

Testergebnisse und Verfahrensweisen bei der Einstellung des Reparaturmörtels *Test Results and Procedures in the Fine Tuning of the Repair Mortar*

Wichtige Voraussetzung für den Erfolg aller Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen an den Grabfassaden in Petra ist die genaue Kenntnis der Eigenschaften des in den Monumenten anstehenden Steinmaterials, d. h. die Ermittlung der sog. Gesteinsdaten sowie die danach ausgerichtete Wahl kompatibler Restaurierungsmaterialien und wirksamer Methoden ihrer Anwendung. Da vor allem alle offenen Schädstellen, z. B. Risse, Ausbrüche oder Alveolen, geschlossen werden mußten, um die durch Wasser verursachten Schadensprozesse zu unterbinden, war die Auswahl einer passenden Steinersatzmasse von entscheidender Bedeutung. Die Wahl ist – unter anderem wegen seiner sandsteinähnlichen Eigenschaften – auf Kieselsolemörtel gefallen. Doch mußte die richtige Mischung seiner Komponenten in Angleichung an die Kenndaten der jeweiligen Sandsteinvarietäten, als auch die geeignetste Applikationsmethode durch Austesten gefunden werden. Um diese Parameter festzustellen, wurden Probefelder angelegt, die während der Testphase des Projekts beprobt und beobachtet werden konnten. Hierfür wurde ein nabatäischer Steinbruch ausgewählt, der ähnliche Bearbeitungs- und Verwitterungsspuren wie die Monumente aufwies und dessen Oberflächen außerdem genau so lange der Verwitterung ausgesetzt waren (Abb. 1, 2).

Diesen Probefeldern ist insofern eine besondere Bedeutung zugekommen, als bisher in ganz Jordanien – und somit auch bei den wenigen älteren Restaurierungsmaßnahmen in Petra – ausschließlich Mischungen mit Portland-Zement verwendet worden waren. Die Wechselwirkungen dieses Materials mit Sandstein sind jedoch sehr problematisch und es stellte sich heraus, daß es dort, wo es an antiken Monumenten eingesetzt wurde, mitverantwortlich für gravierende Schäden an der historischen Substanz ist. Ein Grund dafür sind die im Zement enthaltenen löslichen Alkalien, welche in Reaktion mit den eher sauren Elementen des natürlichen Gesteins zur Ausbildung von schädlichen Salzen führen. Ein weiterer Grund ist der, daß Zement wesentlich härter als Sandstein ist. Der weichere Sandstein wittert schneller zurück, so daß schließlich nur die Zementreparaturen als erhabenes Profil wie ein störendes Gerippe stehen bleiben. Auf diese Weise erhält die Reparatur, die nur Mittel zum Zweck sein sollte, gegenüber dem Original ein widersinniges Eigenleben. Da Zement ausgesprochen gute Hafteigenschaften besitzt, reißt er meistens Stücke des Originalgesteins mit ab, wenn es aufgrund von Materialspannungen zu Abrissen kommt. So führt Zement, an historischen Monumenten eingesetzt, sehr häufig nicht zur Lösung der Probleme, sondern viel eher zu zusätzlichen, in Langzeitwirkung auch zu gravierenden Nachfolgeschäden.

In der heutigen Restaurierung, d. h. in einer auf wissenschaftlicher Analyse basierenden Restaurierung, gehört die Anwendung solcher Materialien daher im großen und ganzen der Vergangenheit an. Der Weg zu solchen Erkenntnissen, d. h. überhaupt die Hinwendung zu einer wissenschaftlichen Einstellung und Akzeptanz strukturierter Abläufe, ist in allen Ländern, die nicht über eine längere Restaurierungsgeschichte verfügen, ein

An allimportant prerequisite for the success of the conservation and restoration measures taken at the tomb façades in Petra is an exact knowledge of the natural properties of the primary rock constituting the monuments, the consequent selection of compatible surrogates and repair substances for sandstone as well as the determination of the most effective methods of application. As primarily all open faults – fissures, cracks, alveoles – had to be closed in order to stop the process of decay caused by the influx of water, the choice of a fitting and compatible mass substituting sandstone was of decisive importance. A silica sol repair mortar has been chosen because its properties are very similar to that of sandstone. Nevertheless, the proper mixture of components in adaptation to the varying consistencies of the local sandstone, as well as the most efficient method of application had first to be found out in a series of tests. In order to determine these parameters test fields have been installed and carefully observed during the procedure of application in the course of the project. An old Nabataean quarry has been chosen for this purpose, which showed characteristic traces of weathering and dressing of the natural rock similar to that seen on the monuments and whose surfaces had been exposed to weathering during almost the same length of time (figs. 1, 2).

These test fields had a special importance due to the fact that in all recent restoration measures in Petra, and all over Jordan, mixtures of Portland cement had been used exclusively until then. The exchange effect of these materials, as with cement and sandstone in general, turned out to be disastrous, as it became more and more obvious that wherever it was applied to ancient monuments it was responsible for heavy damages and losses of the historical substance. One major reason is the soluble alkalines inherent in Portland cement, which, as a reaction to the sour elements inherent in the natural sandstone, lead to the formation of salts. Another reason is the physical incompatibility of cement with sandstones. Since cement is much harder than the soft stone, repair elements in cement will remain as a disturbing skeleton wherever exposed to weathering, while the sandstone is being washed away. In this way the repair material, only a token for the purpose of restoration, gains a life of its own in contradiction to the historical original. As cement has extremely good adhesion qualities, it tends to break away parts of the original stone or rock when it comes to outbursts and breakouts because of different tensions within the materials. Therefore, cement when applied to historical substance, does not lead to a solution of the main problems but tends to cause even more problematic losses and deterioration in the long run.

In modern restoration, i. e. a restoration based on scientific analysis, the application of such materials does nowadays belong to the past. The long way to such knowledge, i. e. the turn to a scientific perception and the decision for structured concepts, still remains, at least in all countries which cannot look back to a longer history of restoration, a hard process of learning. At first, basic knowledge and esteem of the only recently established science of conservation is still not widely spread and

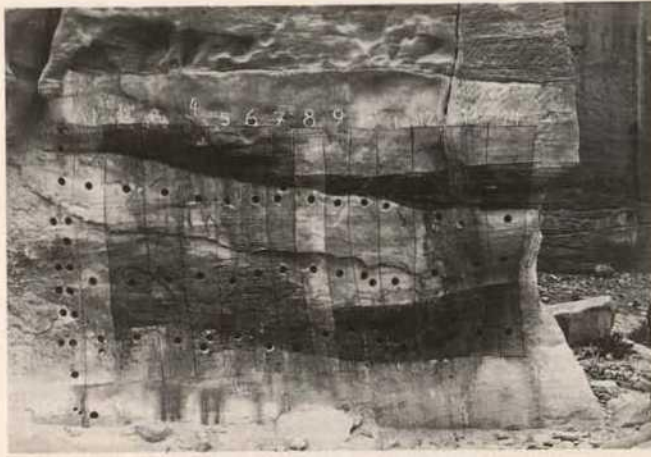


Abb. 1. Testfeld A im Steinbruch bei Umm Sayhun

Fig. 1. Test field A in the quarry of Umm Sayhun

harter Lernprozeß. Erstens war eine allgemeine Kenntnis und Wertschätzung der relativ neu etablierten Konservierungswissenschaften noch nicht weit genug verbreitet und somit all den Institutionen und Personen, die in Jordanien für die Restaurierungskampagnen verantwortlich sind, nicht bekannt. Zweitens ist die Anwendung gut ausgearbeiteter Verfahren und Praktiken, die auf wissenschaftlicher Forschung basieren, zeitaufwendig. Die Zeit, welche für die Tests benötigt wurde, stellte die mit Petra befaßten und mit solchen Vorgehensweisen bisher nicht vertrauten Institutionen auf eine harte Geduldprobe, weil während dieses über zwei Jahre währenden Zeitraums keine sichtbaren Fortschritte hinsichtlich tatsächlicher Restaurierungsarbeiten zu verzeichnen waren. Das „Konservierungs- und Restaurierungszentrum in Petra“ ist im Begriff, diese modernen, wissenschaftlich orientierten Restaurierungstechniken und -verfahren in Jordanien einzuführen und zu institutionalisieren.

Kieselolmörtel werden schon seit etlichen Jahren in der Restaurierung angewendet. Doch sind diese Mörtel keine Fertigprodukte, die auf dem Markt erworben und nach Gebrauchsanweisung angewendet werden können. Sie müssen an die besonderen Materialeigenschaften jedes historischen Monuments angepaßt werden, wobei der Einsatz sich naturgemäß auf Sandsteinobjekte beschränkt.

Dieser Prozeß der Anpassung des Reparaturmörtels an die Eigenschaften des zu behandelnden Steins ist anspruchsvoll und beinhaltet eine Anzahl von Verfahren, die in der modernen Restaurierung Standard sind, aber in Jordanien – und möglicherweise im ganzen mittleren Orient – in Petra zum ersten Mal durchgeführt wurden.

Das gesamte Verfahren nahm deshalb fast zwei Jahre in Anspruch, weil gleichzeitig geeignete Testmöglichkeiten aufgebaut, die benötigten Geräte gekauft und installiert sowie jordanische Partner fortgebildet werden mußten, um damit sicherzustellen, daß diese Tests auch in Zukunft durch jordanisches Personal ausgeführt werden können.

Für die Restaurierung der Grabfassaden in Petra mußten verschiedene Restaurierungsverfahren an den Probeflächen ausgetestet werden:

- Vorfestigung von sandenden bis morbidem Sandsteinoberflächen mit geeigneten Festigern;
- Feinmörtelschlämmen auf Schuppenbildungen und stark morbidem Oberflächen;

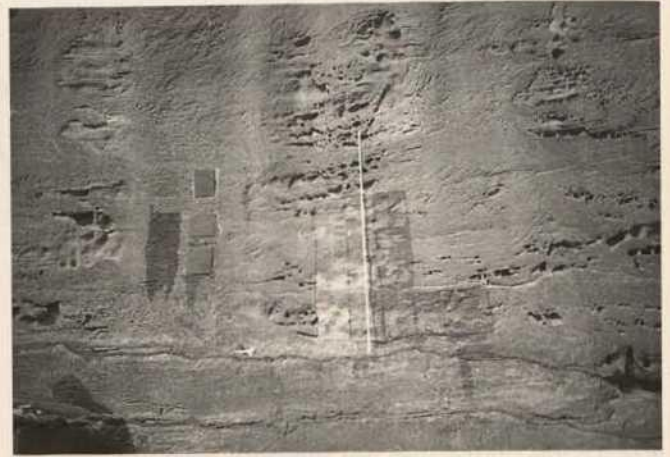


Abb. 2. Testfeld C im Steinbruch bei Umm Sayhun

Fig. 2. Test field C in the quarry of Umm Sayhun

has been unknown to institutions and persons responsible for the restoration campaigns in Jordan. Secondly, the application of detailed procedures and working practices, based on scientific evidence, need a lot of time. The time needed for testifying calls for a lot of understanding and patience from the side of institutions not yet used to such means of research, because during a span of time of almost two years no visible progress is made in restoration. The ‘Center of Conservation and Restoration in Petra’, CARCIP, is in the process of implementing and institutionalizing scientific restoration techniques and methods in Jordan.

The proving and fine tuning of silica sol repair mortar is just one example, and its adjustment for the situation in Petra showed to all responsible institutions involved in an exemplary way, what modern restoration means.

Silica sol mortars have been known and applied in the field of restoration for years. But these mortars are no final products, available on the market and to be applied after an instruction for use or one singular recipe or formula. The mortars have to be adapted in their mixture to the special physical qualities of the historical monument, whereby the use must naturally remain exclusively restricted to sandstone objects.

Therefore, the application of such mortars on any historical monument will always pose a new set of challenges. The adaptation though is demanding and not easily to be achieved. But there is no way around it unless risks with unpredictable results will be taken. The process of adaptation of a repair mortar with the proper qualities of the stone at first requires a thorough analysis of the sandstone itself, and implies a set of procedures that are standard in modern restoration, but in Jordan – and probably all over the Middle East – have now and for the first time been implemented in Petra. The building up of appropriate testing facilities, the purchase and installation of tools and equipment, and the training of people at hand, ensuring that tests will be executed by Jordanians in the future, took almost two years altogether.

For the restoration of the tomb façades in Petra various restoration procedures had to be examined in test fields:

- prefixing of heavily sanded and morbid sandstone surfaces with adequate fixatives;
- washing of scales and deeply morbid surfaces with fine mortar;
- application, filling and sloping of substitutes bound with silica sol;

- Antrag, Kittungen, Anböschungen mit Kieselsol gebundenen Ersatzmassen;
- Injektion von Schalen und Rissen mit Kieselsol gebundenen Injektionsmassen;
- Nachfestigung von Ergänzungen.

Um bei diesen Tests zu quantifizierbaren Ergebnissen zu kommen, wurden im einzelnen die folgenden Schritte unternommen:

- Trockene Entnahme von Bohrproben des Sandsteins (eine trockene Entnahme ist notwendig, weil Bohrungen mit Wasser die im Sandstein enthaltenen Salze, die ebenfalls bestimmt werden mußten, lösen würden, Abb. 3);
 - Bestimmung der Sandsteineigenschaften, wie Porosität, Wasserdiffusionswiderstand, Wasseraufnahme, Wärmeausdehnung, mineralogische Zusammensetzung und Korngrößenverteilung;
 - Ausmischen eines Versuchsreparaturmörtels auf der Basis der vorher festgestellten Kenndaten des Sandsteins und der aus dem Gebrauch solcher Reparaturmörtel bereits bestehenden Erfahrungen;
 - Vorbereitung von Testwürfeln aus dem Versuchsmörtel;
 - Bestimmung der Eigenschaften des Versuchsmörtels;
 - Vergleich der Daten des Sandsteins und des Mörtels und Korrektur des Rezeptes, bis eine optimale Angleichung an die Eigenschaften des Sandsteins erreicht war;
 - Angleichung der Farbe des Reparaturmörtels an den natürlichen Sandstein durch Beimischung verschiedenfarbiger Sande, die durch Zerkleinern monochromer Sandsteine gewonnen wurden;
 - Testen verschiedener Steinfestiger für die notwendige Vorbehandlung der Steinoberflächen, um eine genügende Haftung des Reparaturmörtels zu gewährleisten;
 - Aufbringen des angepaßten Reparaturmörtels auf verschiedene vorbehandelte Oberflächen in einem besonders entworfenen Testfeld für Langzeitbeobachtungen;
 - Bestimmung der Hafteigenschaften durch visuelle Überprüfung in situ; Messung der Abzugsstärke, makroskopische und mikroskopische Untersuchungen der Nahtstelle zwischen Reparaturmörtel und Sandstein an Bohrkernen, die durch die Mörtel in den Sandstein gebohrt wurden;
 - Abwandlung der Vorbehandlung und der Applikationstechniken des Mörtels, bis optimale Ergebnisse erzielt worden sind.
- Es wurden drei Probefelder mit unterschiedlicher Zielsetzung angelegt:

- Probefeld A – für die Festigung mit Kieselsäureester;
- Probefeld B – für Schlämmen als Oberflächenkonsolidierung;
- Probefeld C – für die Ergänzung von Fehlstellen mit angepaßten Kieselsolsteinersatzmassen (Tabelle 1).



Abb. 3. Entnahme von Bohrkernen

Fig. 3. Drilling of cores

- injection of scales and cracks with silica sol bound injection liquids;
- partial afterfixing of fillings and restored faults on requirement.

To get to results of the examinations the following steps had to be taken:

- dry extraction of core samples from the sandstone (a dry extraction is necessary since core drilling with water would dissolve the salts contained within the sandstone, which need to be analyzed as well, fig. 3);
- determination of the sandstone properties, such as porosity, vapor diffusion resistance, water absorption (caloric expansion, mineralogical composition and grain size distribution, the latter two through microscopic investigation);
- mixing of a trial repair mortar based on the parameters obtained from the sandstone data and experiences made in the use of such repair mortars;
- preparation of test cubes from the repair mortar;
- determination of the repair mortar properties;
- comparison of the sandstone data with the mortar and modification of the recipe in order to adjust the parameters to the ones obtained from the sandstone;
- adjustment of the color of the repair mortar to the natural sandstone, through generation of various mixtures of monochrome sands crushed from sandstones of the area;
- testing of various consolidants in the required pre-treatment of the sandstone surfaces in order to ensure satisfactory adhesion of the repair mortar;

Tabelle / Table 1. Probefläche A, Festigung mit Kieselsäureester / Test field A, consolidation with silicic acid ester

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14
A1, A8 ungefestigt / non consolidated													
A2, A3, A4 gefestigt mit / consolidated with Wacker OH, 2 Ltr./m ²													
A5, A6, A7 gefestigt mit / consolidated with Wacker OH 3 Ltr./m ²													
A9, A10, A11, gefestigt mit / consolidated with Remmers 510, 2 Ltr./m ²													
A12, A13, A14 gefestigt mit / consolidated with Remmers 510, 3 Ltr./m ²													

Die Probefelder wurden so gewählt, daß alle Teilflächen vergleichbare Schäden aufwiesen. Außerdem sollte eine Beprobung in verschiedenen zeitlichen Abständen, nach vier Wochen, drei und zwölf Monaten möglich sein.

Am Probefeld A (Abb. 1) wurden zwei Kieselsäureester in unterschiedlichen Mengen von zwei Litern und drei Litern pro Quadratmeter zur Festigung des Sandsteins verwendet. Das Testfeld mit starker Absandung in der Sockelzone repräsentiert das durchschnittliche Schadensbild am Fuß der Monumente. Die Festigermenge von zwei und drei Litern pro Quadratmeter wurde frei gewählt, da keine Erfahrungen mit den Sandsteinen in Petra vorlagen und zu Beginn der Tests auch keine Gesteinskenndaten, die Anhaltspunkte hätten geben können, bekannt waren. Sie entsprechen aber durchschnittlichen Festigermengen, die bei der Festigung von vergleichbaren Sandsteinen verwendet werden.

Die Untersuchungen ergaben zunächst einen zu geringen Festigungseffekt. Der Grund war in der verminderten Gelabscheidung auf dem zu trockenen Sandstein zu suchen. Darauf wurden Messungen an befeuchteten Sandsteinoberflächen ausgeführt, um das Trocknungsverhalten zu beobachten, da erwartet werden durfte, daß Festigungsversuche an Oberflächen mit erhöhtem Feuchtegehalt zu besseren Festigungsergebnissen führen würden. Diese Erwartungen haben sich bei erneuten Versuchen bestätigt. Allerdings waren die Festigkeitswerte noch deutlich unter dem Wert, den das intakte Gestein aufweist. Außerdem gab es Meßwertstreuungen, die teilweise die Wirksamkeit in Frage stellten. Deshalb wurden an stark morbiden Stellen Versuche mit einer Tropfränkung durchgeführt. Dazu wurden Bohrkanülen mit einem Durchmesser von 6 mm ungefähr ca. 8 cm tief in den morbiden Sandstein gebohrt. Der Bohrkanal wurde dann mit einem passenden Schlauchstück ausgekleidet und die Tropfflasche angeschlossen, so daß der Festiger nur über den Boden des Bohrkannels von innen nach außen den Sandstein durchdringen konnte. Auf diese Weise wurde der Kieselsäureester tiefer in das morbide Gestein eingebracht und eine innige Verbindung zwischen den durchtränkten Bereichen und dem massiven Gestein sichergestellt. Die dabei festgestellte Aufnahmemenge von ca. 6 Litern pro Quadratmeter war wesentlich größer, als dies bei Flutungen der Oberfläche möglich ist. Dabei wurden Radien von ca. 30 cm um das Bohrloch mit dem Festiger durchtränkt. Die guten Festigungsergebnisse zeigten, daß es grundsätzlich möglich ist, auf diese Weise morbide, tief verwitterte Stellen zu behandeln. Doch sollen solche Maßnahmen nur in besonderen Fällen ergriffen werden. Der wichtigere Anwendungsbereich für Steinfestiger ist die Vorbehandlung von Fehlstellen als Haftbrücke für die anzutragende Kieselsolsteinersatzmasse.

Als Ergebnis der Beprobung wurde für die Arbeiten in Petra der Steinfestiger Funcosil 510 von Remmers gewählt. Der in diesem Steinfestiger vorhandene höhere Anteil an Feststoffen bewirkt bei dem sehr porösen Sandstein in Petra bessere Festigungsergebnisse.

Am Probefeld B sollten auf sandenden bis morbiden Sandsteinflächen Schlammnanträge als Konservierungsmethode getestet werden. Das Wirkungsprinzip ist einfach. Die Schlämme wird auf die vorher leicht mit Wasser angefeuchteten sandenden Oberflächen als dünnflüssige Suspension aufgestrichen und mit einem weichen Pinsel einmassiert. Die aus Kieselgelen und feinsten Gesteinsgelen bestehenden Partikel setzen sich in die offene, angewitterte Kornstruktur und wirken so als Kittmasse von Korn zu Korn. Die Schlammn können in unterschiedlichster Schichtdicke aufgetragen werden und sollen vor allem als

- application of the adjusted repair mortar to various pre-treated surfaces in a particularly chosen open-air test-field for long-term-observation;
- determination of adhesion properties through visual inspection and measurement of pull off strenght values in situ, macroscopic and microscopic investigation of the interface from core samples drilled through the repair mortar into the sandstone;
- modification of pre-treatment and mortar application techniques until optimal results are obtained.

Three test fields with different purpose have been installed:

Test field A – for the fixing of silica acid ester;

Test field B – for washing as a means of surface consolidation;

Test field C – for the filling of break outs and losses with adapted silica sol stone substitutes (table 1).

The test fields have been chosen because of comparable damages. Besides, it should be possible to take proofs in different time spans, after four weeks, after three months and after twelve months.

With test field A (fig. 1) two different types of silica acid ester in differing quantities of two, respectively three liters per qm, have been used to consolidate the sandstone. The test fields represent an average picture of damages on the historical monuments in Petra: deep washouts of sand in the lower zones and bases. The quantity of consolidants of two or three liters per qm was a free choice, since no experiences had been made before with the sandstone from Petra and at the beginning of the test series no analysis of the sandstone components had been made, which could have given any further indications. But the quantities tested matched the average quantities of consolidants that had been used and applied for the fixing and consolidation of comparable sandstones.

The investigations at first showed an insufficient effect of consolidation. The reason was to be found in a reduced outcome of gel on the extremely dried out sandstone. As a consequence measurements have been made on the surfaces of sandstones moistened with water, to observe the drying behaviour, since it could be expected that an application of consolidants on surfaces with a higher degree of humidity would lead to better results. These expectations had to be supported by a new test series. Nevertheless, the consolidation results were still remarkably under the values of an intact stone. Besides, the strawing of measurements partially questioned the results and effectiveness. Therefore, on extremely morbid parts of the stone, test series were made by dropping in consolidation liquid. To this purpose small channels of a diameter of 6 mm have been drilled into the morbid sandstone unto a depth of about 8 cm. The drilling channel was afterwards closed by an adapted tube, which forced the fixative to pass the sandstone from inside. By this way the silica acid ester could be implemented much deeper into the morbid rock. The quantity of liquid of about 6 ltr per qm was much higher than this would have been with an application on the surfaces and a radius of about 30 cm around the drilling holes, which were now floated with consolidants. The positive results showed, that it was generally possible to consolidate by this means morbid and deeply weathered areas of natural stone.

But these measures would only be taken in very difficult cases. A more important field of application for stone consolidation is the preparation of holes and faults as a fixing bridge for the mass of silicar sol repair mortar as a sandstone substitute.

As a result of the test series the stone consolidant Funcosil 510 by Remmers has been chosen for restoration work in Petra. The

schützende Verschleißschicht wirken. Sie werden von der natürlichen Bewitterung angegriffen und wieder abgebaut, schützen aber während dieses Zeitraums die Steinoberfläche vor Witte- rung. Wenn die Schläm- men abgebaut sind, müssen sie erneuert werden. Sie können durch Zusatz von Kieselsäureester oder durch Nachfestigung mit Kieselsäureester unterschiedlich resis- tent gegen Bewitterung ausgestattet werden.

Zur Schläm- menherstellung wurde ein vorbereitetes Stein- mehlssubstrat mit Kieselsol im Verhältnis 2 : 1 angemischt und im frischen Zustand aufgetragen. Voruntersuchungen hatten er- geben, daß die Salzgehalte relativ gering und nur oberflächen- nahe Bereiche betroffen sind. Deswegen wurden die Ober- flächen vor dem Aufbringen der Schläm- me durch trockenes Ab- bürsten und alternativ mit Mikropartikelstrahl gereinigt. Die Probeflächen wurden teilweise nur geschlämmt und teilweise mit 2 bzw. 3 Litern pro Quadratmeter gefestigt. Die Testergeb- nisse waren jedoch durchaus negativ, denn schon nach kurzer Standzeit waren alle Schläm- men durch den im Stein vorhan- denen Feuchte- und Salzgehalt vollkommen zerstört, so daß diese Methode der Oberflächenkonservierung nicht weiter verfolgt werden konnte.

Im Probefeld C (Abb. 2, 4) wurde das Schließen von Fehlstel- len, d. h. das Auffüllen von Kavernen, das Kitten von Rissen und das Anbösch- en von Schalen mit Kieselsolsteinersatzmassen ge- testet (Tabelle 2).

higher amount of solid particles in this particular stone consoli- dant reached better fixing results with the very porous sand stones in Petra.

With test field B wash application as a method of consolida- tion on morbid sandstone areas had to be tested. The principle is rather simple. The wash will be applied as a thin and liquid sus- pension on the sandy surfaces, moistened with water before ap- plication and will be rubbed into with a soft brush. The particles consisting of silica gels and extremely fine stone gels will im- plement themselves inbetween the open, weathered and corny structure of the stone and will thereby work as a kit or consoli- dant between the single grains. Adhesion will be supported by the accumulation of silica gel within the grained surfaces of the sandstone. The wash can be applied in layers of different width and is ment to be effective in the first place as a protective layer against deterioration and decay. The wash will be attacked by everyday weathering and be reduced, but will at least protect the natural stone surface during a space of time from weathering and deterioration. When the wash has been reduced, it has to be re- newed. It can be made more resistant by adding silica acid ester or by an ex post-consolidation with silica sol ester.

To produce the wash a prepared stone flour substrate with si- lica sol in relation 2 : 1 has been mixed and applied in fresh con- dition. Pre-examinations had proven, that the consistency of salts was rather low and had only attacked areas near the surface.

Tabelle / Table 2. Probefläche C, Ergänzung mit Kieselsol-Ersatzmassen auf alveolar verwitterten Oberflächen /
Test field C, fillings of alveoles with silica sol repair mortar

C1		C2		C3		C4	
W OH	R 510			W OH	R 510		
						W OH	R 510

Die Arbeitsgänge an den 4 Probeflächen in ihrer Reihenfolge /
Work cycles on 4 test sections in the following order:

- C1 Oberfläche mit Wasser leicht befeuchtet
Auftrag von Schlämme als Haftbrücke
Antrag des Kieselsolmörtels
Nachfestigung mit
– W-OH 1 Ltr. / m² (KSE-Wacker OH)
– R-510 1 Ltr. / m² (PKSE-Remmers 510)
- C2 Oberfläche mit Wasser leicht befeuchtet
Auftrag von Schlämme als Haftbrücke
Antrag des Kieselsolmörtels
- C3 Vorfestigung mit
– W-OH 0,325 Ltr. / m² (KSE-Wacker OH)
– R-510 0,325 Ltr. / m² (PKSE-Remmers 510)
Auftrag von Schlämme als Haftbrücke
Antrag des Kieselsolmörtels
- C4 Vorfestigung mit
– W-OH 0,325 Ltr. / m² (KSE-Wacker OH)
– R-510 0,325 Ltr. / m² (PKSE-Remmers 510)
Auftrag von Schlämme als Haftbrücke
Antrag des Kieselsolmörtels
Nachfestigung mit
– W-OH 1 Ltr. / m² (KSE-Wacker OH)
– R-510 1 Ltr. / m² (PKSE-Remmers 510)

- C1 surface moistened with water
application of mortar wash as adhesion bridge
application of the silica sol repair mortar
consolidation of the fillings with
– W-OH 1 Ltr. / m² (KSE-Wacker OH)
– R-510 1 Ltr. / m² (PKSE-Remmers 510)
- C2 surface moistened with water
application of mortar wash as adhesion bridge
application of the silica sol repair mortar
- C3 consolidation of the surface with
– W-OH 0,325 Ltr. / m² (KSE-Wacker OH)
– R-510 0,325 Ltr. / m² (PKSE-Remmers 510)
application of mortar wash as adhesion bridge
application of the silica sol repair mortar
- C4 consolidation of the surface with
– W-OH 0,325 Ltr. / m² (KSE-Wacker OH)
– R-510 0,325 Ltr. / m² (PKSE-Remmers 510)
application of mortar wash as adhesion bridge
application of the silica sol repair mortar
consolidation of the fillings with
– W-OH 1 Ltr. / m² (KSE-Wacker OH)
– R-510 1 Ltr. / m² (PKSE-Remmers 510)

Für alle Tests wurde dieselbe Mörtelmischung verwendet:

200 ml Kieselsol

300 ml Mineralsubstrat rot

300 ml Natursand Petra weiß

150 ml Natursand Petra rot

50 ml Natursand Petra schwarz

Dem Anstrichmörtel wurde ca. 3 % Kieselsäureester bezogen auf das Gesamtvolumen zugesetzt, der auch zur Vor- und Nachfestigung an den entsprechenden Probeflächen verwendet worden ist. Durch die Zusammensetzung der Steinersatzmasse, die weniger widerstandsfähig als der Sandstein ist, wird sichergestellt, daß die Ergänzungsmasse eher als der Sandstein durch Verwitterung angegriffen wird. Reaktionen, wie sie oft von harten, zementgebundenen Mörteln bekannt sind, die zwar sehr gut haften, aber nach einer gewissen Standzeit abreißen und noch Teile des Sandsteines mit ablösen, sind damit ausgeschlossen.

Zusätzlich zu den Ergänzungen von Schadstellen wurden unterschiedliche Muster der Kieselsolsteinersatzmasse auf die Oberfläche des Sandsteins aufgebracht und ihre Bruch Eigenschaften durch Abzugsmessungen geprüft. Für die Haftzugmessungen wurden mit der Hohlbohrkrone zylindrische Bohrkerne von 25–50 mm Tiefe ausgefräst, die mit dem Untergrund fest verhaftet blieben. Die Bohrkerne hatten an der Oberfläche einen Durchmesser von 20 und 42 mm. Auf diese Flächen wurden Kopplungsplatten aus Metall aufgeklebt, an denen dann die Kraftmeßuhr mit Stativ angesetzt werden konnte (Abb. 5). Die Ergebnisse zeigten, daß der Bruch in der deutlich überwiegen-

That was the reason why the surfaces have been cleaned by dry brushing and alternatively with the help of micro-particle-rays prior to the application of wash. The test fields have been partially washed and partially fixed with 2 or 3 litres per qm. But, nevertheless, the test series and results were negative, because after only a short time all applied wash had been destroyed by humidity and salt-concentration inherent within the stone, so that this method of consolidating the surfaces could not be traced any further.

Test field C (figs. 2, 4) has been implemented by closing the faults and filling the caverns, kitting the cracks and sloping the scales with a filling liquid of silica sol stone substitute (table 2).

For all tests the same mixture of mortar was applied:

200 ml silica acid ester

300 ml mineral substrate red

300 ml natural sand Petra white

150 ml natural sand Petra red

50 ml natural sand Petra black

The application mortar has been added with ca. 3 % of the silica sol ester, that had been proved as pre-and after-consolidant at the respective test areas. The stone substitute has been mixed to reduce its resistance factor compared to that of sandstone to make sure weathering attacks the filling consolidant rather than the original sandstone surfaces. Examples, as they are known, of hard mortars on cement basis, are longlasting, but, after a certain time, tend to break out and tear parts of the original substance with them, which is completely excluded in this case.

Abb. 4. Mörtelantrag im Testfeld C

Fig. 4. Mortar application in test field C



Abb. 5. Haftzugmessung

Fig. 5. Measurement of adhesion properties

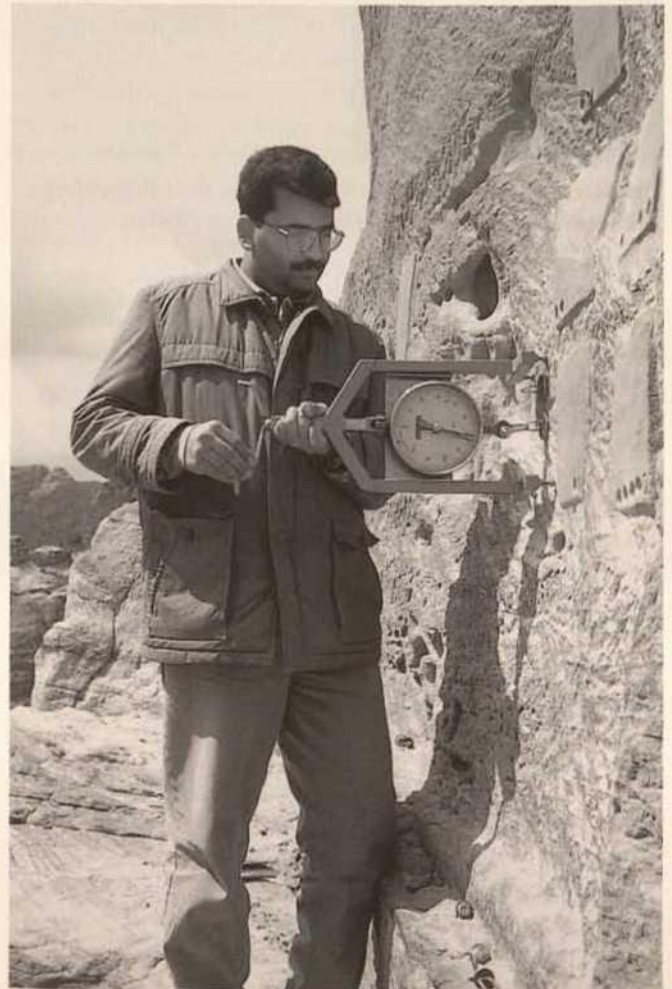




Abb. 6. Haftzugmessung. Stempel nach Bruch in der Ersatzmasse

Fig. 6. Measurement of adhesion properties. Stamp after fraction within the filling substitute

den Zahl der Haftzugmessungen so, wie gewünscht, in der Steinersatzmasse und nicht im Sandstein erfolgte (Abb. 6).

Die Wasseraufnahmemengen wurden mit dem Karstenschen Prüfröhr gemessen. Die vergleichenden Messungen an Ergänzungsmassen und Sandsteinoberflächen ergaben letztendlich sehr nahe beieinanderliegende Werte. Unterschiedlich ist lediglich die Art der Wasseraufnahme.

Die Anwendungsmethode der Kieselsolersatzmassen auf alveolar verwitterten Oberflächen wurde in vier Probeflächen getestet:

Die Ergebnisse dieser an den Probeflächen durchgeführten Anträge waren sehr gut. Überprüfungen nach drei und zwölf Monaten ergaben keine erkennbaren Veränderungen. Es konnten weder Abplatzungen noch Hohlstellen festgestellt werden. Die Antragungen mit der Steinersatzmasse erwiesen sich als resistent gegen die herrschende Bewitterung, die einerseits durch starke Aufheizung in direkter Sonnenbestrahlung und andererseits, namentlich im Winter, zeitweise durch starke Durchfeuchtung bei Regen in Verbindung mit hoher Versalzung charakterisiert ist. Stellenweise wurden die Ersatzmassen extrem fein, bis auf die Steinoberfläche auslaufend, angetragen, was den höchsten Anspruch an eine Ersatzmasse stellt. Selbst in diesen Bereichen konnten nach längerer Standzeit keine Mängel festgestellt werden.

Nachdem die Ergebnisse dieses Testfelds zufriedenstellend waren, wurde nun vor Beginn der eigentlichen Restaurierungsmaßnahmen zur Sicherheit noch eine Musterachse an Monument 825 angelegt. Dafür wurde der oberste Bereich der Fassade zwischen den Treppengiebeln ausgewählt, der die wichtigsten an der Fassade auftretenden Schäden aufwies. Bei der Anlage dieser Musterachse ist in derselben Weise wie bei der Anlage des Probefelds C im Steinbruchverfahren worden, wobei jedoch die dort erzielten Ergebnisse ausgewertet und unmittelbar umgesetzt wurden. Die versalzten, ausgewitterten Bereiche wurden 2–3 mm tief mechanisch abgearbeitet, um das Salzpotential an der Kontaktfläche zwischen Stein und Mörtel zu vermindern. Außerdem wurde die Oberfläche nicht mit Wasser, sondern mit Kieselsäureester befeuchtet, um noch vorhandene Salze nicht zu mobilisieren. Darauf wurde dann im noch feuchten Zustand, die Haftschlämme und anschließend die Steinersatzmasse in verschiedenen Schichten angetragen. Die Musterflächen wurden nach einem, drei und zwölf Monaten in der ge-

füllungen mit silica sol substitute are washed out before the sandstone is attacked, which means a further protection of original substance. In addition to these fillings in faults and cracks different test fields of silica sol mortar substitute have been applied to test fields in order to analyse their crack-properties by measuring the adhesion tension. For adhesion tension measurements cylindrical drill holes in 25 to 50 mm depth have been torn out with a drill-crown, which had been fixed onto the ground. The drill core had a diameter of 20 to 42 mm on the surface. Metal coppling plates have been glued onto this plain, to which a power measurement watch with a stand was applied (fig. 5). The results of adhesion measurements prove that break-outs had occurred in most cases in the mortar substitute and not in the sandstone (fig. 6).

The quantity of water take-up has been measured with the help of the Carsten tube. Comparable measurements on repair substitute and sandstone showed almost equal values. They differ mostly in the way of water take-up.

The application method of silica sol substitutes on alveolar weathered surfaces has been tested in four test fields:

The results of the application measures carried out on these test fields have been very positive. Examinations after three and after twelve months did not show any changes. There were no outbursts or hollows. The treatment with stone substitute proved resistant against weathering, direct heating in the sunshine and was characterized, namely during the winter rain period, by a strong humidity caused by rainfalls in combination with a high degree of oversalting. Here and there the substitutes have been applied in extremely thin layers, sometime down to 0, which means to put the highest demands onto the substitute. But, after a longer period of observation, no faults or deficiencies could be watched even in these areas. The stability of the surfaces and their overall consistency remained unchanged. There are no traces of weathering, nor deterioration of sands through a lowered degree of adhesion or the loss of binding substance to be observed.

After the results of this test field have been appropriate and satisfactory, now, for security reasons, before starting the restoration campaign, a test field was applied on Tomb 825. For this purpose the uppermost area of the façade was chosen between the crow-step-gables, which showed the heaviest losses and damages. The installation of a test field was performed in the same way as in test field C at the quarry, but with the difference that here the results had been tested and verified before. The salted and weathered areas have been reduced mechanically in a depth of 2 to 3 mm, in order to sway away the salts on the surfaces with direct contact to the mortar substitutes. Besides, the surface was not moistened with water, but with silica sol ester, not to mobilize the salts still inherent. Onto the moistened surface adhesion wash was applied and subsequently substitute mortar in different layers. The proof axis or test fields have been examined after one, three and twelve months with the same methods, dry drill cores and measurements of adhesion properties (fig. 6) and water take-up with the Carsten tube. The results of the measurements confirmed the experiences made with the test fields in the quarry, that had remained without any indication of changes for a time of over two years by then. Only at the borders of the mortar applications, where the repair mortar had been applied in extremely thin layers, the loss of sands due to salt activity could be observed. These parts have been removed and repaired by new layers of mortar. The analysis of salt consistencies within the drill cores on Tomb 825 had proven a rather

wohnten Weise mit Entnahme von trocken gebohrten Bohrkernen beprobt und durch Haftzugmessungen (Abb. 6) und Wasseraufnahmetests nach Karsten geprüft. Die Meßergebnisse bestätigten die Erfahrungen, die mit den Probeflächen im Steinbruch gemacht worden waren, die zu dieser Zeit bereits zwei Jahre ohne optische Veränderungen bestanden. In Grenzbereichen, wo die Ersatzmasse dünn bis auf die Steinoberfläche auslaufend angetragen war, sind die Mörtelantragungen durch Salzwanderung abgesandet. Diese Stellen wurden entfernt und erneut mit Steinersatzmasse ergänzt. Da die Salzanalyse an den von Monument 825 gezogenen Bohrkernen einen unbedenklichen Versalzungsgrad ergab, ist daraufhin mit den Restaurierungsarbeiten begonnen worden. Das bis dahin noch nicht bekannte Ausmaß der Salzproblematik wurde erst während der Restaurierung deutlich. Hier mußten andere Lösungen gefunden werden, die im Beitrag über die Restaurierung des Monuments 825 erörtert sind.

Abbildungsnachweis

MICHAEL KÜHLENTHAL, MÜNCHEN: *Abb. 1, 2, 4*
HELGE FISCHER, AMMAN: *Abb. 3, 5*
EGON KAISER, OBERSCHEINFELD: *Abb. 6*

unimportant degree of oversalting. Restoration work could now begin. The extent of the salt problematic was only realized in the course of the project. Here, new solutions had to be found, which are discussed in our contribution on the restoration of Tomb 825.

Photo Credits

MICHAEL KÜHLENTHAL, MUNICH: *Figs. 1, 2, 4*
HELGE FISCHER, AMMAN: *Figs. 3, 5*
EGON KAISER, OBERSCHEINFELD: *Fig. 6*

Translation from the German into English by the authors