans ermöglicht gute Eindringwerte. Befix auf Wasserbasis zeigte das geringste Eindringvermögen, was hauptsächlich auf die hohe Partikelgröße dieses Materials zurückzuführen ist.

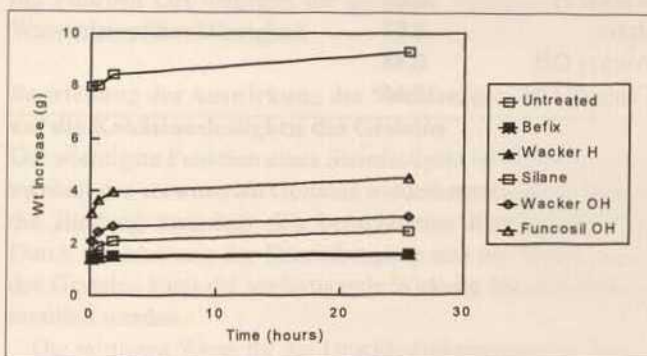


Abb. 1. Wasserabsorption der behandelten und unbehandelten Proben

Es ist bekannt, daß das Endergebnis der Gesteinszerstörung, ganz gleich, welcher Zerstörungsmechanismus am Werk ist, das Fehlen des Bindemittels in der zerstörten Gesteinszone ist. Aufgrund dieses Bindemittelmangels ist die zerstörte Gesteinschicht poröser und hat eine geringere Festigkeit als die gesunden Gesteinsschichten. Für gewöhnlich werden dann sehr brüchige, manchmal völlig bindemittellose, sandende Zonen vorgefunden.

Eines der Hauptziele der Steinfestigung ist das tiefe Einbringen von neuem Bindemittel in die verwitterte Zone. Um dies zu erreichen, sollte der Steinfestiger ein gutes Eindringvermögen besitzen. Der Steinfestiger ist dann nicht geeignet oder sogar schädlich, wenn er lediglich eine Schale ausbildet, anstatt die gesamte brüchige Zone vollständig zu festigen. Die Bildung einer Schale wird später zu Ablösungen führen; eine typische Begleiterscheinung bei der Behandlung mit organischen Harzen, die deshalb nicht mehr zulässig ist. Steinfestiger mit geringem Eindringvermögen sollten daher ausgeschlossen und schon aus diesem Grund abgelehnt werden.

Wirkung der Steinfestigung auf die kapillare Wasserabsorption des Gesteins

Der wichtigste Wasserabsorptions-Mechanismus bei den Steinmonumenten Petras beruht auf Kapillarkwirkung. Unter dem Einfluß der Kapillarkräfte wird das Wasser vom porösen Gestein aufgesogen.

Die kapillare Wasseraufnahme des Sandsteins in Petra ist ziemlich hoch, kann jedoch variieren. Dies ergibt sich aus den hohen, wenn auch unterschiedlichen Wasseraufnahmekoeffi-

4. Results and Discussion

Evaluation of the Penetration Depth of the Consolidants

The results of the consolidant uptake were recorded as weight increase with time of the stone samples being in contact with the consolidant solutions and by measuring the increase in the distance travelled upward by the consolidant. The penetration ability of the various consolidants is shown in figure 1.: Wacker H > Silane > Wacker OH > Funcosil > Befix. The obtained results could be explained based on the difference in the chemical and physical properties of the different consolidants. The low molecular weight and low viscosity of the ethylsilicates and Silane enable them to achieve good penetration levels. The water-based Befix has the lowest ability to penetrate. This is mainly due to the large particle size of the basic components forming this material.

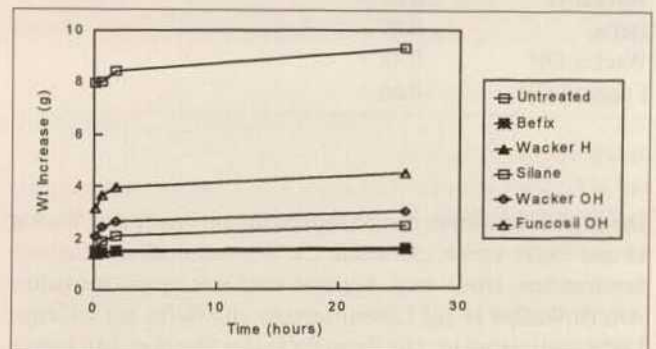


Fig. 1. Water absorption of treated and untreated samples

It is a well-known fact that the ultimate result of the deterioration of stone irrespective of the deterioration mechanism responsible is the lack of stone binder in the destroyed zone. Due to the lack of the binder, the destroyed stone layer will have a higher porosity and a smaller strength than the sane core of the stone. Very friable, sometimes completely binder-less sanding zones are usually to be found.

One of the major aims of the stone consolidation is to deposit new binding material deep in the weathered zone. To achieve this aim, the consolidant should have a high penetration power. The stone consolidation is wrong, even damaging, if a shell is being formed instead of completely strengthening the friable zone. The shell formation will result in posterior spallings; a typical phenomenon for a treatment with organic resins that is not accepted any more due to that reason. Therefore consolidants with low penetration power should be excluded and could be rejected on this ground alone.

Effect of the Consolidation Treatment on the Capillary Water Absorption of the Stone

Capillary rise is the most important water absorption mechanism of the monuments of Petra. Under the influence of capillary forces the water imbibes into the porous stone.

The capillary water uptake of the sandstone of Petra is quite high, but variable. This is shown by the high and varied water absorption coefficients of different samples of untreated sandstone samples taken from the quarry. The calculated w values range

zienten verschiedener unbehandelter Sandsteinproben aus dem Steinbruch. Die berechneten w-Werte liegen im Bereich von 3.26 bis 7.69 kg/m²h^{0.5}. Dies ist hauptsächlich auf die unterschiedlichen Sandsteinarten und das unterschiedliche Ausmaß der Verwitterung zurückzuführen.

Es hat sich herausgestellt, daß alle Steinfestiger die kapillare Wasserabsorption des Sandsteins von Petra herabsetzten, wobei jedoch das Ausmaß erheblich schwankt. Die Berechnung des Wasseraufnahmekoeffizienten (Tab. 1) gibt die Reihenfolge der Reduktion durch die Steinfestiger wie folgt wieder: Wacker H = Befix > Silan > Wacker OH > Funcosil OH > unbehandelt.

Tabelle 1. Wasserabsorptionskoeffizient von Proben, die mit verschiedenen Steinfestigern behandelt wurden

Probe	w-Wert (kg/m ² (h))
Unbehandelt	4.45
Silan	0.12
Wacker H	0.07
Befix	0.07
Wacker OH	0.48
Funcosil OH	0.66

Die größte Reduktion der Wasserabsorption wurde mit Wacker H und Befix erzielt, die beide die Wasseraufnahme drastisch herabsetzten. Diese zwei Systeme sind von unterschiedlicher Art, da Wacker H auf Lösemittelbasis und Befix auf wäßriger Lösung aufgebaut ist. Die Rezeptur beider Mittel enthält jedoch wasserabweisende Zusätze. Wacker H übt seine hydrophobierende Wirkung aufgrund des Alkoxysilan-Bestandteils aus. Alkoxysilane haben den Vorteil, daß sie dem Gestein ihren Hydrophobierungs-Effekt über ihre Alkylgruppe, in den meisten Fällen eine Methylgruppe, vermitteln. Dies erklärt die Verringerung in Wasserabsorption, wenn Silan getrennt, ohne den Kieselsäureester, angewandt wird. Befix ist eine wäßrige Lösung, die aus einem organischen Teil und einem reaktiven Silikatanteil besteht. Der reaktive Silikatanteil reagiert mit den löslichen Calcium- und Magnesium-Ionen der Gesteinsoberfläche, wohingegen die organischen Bestandteile den hydrophobierenden Effekt verursachen.

Die OH Kieselsäureester, sowohl bei Wacker OH als auch bei Funcosil OH, haben, verglichen mit den anderen Systemen eine verhältnismäßig geringfügige hydrophobierende Wirkung. Diese beiden Festiger können durch die Ablagerung von Silika-Gel in den Gesteinsporen dem verwitterten Gestein Festigkeit verleihen. Sie enthalten jedoch keine chemischen Gruppen mit wasserabweisender Wirkung. Ihr hydrophobierender Effekt kann von der geringeren Porosität des Gesteins aufgrund der Ablagerung von Silika-Gel herrühren. Deshalb können diese beiden Festiger immer noch zu einem beträchtlichen Teil die Wasseraufnahme herabsetzen, wie aus den dargestellten Ergebnissen ersichtlich ist (Abb. 1).

Die Ergebnisse zeigen, daß der Hauptanteil des Wassers, den die Proben insgesamt aufnehmen können, innerhalb der ersten zehn Minuten des Versuchs aufgenommen wird. Das bedeutet, daß sich die meisten Gesteinsporen bei Niederschlag innerhalb der ersten Minuten mit Wasser füllen. Es besteht kein Zweifel, daß alle erprobten Steinfestiger die Neigung der Poren, Wasser aufzunehmen, herabsetzten. Hierbei sind diejenigen mit hydrophobierendem Effekt (Wacker H, Befix und Silan) überlegen.

from 3.26 to 7.69 kg/m²h^{0.5}. This is mainly due to the difference in the nature of the sandstone and due to the different extent of weathering that the stones suffered.

It has been found that all the consolidants have decreased the capillary water absorption of the sandstone of Petra. However, the magnitude of that decrease varies. The calculated water absorption coefficients (table 1) indicate that the order of reduction was: Wacker H = Befix > Silane > Wacker OH > Funcosil OH > untreated.

Table 1. Water absorption coefficients of samples treated with various consolidants

Sample	w-Value (kg/m ² (h))
Untreated	4.45
Silane	0.12
Wacker H	0.07
Befix	0.07
Wacker OH	0.48
Funcosil OH	0.66

The largest decrease in water absorption was observed in the case of Wacker H and Befix. They both reduced the water uptake drastically. The two systems are of different nature since Wacker H is a solvent base while Befix is an aqueous base. However, both contain as part of their formulation hydrophobing groups. Wacker H imparts its water repellence effect due to its alkoxy-silane component. Alkoxysilanes have the advantage of imparting a degree of water repellence to the stone by virtue of their alkyl group which is a methyl group in most cases. This explains the reduction in water absorption when the Silane is used separately without the silicic acid ester. Befix is an aqueous solution consisting of an organic part and of a reactive silicate part. The reactive silicate part reacts with the dissolved calcium and magnesium ions of the stone surface while its organic part imparts a hydrophobing effect.

The OH silicic acid esters, both Wacker OH and Funcosil OH, have a relatively low hydrophobing power when compared with the other systems. These two consolidants can impart a strengthening effect on the weathered stone by the deposition of silica gel within the stone pores. However, they contain no chemical groups, which might impart water repellence. Their hydrophobing effect may result from the decrease in the porosity of the stone due to the deposition of silica gel. Therefore, both consolidants can still reduce the water absorption to a considerable extent as shown by the obtained results (fig. 1).

The obtained result shows that all samples absorbed most of the water that they can contain in the first ten minutes of the test. This means that in the first minutes of rain most of the pores of the stone are filled with water. It is quite clear that all the tested consolidants reduce the stone affinity for water. Those that have water repellence characteristics (Wacker H, Befix and Silane) are more effective in that regard.

Untersuchung der Wasserdampfdurchlässigkeit (Wasserdampfdiffusion)

Die Fähigkeit eines Steinfestigers, das Material nach der Behandlung auch „atmen“ zu lassen, ist eine der wichtigsten geforderten Eigenschaften. Wenn die Behandlung die Wasserdampfdurchlässigkeit behindert, wird die Trocknung verzögert und die Salzkristallisation findet innerhalb des Porenraums an der Grenze „behandelt-unbehandelt“ statt.

Die Gewichtsveränderung der Proben in Abhängigkeit von der Zeit in den wet-cup- und dry-cup-Versuchen wurde zur Beurteilung der Auswirkung der verschiedenen Mittel auf die Wasserdampfdurchlässigkeit des Gesteins herangezogen. Die Wasserdampfdurchlässigkeit wurde in kg/m^2 errechnet und in Abbildung 2 dargestellt.

Die Ergebnisse beweisen, daß die Behandlung mit den verschiedenen Steinfestigern eine Abnahme der Gesteinsdurchlässigkeit bewirkt, die jedoch nicht nennenswert ist. Die Behandlung mit Wacker H bewirkte die größte Herabsetzung (28 %), mit Funcosil OH hingegen die geringste Abnahme (8 %) der Wasserdampfdurchlässigkeit.

Beurteilung der Auswirkung der Steinfestiger auf die Kohäsionsfestigkeit des Gesteins

Die wichtigste Funktion eines Steinfestigers ist es, den Zusammenhalt des verwitterten Gesteins wiederherzustellen, indem er die Bindung zwischen den benachbarten Körnern erneuert. Durch die Messung der Druckfestigkeit und des Bruchmodulus des Gesteins kann die verfestigende Wirkung der Steinfestiger ermittelt werden.

Die mittleren Werte für die Druckfestigkeitsversuche sind in Tabelle 2 zusammen mit dem prozentualen Anstieg der Druckfestigkeit in den Gesteinsproben dargestellt.

Tabelle 2. Druckfestigkeit unbehauelter und behauelter Sandsteinproben

Probe	Druckfestigkeit (MPa)	Prozentuale Steigerung der Druckfestigkeit
Unbehandelt	16.78	–
Behandelt mit Wacker H	30.23	80
Behandelt mit Wacker OH	28.37	69
Behandelt mit Funcosil OH	27.68	64.9
Behandelt mit Befix	29.14	73
Behandelt mit Silan	25.22	50

Die erzielten Ergebnisse zeigen, daß die Behandlung mit Wacker H den größten Anstieg der Druckfestigkeitswerte erzielte, die Behandlung mit Silan jedoch den geringsten. Es ist jedoch offensichtlich, daß alle Steinfestiger die Druckfestigkeit des Gesteins wirksam verbesserten. Der Anstieg der Druckfestigkeit in den Proben, die mit Wacker OH und Funcosil OH behandelt wurden, ist durchaus vergleichbar. Dieses beruht darauf, daß diese Mittel Kieselsäureester als reaktive Bestandteile enthalten, die für die Verfestigung des Gesteins verantwortlich sind. Kieselsäureester wirken als Steinfestiger durch die Ablagerung von Silicagel, einem natürlichen Gesteinsbindemittel, in den Poren des verwitterten Gesteins, wodurch die Kohäsionsfestigkeit verbessert wird. Befix verdankt seine verfestigende Wirkung ei-

Investigation into the Water Vapour Permeability (Water Vapour Diffusion)

The ability of a consolidant to allow the material in which it is used to 'breathe' is one of its most important characteristics. If the consolidating treatment hinders the water vapour permeability, the drying rate will be reduced and salt crystallization will take place in the interior of the pore space at the transition zone 'treated-untreated'.

The change in the weight of the sample with time in the wet-cup and dry-cup experiments was used to evaluate the impact of treatment with different consolidants on the stone permeability to water vapour. The permeability of stone was calculated and expressed in kg/m^2 as shown in figure 2.

It is quite evident from the results that the treatment of the stone with the different consolidants brings about a decrease in the permeability of the stone. However the decrease in permeability results from the treatment is not remarkable. The largest decrease in water vapour permeability was caused by treatment with Wacker H (28 %) while the lowest decrease was caused by treatment with Funcosil OH (8 %).

Evaluation of the Efficiency of Consolidants Concerning the Cohesion Strength of the Stone

The most important function of a consolidant is to restore the integrity of decayed stone by re-establishing the bonds between adjacent grains. The measurement of compressive strength of the stone and the modulus of rupture can evaluate consolidating abilities of the stone consolidants.

The average test results obtained from the compressive test are presented in table 2 together with the increase in percent of compressive strength observed in treated samples.

Table 2. Compressive strength of untreated and treated sandstone samples

Sample	Compressive strength (MPa)	% Increase in compressive strength
Untreated	16.78	–
Treated with Wacker H	30.23	80
Treated with Wacker OH	28.37	69
Treated with Funcosil OH	27.68	64.9
Treated with Befix	29.14	73
Treated with Silane	25.22	50

The obtained results show that treatment with Wacker H provided the greatest increase in compressive strength, while the treatment with Silane provided the smallest increase. However it is quite evident that all the test stone consolidants were effective in improving the compressive strength of the stone. The increase in the compressive strength of the samples treated with Wacker OH and Funcosil OH is quite comparable. This because these consolidants contain silicic acid esters as the reactive components that are responsible for the consolidation of the stone. Silicic acid esters act as stone consolidants by depositing silica gel, the natural stone binder within the pores of the weathered stone leading to an improvement in its cohesion strength. Befix imparts its consolidation strength by a different mechanism. Its reactive in-

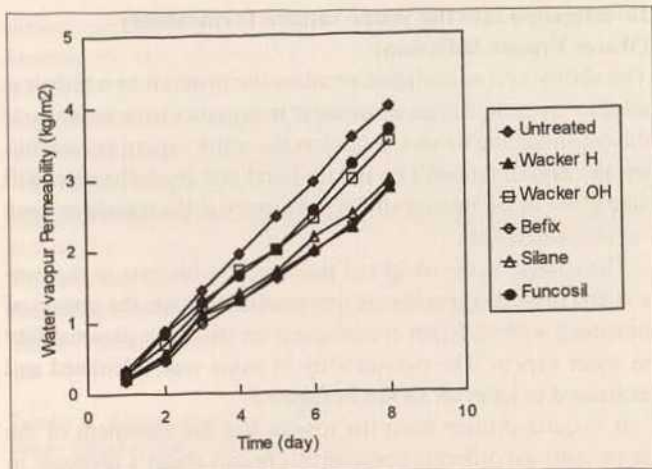


Abb. 2. Wasserdampfdurchlässigkeit behandelter und unbehandelter Gesteinsproben

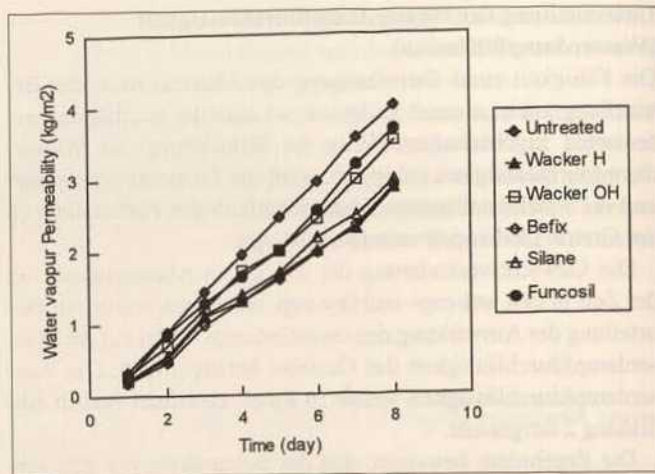


Fig. 2. Water vapour permeability of treated and untreated samples

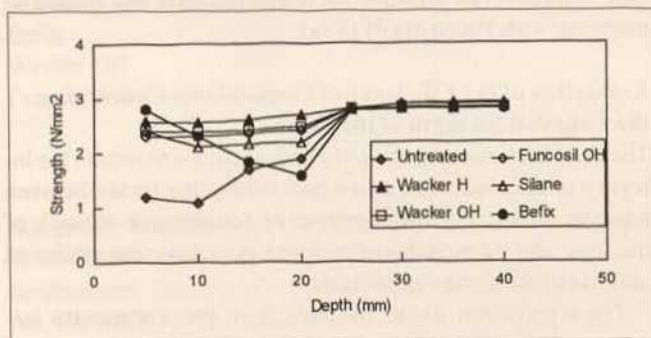


Abb. 3. Festigkeitsänderungen als Funktion der Eindringtiefe bei behandelten und unbehandelten Bohrkernen

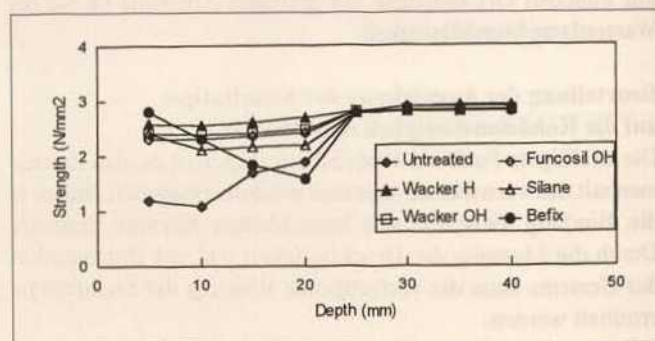


Fig. 3. Variation of strength as a function of the penetration depth of treated and untreated drill cores

nem anderen Mechanismus: Seine reaktiven inorganischen Bestandteile reagieren mit den gelösten Calcium- und Magnesium-Ionen des verwitterten Gesteins, wodurch neue, stabile Silikatverbindungen gebildet werden (Abb. 3).

Aus der obigen Darstellung geht klar hervor, daß das Gestein bis in 25 mm Tiefe verwittert ist. Eine erfolgreiche Festigung dieses Gesteins bedeutet, daß der Kornverband der verwitterten Zone wiederhergestellt ist. Mit anderen Worten, die mechanischen und physikalischen Eigenschaften sollten auf das Niveau des gesunden Gesteinskerns angehoben werden. Wie Abbildung 3 zeigt, wird eine deutliche Verbesserung der Festigkeit der verwitterten Zone und ein weitgehend gleichmäßiges und ausgeglichenes Festigkeitsprofil durch die Behandlung mit Wacker H erzielt. Die Behandlung mit Wacker OH und Funcosil ergibt gleichmäßige Festigkeitsprofile bei geringerer Verbesserung der Festigkeit der verwitterten Zone. Die Verfestigung mit Befix ergibt eine hohe mechanische Festigkeit an der Oberfläche. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Festigkeit jedoch plötzlich ab. Dies ist hauptsächlich auf die ungenügende Eindringtiefe des Mittels zurückzuführen. Wenn der Steinfestiger nicht ausreichend tief eindringt, wird eine künstliche Kruste gebildet, die nur eine lose Bindung zum inneren, gesunden Gesteinskern aufweist.

Widerstand der behandelten Proben gegen Salzkristallisation

Die Hauptursache für die Gesteinsverwitterungen in Petra ist die Auskristallisierung von Salzen in den Gesteinsporen. Wieder-

organisch reagiert mit den gelösten Calcium- und Magnesium-Ionen des verwitterten Gesteins. Dies führt zur Bildung neuer stabiler Silikatverbindungen (Abb. 3).

Es ist ganz klar aus der obigen Abbildung, daß das Gestein bis zu einer Tiefe von ca. 25 mm verwittert ist. Eine erfolgreiche Festigung dieses Gesteins bedeutet, daß die Integrität der verwitterten Zone wiederhergestellt ist. In anderen Worten, die mechanischen und physikalischen Eigenschaften sollten auf das Niveau des intakten Gesteinskerns verbessert werden. Wie in Abbildung 3 dargestellt, führt die Konsolidierung mit Wacker H zu einer deutlichen Verbesserung der Festigkeit der verwitterten Zone und erzeugt ein eher gleichmäßiges und ausgeglichenes Festigkeitsprofil. Die Konsolidierung mit Wacker OH und Funcosil ergibt gleichmäßige Festigkeitsprofile, bringt jedoch eine geringere Verbesserung der Festigkeit der verwitterten Zone mit sich. Die Verfestigung mit Befix ergibt eine hohe mechanische Festigkeit an der Oberfläche. Allerdings nimmt die Festigkeit mit zunehmender Tiefe plötzlich ab. Dies ist hauptsächlich auf die unzureichende Eindringtiefe des Konsolidans zurückzuführen. Eine unzureichende Eindringtiefe des Konsolidans führt zur Bildung einer künstlichen Kruste, die nur eine lockere Bindung zum inneren, intakten Gesteinskern aufweist.

Resistance of the Treated Samples to Salt Crystallization

The most important cause of stone decay in Petra is the crystallization of salts within the pores of the stone. The repeated crys-

holte Kristallisation dieser Salze bewirkt ein Absanden oder Blasenbildung sowie die Bildung tiefer Aushöhlungen der Oberfläche. Es ist daher besonders wichtig zu untersuchen, in welchem Maße Steinfestiger die Widerstandsfähigkeit des Gesteins gegen Salzkristallisationsschäden zu erhöhen vermögen.

Die Widerstandsfähigkeit der verschiedenen beim Salzkristallisationsversuch verwendeten, behandelten und unbehandelten Proben wurde nach jedem Zyklus durch visuelle und mikroskopische Untersuchung bestimmt und der Gewichtsverlust der Proben registriert.

Die Überprüfung des Zustandes der Proben im Verlauf des Versuchs zeigt, daß alle Steinfestiger den Widerstand des Gesteins gegen Schäden durch Salzkristallisation verbesserten. Lediglich die unbehandelte Probe war bereits zu Versuchsbeginn in einem schlechten Zustand. Die ersten Anzeichen von Verwitterung und Auflösung zeigten sich bei den behandelten Proben erst nach dem 7. Zyklus und traten deutlicher in Erscheinung bei den mit Silan, Befix und Wacker OH behandelten Proben. Die mit Wacker H und Funcosil OH behandelten Proben erwiesen sich als verwitterungsresistenter, da sie lediglich in den Spätphasen des Versuchs Abblätterscheinungen und Schuppenbildung aufwiesen.

Widerstand gegen Frostschäden

Sowohl bei unbehandelten als auch bei behandelten Proben wurden nach 25 Zyklen keine meßbaren Veränderungen festgestellt. Dies läßt vermuten, daß bei der Zerstörung des untersuchten Gesteins Schäden aufgrund von Gefrieren und Auftauen keine große Rolle spielen. Die Anzahl der Zyklen ist jedoch sicherlich nicht ausreichend, um schlüssige Ergebnisse aus dieser Versuchsart erzielen zu können, da sich Schäden durch Gefrieren und Auftauen nur sehr langsam entwickeln. Der Versuch läuft derzeit und weitere Zyklen werden noch durchgeführt. Die Ergebnisse werden zur Verfügung gestellt, sobald sie ausgewertet sind.

5. Schlußbetrachtung

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen, daß die getesteten Steinfestiger zwar akzeptable, aber unterschiedliche Festigungseigenschaften besitzen. Keines der getesteten Materialien zeigte eine konstante Tendenz. Bei manchen Versuchen erzielten einige Mittel sehr positive Ergebnisse, doch sind die meisten Versuche eher mit gemischten Resultaten ausgefallen. Alle Festiger haben letztendlich ihre Vor- und Nachteile. Es zeigt sich ganz deutlich, daß es keinen perfekten und universellen Steinfestiger gibt, der alle Probleme zu lösen imstande wäre. Beispielsweise hatten die Steinfestiger auf Lösemittelbasis (Wacker OH, Wacker H, Silan und Funcosil OH) generell ein größeres Eindringvermögen als diejenigen auf der Basis wäßriger Lösungen (Befix). Andererseits kann die Verwendung stark flüchtiger und entflammbarer Lösemittel, insbesondere in einem heißen Klima, ernsthafte negative Auswirkungen auf Mensch und Umgebung haben. Überdies bewirkt die Verdunstung des Lösemittels, daß erhebliche Anteile des Steinfestigers zusammen mit dem Lösemittel wieder an die Gesteinsoberfläche gebracht werden und dadurch die Wirksamkeit des Steinfestigers Einbußen erleidet.

Steinfestiger mit hydrophobierender Wirkung (Wacker H, Silan und Befix) reduzieren die Wasseraufnahme wirksamer als die anderen Materialien, die hinwiederum eine bessere Wasser-

tallization of these salts causes a powdering or a blistering of the surface and the formation of deep cavities. Therefore it is quite essential to test the ability of any stone preservative and consolidant to improve the stone resistance to the damage caused by salt crystallization.

The degree of resistance of the different untreated and treated samples used in the salt crystallization test was evaluated by visual and microscopic examination of the samples after each cycle and by recording the weight loss of the samples.

The monitoring of the sample conditions as the test progressed showed that all the consolidation treatments improved the resistance of the stone towards damage caused by salt crystallization. Only the untreated sample suffered at the early stages of the test. The first signs of weathering and disintegration of the treated samples appeared after the completion of cycle 7. This was more obvious in the samples treated with Silane, Befix and Wacker OH. Samples treated with Wacker H and Funcosil OH proved to be more resistant to weathering as they suffered only from little flaking and scaling at the late stages of the test.

Resistance to Frost Damage

No measurable changes were found either in the treated or untreated samples after twenty five cycles. This suggests that freeze-thaw damage may not be an important process in the deterioration of the tested stone. However, the number of cycles performed is definitely not sufficient to obtain conclusive results from this type of tests since damage by freeze-thaw cycles is very slow. The test is still running and more cycles are being performed. The results obtained will be made available as soon as they are obtained.

5. Concluding Remarks

The results obtained in this study demonstrate that the tested stone consolidants have acceptable but variable consolidating abilities. There is no constant trend for any of the tested materials. Some materials obtained very good results in one or the other of the tests, but most of the tests showed rather mixed results. All the tested consolidants have their positive merits but also negative ones. It is quite obvious that there is no perfect and universal consolidant that can solve all the problems. For instance, the consolidants applied as solvent base solutions (Wacker OH, Wacker H, Silane and Funcosil OH) have in general better penetration depths than those applied as an aqueous solution (Befix). On the other hand using highly volatile and flammable solvents, especially in hot climate, may have a serious negative impact on man and the environment. In addition, evaporation of the solvents results in bringing with them to the surface of the stone considerable amounts of the consolidant that consequently decreases the effectiveness of that consolidant.

The consolidants with hydrophobing effects (Wacker H, Silane and Befix) have better abilities to reduce the water uptake when compared to the other consolidants which on the other hand have a better water vapour permeability. The main conclusion of this study is perhaps that there is no single stone consolidant that could satisfy and meet all the requirements, applying

dampfdiffusionsfähigkeit aufweisen. Die wichtigste Schlußfolgerung aus dieser Untersuchung ist vielleicht, daß es, obwohl es keinen einzelnen Steinfestiger gibt, der alle Anforderungen zufriedenstellend erfüllen könnte, doch besser ist, Steinfestiger bei stark verwitterten und gefährdeten Zonen einzusetzen, als nichts zu unternehmen. Dies gilt jedoch nur dann, wenn alle Variablen sorgfältig optimiert werden. Jedes Objekt und jedes Material bringt spezielle Probleme mit sich, die je nach Sachlage gelöst werden müssen und dies kann nur durch sorgfältig geplante Feldversuche unter Heranziehung der Ergebnisse der Laborversuchsprogramme erreicht werden.

Anmerkungen

- 1 S. AMOROSO/V. FASSINA, *Stone decay and conservation*, in: *Materials Science Monographs*, 11, Amsterdam Elsevier 1983.
- 2 J.R. CLIFTON, *Adhesives and Consolidants*, in: Reprint of contributions to the Paris Congress 2.–8. September 1984, N.S. Brommelle/Elizabeth M. Pye/Perry Smith/Garry Thomson (Hrsg.), International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, London 1984, S. 151–155.
- 3 G.A. SLEATER, *A Laboratory Test Programme for Stone Preservatives*, in: RILEM/UNESCO Symposium on Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris 1976, S. 6, 13. – G.A. SLEATER, *Stone Preservatives: Methods of Laboratory Testing and Preliminary Performance Criteria*, National Bureau of Standards Technical Note 941, Washington DC 1977. – H. WEBER/K. ZINSMEISTER, *Conservation of Natural Stone*, Ehningen 1990.
- 4 R. SNETHLAGE/E. WENDLER/L. SÄTTLER, *The Application of Laboratory Processes and Studies to Real Structures*, in: Proc. Sympo. "Analytical Methodologies for the Investigation of damaged Stones", 14.–21. September, Pavia 1990.
- 5 C.A. PRICE, *The Evaluation of Stone Preservatives*, Garston, Watford 1980. – AMOROSO/FASSINA (wie Anm. 1).
- 6 G. TORRACA, *Porous Materials. Building Materials Science for Architectural Conservation*, 3. Ausg., Rom 1988. – PRICE, 1975. – AMOROSO/FASSINA (wie Anm. 1). – CLIFTON (wie Anm. 2). – WEBER/ZINSMEISTER (wie Anm. 3). – H. WEBER, *Stone Renovation and Consolidation using Silicones and Silicic Esters*, Wacker-Chemie GmbH München 1980, S. 375–385.
- 7 Wacker, *Wacker Silicones for Masonry Protection*, Wacker-Chemie GmbH Deutschland 1995. – Remmers, *Funcosil Façade Protection and Restoration Systems*, Remmers Bauchemie GmbH Deutschland 1995. – Sanotec Austria, *Innovation, Research and Development for the Protection of the Environment, Special Products for Buildings, Construction, Preservation and Treatment*, Sanotec Austria Technical Report, Österreich 1995.
- 8 WEBER/ZINSMEISTER (wie Anm. 3).
- 9 L. SÄTTLER/R. SNETHLAGE, *Durability and Stone Consolidation Treatments with Silicic Acid Ester*, in: Proc. Sympo. (wie Anm. 4).

Abbildungsnachweis

Alle Abbildungen vom Autor

Übersetzung aus dem Englischen ins Deutsche von Hannelore Meier

consolidants to heavily weathered and endangered stone is much better than doing nothing. This is only true if extreme care is taken to optimize all the variables involved. Every object and material present peculiar problems which must be faced according to circumstances. And this can only be achieved by the careful design of field testing programs utilizing the results obtained by the laboratory testing programs.

Footnotes

- 1 S. AMOROSO/V. FASSINA, 'Stone decay and conservation', *Materials Science Monographs*, 11, Amsterdam, Elsevier, 1983.
- 2 J.R. CLIFTON, 'Adhesives and Consolidants', in *Reprint of contributions to the Paris Congress 2–8 September 1984*, N.S. Brommelle/Elizabeth M. Pye/Perry Smith/Garry Thomson (eds.), International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, London, 1984, pp. 151–155.
- 3 G.A. SLEATER, 'A Laboratory Test Programme for Stone Preservatives', *RILEM/UNESCO Symposium on Deterioration and Protection of Stone Monuments*, Paris, 1976, pp. 6, 13. – G.A. SLEATER, *Stone Preservatives: Methods of Laboratory Testing and Preliminary Performance Criteria*, National Bureau of Standards Technical Note 941, Washington DC, 1977. – H. WEBER/K. ZINSMEISTER, *Conservation of Natural Stone*, Ehningen, 1990.
- 4 R. SNETHLAGE/E. WENDLER/L. SÄTTLER, 'The Application of Laboratory Processes and Studies to Real Structures', *Proc. Sympo. 'Analytical Methodologies for the Investigation of damaged Stones'*, 14–21 September, Pavia, 1990.
- 5 C.A. PRICE, *The Evaluation of Stone Preservatives*, Garston, Watford, 1980. – AMOROSO/FASSINA (note 1).
- 6 G. TORRACA, *Porous Materials. Building Materials Science for Architectural Conservation*, Third edition, Rome, 1988. – PRICE, 1975. – AMOROSO/FASSINA (note 1). – CLIFTON (note 2). – WEBER/ZINSMEISTER (note 3). – H. WEBER, *Stone Renovation and Consolidation using Silicones and Silicic Esters*, Wacker-Chemie GmbH, Munich, 1980, pp. 375–385.
- 7 Wacker, *Wacker Silicones for Masonry Protection*, Wacker-Chemie GmbH, Germany, 1995. – Remmers, *Funcosil Façade Protection and Restoration Systems*, Remmers Bauchemie GmbH, Germany, 1995. – Sanotec Austria, *Innovation, Research and Development for the Protection of the Environment, Special Products for Buildings, Construction, Preservation and Treatment*, Sanotec Austria Technical Report, Austria, 1995.
- 8 WEBER/ZINSMEISTER (note 3).
- 9 L. SÄTTLER/R. SNETHLAGE, 'Durability and Stone Consolidation Treatments with Silicic Acid Ester', in *Proc. Sympo. (note 4)*.

Photo Credits

All figures by the author