

Erprobung und Prüfung von Steinerfüllstoffen in Petra

Testing and Evaluation of Stone Repair Materials in Petra

Einleitung

Die Wüstenstadt Petra verdankt ihre Besiedlung einem von den Nabatäern entworfenen, ausgeklügelten System der Wasserversorgung. Umlaufende kleine Kanäle sammelten das Regenwasser und führten es zu zentralen Zisternen. Auch die Fassaden der berühmten Grabdenkmäler waren in das System der Wasserversorgung und Wasserableitung eingebunden. Nach der Zerstörung durch Erdbeben und dem Verlassen der Stadt verfielen die Wasserkanäle immer mehr, so daß in Folge das Regenwasser ungehindert über die Felswände und Fassaden fließen konnte.

Es scheint zunächst verwunderlich, sich in einem Wüstengebiet mit der Zerstörung von Naturstein durch Feuchte und Salz beschäftigen zu müssen, gerade so, als läge das Denkmal in den gemäßigten Zonen Mitteleuropas. Betrachtet man die in Petra auftretenden Gesteinsschäden näher, so muß man zwischen zwei, in unterschiedlichen Zeiträumen wirksamen Schadensprozessen unterscheiden. Da sind zum einen die imposanten Aushöhlungen und Kavernen, beides Extremformen der Alveolarverwitterung, wie sie nur in wenigen Ausnahmefällen so eindrucksvoll beobachtet werden können. Dieser Verwitterungsprozess ist in geologischen Zeiträumen abgelaufen, und hat seinen Anfang bereits mit der Freilegung der Sandsteinschichten und der einsetzenden Wüstenbildung genommen.

Die an den Fassaden auftretenden Schäden haben sich hingegen erst in historischer Zeit seit dem Verlassen der Stadt entwickelt. Betroffen sind beispielsweise auskragende Gesimse, auf denen das Regenwasser in Senkungen zunächst stehen bleibt, dann aber durch das Gestein hindurchsickert und an der Unterseite intensive Abwitterungen und Aushöhlungen verursacht, die sich in der Nachbarschaft von Rissen besonders ausprägen. Auch die Sockelzone weist in den meisten Fällen gravierende Schäden auf, weil sich hier auf dem ebenen Felsplateau vor der Grabmalfassade das Regenwasser in Pfützen sammelt und in der vertikalen Steinfassade nach oben steigt. Am Verdunstungshorizont führt die Kristallisation der Salze zu tiefgreifendem Absanden, von dem auch dicke Wandflächen derart betroffen sein können, daß sie stark ausgehöhlt und deshalb einsturzgefährdet sind.

Die geschilderten Schadensmechanismen zwingen also dazu, den Feuchtehaushalt der Fassaden wieder in Ordnung bringen zu müssen. Hierzu ist neben der Einfügung von Natursteinverierungen bei größeren Fehlstellen auch die Verwendung von Steinersatzstoffen erforderlich, um Aushöhlungen und Risse zu verschließen bzw. den geregelten Ablauf des Regenwassers auf Gesimsen und Giebeln wiederherzustellen.

Aus diesem Grunde bestand eine wichtige Aufgabe der naturwissenschaftlichen Begleitung des Projekts darin, geeignete Steinersatzstoffe für den Sandstein aus Petra zu bestimmen.

Introduction

Settlement of the desert city of Petra was made possible by the sophisticated water supply system the Nabataeans devised. Small channels surrounding the city collected rainwater and carried it to central cisterns. Even the façades of the famous tomb monuments were incorporated into the water supply and drainage system. After the city was destroyed in an earthquake and abandoned, the water channels increasingly fell into decay, with the result that rainwater was able to run freely over the cliff walls and façades.

It seems odd at first sight to be concerned with the destruction of natural stone by damp and salt in a desert area, as if the monument was sited in the moderate zones of Central Europe. When the rock damage in Petra is examined more closely, it can be seen that there are two processes of damage involved, with effects that take place in different time scales. First, there are remarkable erosions and cavern formations – extreme forms of alveolar weathering, of which comparably impressive examples are only rarely seen. This weathering process has occurred on a geological time scale, beginning as soon as the sandstone layers were exposed and desertification commenced.

The damage occurring in the façades, by contrast, has only developed in historical times, since the abandonment of the city. Areas affected are, for example, projecting cornices – where the rainwater first collects in depressions and then seeps through the rock, causing severe weathering and erosion on the underside, which is particularly marked around cracks. The base zone also shows serious damage in most cases, since the rainwater gathers here on the flat rock plateau in front of the monuments and then rises upwards in the vertical façade. At the level at which the moisture evaporates, salt crystallization leads to severe sanding loss, which can affect even thick wall surfaces in such a way that they become seriously eroded and are consequently threatened with collapse.

These damage mechanisms mean that the moisture balance in the façades needs to be brought under control again. To do this, it is necessary, in addition to placing natural stone inserts in the larger gaps, to use artificial stone to seal up hollows and cracks and to restore regulated rainwater flow at cornices and pediments.

One of the important tasks facing the scientific team accompanying the Petra Stone Conservation Project was therefore to identify suitable artificial stone materials for the sandstone in Petra.

Artificial Stone Materials

Artificial stone materials (also known as stone repair materials or restoration mortar), can be used to repair minor gaps in a manner that imitates the natural appearance of the rock. The use

Steinersatzstoffe

Steinersatzstoffe, auch Steinerergänzungstoffe, Steinersatzmassen oder Restauriermörtel genannt, dienen dazu, begrenzte Fehlstellen in einer das natürliche Aussehen des Gesteins imitierenden Weise auszubessern. Ihre Verwendung ist so alt wie die Steinmetzarbeit und die Steinbildhauerei selbst. Im Einzelfall ist zu entscheiden, wann eine Fehlstelle durch eine Vierung geschlossen werden soll oder ob sich die Ausbesserung mit einer Steinersatzmasse als zweckdienlicher erweist. In den meisten Fällen ist die Verwendung von Steinersatzstoffen die kostengünstigere und für das Monument wesentlich schonendere Lösung.

Aufbau von Steinersatzstoffen

Steinersatzstoffe bestehen prinzipiell aus den gleichen Materialien wie Fugenmörtel; sie stellen also lediglich eine Spezialart von Mörteln dar und unterliegen deshalb den gleichen Verarbeitungsvorschriften. Einige wesentliche Unterschiede sind jedoch bemerkenswert. Da Steinersatzstoffe in vielen Fällen allseitig vom Muttergestein umgeben sind, müssen die Anforderungskriterien besonders kritisch eingehalten werden, da sich alle Abweichungen langfristig in einem veränderten Aussehen zwischen Stein und Steinersatzstoff abzeichnen.

Anders als bei Fugenmörteln muß die strukturbestimmende Kornverteilung dem Gestein angepaßt werden und kann sich nur in engen Grenzen an den gewünschten Festigkeitswerten orientieren. Die Verformungskennwerte dürfen die des Gesteins vor allen Dingen nicht gravierend unterschreiten. Auch Gesamtporosität und Saugfähigkeit müssen mit dem des Gesteins möglichst übereinstimmen. Wesentlich für ein Gesamtkonzept einer Restaurierung unter Zuhilfenahme von Steinersatzstoffen ist, daß der Steinersatzstoff immer auf das Originalgestein abgestimmt ist, damit in der Zukunft bei weiterer Verwitterung nur der Steinersatzstoff, nicht aber die Originalsubstanz zerstört wird.

Bindemittel

Kommerzielle Steinersatzstoffe sind beinahe ausnahmslos auf der Verwendung von Zement als Bindemittel aufgebaut. Die Eigenschaften werden in den meisten Fällen durch Zusätze von Kunststoffdispersionen modifiziert. Ähnliche Eigenschaften wie die zementgebundenen Steinersatzstoffe weisen diejenigen Restauriermörtel auf, die unter Verwendung von hydraulischem Kalk oder hochhydraulischem Kalk hergestellt sind. Von Restauratoren selbst hergestellte Steinersatzstoffe bestehen häufig auch aus reinem Kalkhydrat.

In jüngster Zeit sind kieselgelgebundene Steinersatzmassen in den Vordergrund getreten, für deren Herstellung entweder Kieselsäureester oder Kieselol verwendet wird. Diese Steinersatzstoffe besitzen gegenüber anderen Materialien im wesentlichen zwei Vorteile.

- Durch Nachtränkungen mit einem Kieselsäureester kann die Festigkeit der Masse erhöht und vor allem ein fließender Übergang zum Gestein geschaffen werden.
- Die Massen können ohne Probleme so hergestellt werden, daß sie „auf Null auslaufen“ können, so daß die Antragsflächen nicht abgearbeitet zu werden brauchen.

Kieselsäureester bezeichnen allgemein eine Gruppe von Verbindungen, die durch die Reaktion der Orthokieselsäure mit ei-

of such materials is as old as the arts of stone masonry and sculpture themselves. It has to be decided in individual cases whether it is better to close a gap using a natural stone insert, or whether repairing it with artificial stone is more appropriate. In many cases, the use of artificial stone is a less expensive and for the monument more careful solution.

Composition of Artificial Stone Materials

In principle, artificial stone materials consist of the same components as the mortar used in joints; they are therefore simply a special type of mortar. Consequently, they are subject to the same processing regulations as mortar. A few basic differences should be noted, however. Since artificial stone materials are in many cases surrounded by the original rock, the specification criteria need to be observed with particular care, since in the long term any deviation will be reflected in alterations in the appearance of the stone and artificial stone material.

In contrast to joint mortar, the structurally determining particle distribution has to be adapted to the rock, and must be kept within only a narrow range around the desired values for stability and physical properties. Above all, strength and elasticity must not be substantially lower than those of the rock. In addition, the total porosity and absorbency have to be as similar as possible to those of the rock. An essential aspect of the overall planning of restoration work using artificial stone materials is that the substitute should always be adapted to the original rock, so that if weathering recurs later on, it is the artificial stone that is destroyed, and not the original substance.

Binder

Commercial artificial stone materials are almost without exception based on the use of cement as a binder. In most cases, the properties of the material are modified by the addition of synthetic dispersions. Restoration mortars with properties similar to those of cement-bound artificial stone materials can be produced using hydraulic lime or highly hydraulic lime. Artificial stone materials produced by restorers themselves often consist of pure hydrated lime.

More recently, artificial stone substances bound with silica gel have emerged, which are produced using either silicic acid or silica sol. These artificial stone materials have two basic advantages in comparison with other materials:

- Subsequent soaking with a silicic acid ester can increase the strength of the substance, above all creating a smooth transition to the rock.
 - It is easy to thin out the borders of the substance in such a way that the application surface does not need to be worked down.
- Silicic acid esters designate a group of chemical compounds which are formed by the reaction of orthosilicic acid with an alcohol. For stone conservation, only the Tetraethoxysilane (TEOS or ethylsilicate) is important which is mainly used for sandstone strengthening. It is, however, also appropriate for producing stone repair mortars if certain requirements regarding the aggregates are observed and if the gaps that have to be filled are of minor size. TEOS is commercially available in different formulations, as monomer molecule as well as in precondensed form where oligomer molecules of four formula units prevail. Most products are diluted in organic solvents.

nem Alkohol entstanden sind. Für die Steinkonservierung ist nur der Orthokieselsäure-tetraethylester, kurz TEOS oder Ethylsilikat, von Bedeutung, der in erster Linie für die Steinfestigung eingesetzt wird. Er ist jedoch auch für die Herstellung von Steinersatzstoffen geeignet, wenn bestimmte Anforderungen in Bezug auf die Zuschlagstoffe eingehalten werden und nur kleinere Fehlstellen ergänzt werden müssen. TEOS ist in verschiedenen Formulierungen im Handel erhältlich, sowohl als monomeres Molekül als auch in vorkondensierter Form, wobei in diesem Fall oligomere Moleküle von etwa vier Formeleinheiten vorliegen. Die meisten Produkte sind mit Lösungsmitteln verdünnt.

Kieselsole sind kolloidale Lösungen von SiO_2 in Wasser. Es liegen kleine SiO_2 -Partikel vor, deren Oberfläche negativ geladen ist. Die negativen Ladungen werden durch positiv geladene Kationen, z. B. Na^+ kompensiert. Chemisch sind Kieselsole mit Wassergläsern verwandt, sie enthalten jedoch wesentlich weniger Alkalien. In Wasserglas beträgt das Verhältnis Alkalien zu SiO_2 im Normalfall 1 : 4, während es im Kieselsole in einer Größenordnung von 1 : 100 liegt. Die meisten auf dem Markt erhältlichen Kieselsoleprodukte besitzen einen SiO_2 -Gehalt von 30 Gew.-%. Die Größe der SiO_2 -Partikel liegt je nach Alkaligehalt zwischen etwa 30 und 150 nm. Die Lösungen weisen einen pH-Wert von etwa 10 auf.

Der Vorteil der Kieselsole gegenüber den Wassergläsern liegt vor allem in dem wesentlich niedrigeren Alkaligehalt, so daß Salzausblühungen nicht zu befürchten sind. Vorsicht ist allerdings bei farbigen Sandsteinen und Kalksteinen angebracht, wenn die Färbung auf Eisenverbindungen beruht, die im alkalischen Milieu nicht stabil sind.

Acrylharze oder Acrylharzdispersionen eignen sich vor allem für das Injizieren von Rissen und das Füllen dünner Spalten. In ähnlicher Weise finden auch Epoxidharze als Bindemittel Verwendung, die jedoch durch einen hohen Zuschlaganteil entsprechend gemagert werden müssen. Beide Stoffe haben ihr Haupteinsatzgebiet dort, wo beim Verkleben und Injizieren kraftschlüssige Verbindungen gefordert werden.

Zuschlagstoffe

Als Zuschlag für die Herstellung von Steinersatzstoffen dienen Sande, die nach Möglichkeit eine optimale Sieblinie aufweisen sollen. Es muß jedoch berücksichtigt werden, daß für eine Anpassung des Aussehens an das Gestein das Größtkorn der Sieblinie entscheidend ist. Da immer die Nachahmung der Struktur des Gesteins im Vordergrund steht, kann eine vorteilhafte Sieblinie nicht immer realisiert werden. In sehr vielen Fällen greift man auf gemahlenes Originalgestein zurück, das durch Schlämmen von zu viel Feinanteilen und Tonmineralen befreit werden muß. Auf der anderen Seite können Tonminerale aber auch durchaus erwünscht sein, um die hygrische Quellung an das Originalgestein anzupassen.

Zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften werden in den meisten Fällen hochdisperse Kieselsäure (HDK) und Mikroglasfasern zugegeben. HDK dient zur Herstellung einer ausreichenden Steifigkeit des frischen Restauriermörtels, damit dieser auch an vertikalen Flächen oder über Kopf angetragen werden kann. Mikroglasfasern mindern das primäre Erhärtungsschwinden und setzen die Rißneigung herab. Sie haben die gleiche Funktion wie die Zugabe von Stroh oder Tierhaaren bei historischen Kalkmörteln.

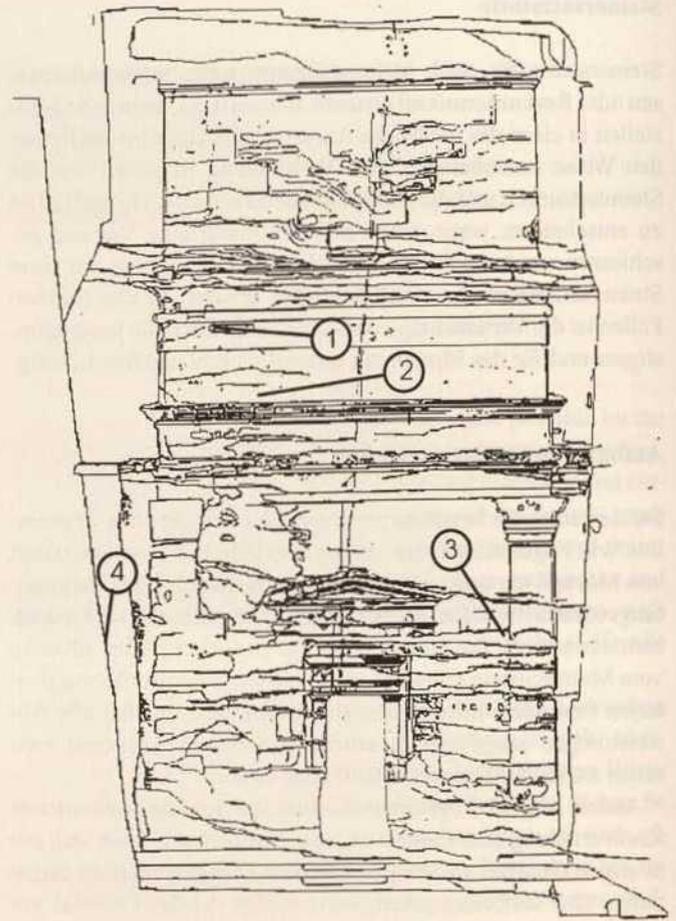


Abb. 1. Probeentnahmestellen am Monument 825. Die Bohrkern wurden zur Bestimmung der Gesteinseigenschaften verwendet

Fig. 1. Points from which samples were taken on Tomb 825. The cores were used to measure the properties of the rock

Silica sols are colloidal solutions of SiO_2 in water. The surface of the small SiO_2 -particles is negatively charged. The negative charges are balanced with positively charged cations, e. g. Na^+ . Chemically, silica sols are related to water glass, however, they contain much less alkalis. In water glass, the ratio of alkalis to SiO_2 amounts to 1 : 4, whereas in silica sols the ratio is in an order of 1 : 100. Most marketable brands have a SiO_2 -content of 30 % by weight. The size of the SiO_2 -particles ranges from 30-150 nm, depending on the alkali content. The pH of the solution is close to 10.

In comparison to water glass, silica sols offer the advantage of having much less alkalis so that no contamination with salts can take place. However, in the case of colored sandstones and limestones silica sols can cause awful discolorations if the coloring iron compounds are unstable under alkaline conditions.

Acrylic resins or acrylic resin dispersions are particularly suitable for injection into cracks, or for filling narrow cracks. Similarly, epoxy resins can also be used as binding agents, although they have to be suitably mixed with a high proportion of aggregate. These two materials are mainly used when high gluing bonds are required for adhesion and injection.

Einfärbung

Die Einfärbung von Steinersatzstoffen setzt große Erfahrung und vor allem restauratorisches Geschick voraus. Der Grundfarbton wird am besten getroffen, wenn gemahlene Originalgesteine zugegeben wird. Wenn eine zusätzliche Nachfärbung mit Pigmenten erforderlich ist, sollten nur natürliche Pigmente Verwendung finden.

Qualitätsprüfungen

Das vollständige Prüfprogramm für Steinersatzstoffe ist in Tabelle 1 wiedergegeben. Grundlegende Informationen zum Untersuchungsprogramm finden sich in Knöfel & Schubert.¹ Die Wirkungsweise von historischen Zusätzen auf Steinersatzstoffe und Mörtel ist in Knöfel & Winnefeld, Winnefeld & Knöfel und Sneath beschrieben.²

Die Proben müssen unter möglichst realitätsnahen Bedingungen präpariert werden, so daß man schon beim Aushärten im Labor beobachten kann, ob das Erhärtungsschwinden (Primärschwindung) zu Flankenabrissen führt.

Der Wasseraufnahmekoeffizient w und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ sollen zwischen 50 und 100 % des Wertes für den Naturstein betragen. Eine gut abgestimmte Wasseraufnahme und Wasserdampfleitfähigkeit haben einen ausgeglichenen Feuchtehaushalt zwischen Mörtel und Gestein zur Folge und sind deswegen eine der Grundvoraussetzungen für eine gute Haltbarkeit und eine dauerhaft gleichbleibende optische Erscheinung.

Das feuchtebedingte Quellverhalten und die thermische Dehnung sind für die Dauerhaftigkeit einer Steinantragung von maßgeblicher Bedeutung. Gemeint ist hier das sekundäre Quellen und Schwinden im bereits erhärteten Zustand. Die Werte für den Steinersatzstoff sollen in einer Bandbreite von 50 bis 100 % bei der hygri-schen Dehnung α_{hy} und 50 bis 150 % bei der thermischen Dehnung α_T , bezogen auf den Naturstein, liegen.

Mit den mechanischen Eigenschaften wird die Qualität des Verbundes Naturstein-Steinersatzstoff beschrieben. Die Druckfestigkeit stellt zwar keine direkte Meßgröße zur Beschreibung dieser Eigenschaften dar, sie ist jedoch mit den anderen Kenngrößen korreliert. Sie soll 20 bis 60 % des Natursteins betragen.

Die am besten geeignete Größe zur Beurteilung des Haftverbundes Naturstein-Steinersatzstoff ist die Haftzugfestigkeit. Sie soll zwischen 0,5 bis 0,8 der Haftzugfestigkeit des Substrats betragen. Dadurch ist gewährleistet, daß im Falle eines Versagens der Riß nicht im Stein, sondern in der Grenzfläche oder im Steinersatzstoff erfolgt. Der letztgenannte Fall wird aber nur dann eintreten, wenn die Zugfestigkeit des Mörtels kleiner als seine Haftzugfestigkeit ist, was bei einer günstigen Oberflächenbeschaffenheit des Substrats und einer guten Verarbeitung durchaus möglich ist. Von besonders großer Bedeutung ist der Elastizitätsmodul (E-Modul) des Steinersatzstoffs. Er soll 80 % des E-Moduls des Gesteins nicht übersteigen, damit die durch thermische und hygri-sche Verformungen verursachten Spannungen an der Grenzfläche nicht zum Abriß führen. In erster Linie durch den E-Modul wird sichergestellt, daß sich auf mechanische Ursachen zurückgehende Schäden in der Steinersatzmasse, und nicht im Originalgestein manifestieren.

Additive Materials

As an aggregate for the production of artificial stone materials, sands that have an optimal grading curve should be used if possible. However, it should be borne in mind that it is the largest particle of the grading curve that is decisive for matching the appearance to that of the rock. Since imitating the structure of the rock is always the primary consideration, it is not always possible to achieve an advantageous grading curve. In many cases, ground original rock should be resorted to, out of which, however, all fine dust particles and clay minerals must be removed by washing. On the other hand, clay minerals may actually be desirable in order to match the material's hygric expansion to that of the original rock.

For improving the workability of stone repair mortars, in many cases highly dispersed silica (HDS) and micro glass fibers are added. HDS is used to ascertain a sufficient stiffness of the fresh mortar so that it can be applied on vertical surfaces as well as above head. Micro glass fibers lower the primary shrinkage and prevent the formation of shrinkage cracks. They have the same function like straw or animal hairs in case of historic lime mortars.

Dyeing

The dyeing of artificial stone requires considerable experience, and above all skill in restoration work. The basic color tone is probably best matched when ground original rock is added. If subsequent dyeing is necessary only natural pigments should be used.

Quality Tests

The complete testing program for the artificial stone materials is given in table 1. Basic information about the examination program can be found in Knöfel & Schubert.¹ The effect of historical additives on artificial stone materials and mortar is described in Knöfel & Winnefeld, Winnefeld & Knöfel, and Sneath.²

The samples have to be prepared in conditions as close as possible to reality, so that even during the maturing process in the laboratory it can be observed whether the hardening shrinkage (primary shrinkage) leads to detachments.

The water absorption coefficient w and the value of water vapor diffusion resistance μ should lie between 50 % and 100 % of the values for the natural stone. Well adapted water absorption and water vapor conductivity lead to a harmonious moisture balance between the mortar and the rock, and are therefore one of the basic preconditions for good durability and long-term stability in the visual appearance.

Moisture-dependent expansion behavior and thermal expansion are decisive factors in the durability of applied stone. This relates to the secondary expansion and shrinkage after the material is already in its hardened state. Relative to the values for the natural stone, the values for the artificial stone should lie in the range of 50-100% for hygric expansion α_{hy} and 50-150 % for thermal expansion α_T .

The quality of the bond between the natural stone and the artificial stone is described by its mechanical properties. The compressive strength does not represent a direct measurement of these properties, but it does correlate with the other parameters.

Ergebnisse

Bei den untersuchten Steinersatzstoffen handelt es sich um Proben, die Restaurator Egon Kaiser während seines Aufenthalts in Petra vom 7. Dez. bis 14. Dez. 1996 entnommen hatte. Die Natursteinproben (Abb. 2) stammen vom Monument 825 und sind auf Abbildung 1 markiert.

Von den in Tabelle 1 genannten Prüfungen konnten wegen unzureichender Probenformen nur drei durchgeführt werden: Die w-Wert-Bestimmung, die Messung der Biegezugfestigkeit an Bohrkernscheiben mit E-Modulbestimmung als Ersatz für die Druckfestigkeit und die Messung der Mikrobohrhärte zur Analyse des Übergangs Steinersatzstoff – Naturstein. Außerdem eignet sich die Bohrhärte auch zum Festigkeitsvergleich, da sie mit der Druck- und Biegezugfestigkeit korreliert ist.

In Tabelle 2 sind die Meßwerte für E-Modul, Biegezugfestigkeit und w-Wert aufgeführt. Die Werte im Vergleich zeigen, daß die Steinersatzmasse die Anforderungen erfüllt. Lediglich der Wasseraufnahmekoeffizient liegt geringfügig über dem Anforderungskriterium.

Die Bohrhärtemessung wurde eingesetzt, weil an den Bohrkernproben die Haftzugfestigkeit, die eigentlich vorgesehen war, wegen falscher Geometrie nicht bestimmt werden konnte. Angegeben wird der Bohrvorschub in mm/s bei 1 kg Anpreßdruck.

Wie Tabelle 3 zeigt, weist die Steinersatzmasse eine wesentlich geringere Festigkeit als das Gestein auf. Der Bohrer erreicht im Mittel eine Vorschubgeschwindigkeit von 4 mm/s. Die Nachfestigung mit Wacker OH oder Remmers 510 ist als vorteilhaft zu bewerten, da die Steinersatzmasse in sich gleichmäßiger wird und der Unterschied zum Naturstein geringer ausfällt. Die Nachfestigung ist in den Bohrkurven deutlich als Unstetigkeit ablesbar. An allen Bohrkurven zeigt sich ferner, daß der Übergang zwischen Steinersatzmasse und Gestein ohne störende Diskontinuität erfolgt. Abgelöste Trennflächen bestehen nicht. Die von Restaurator Egon Kaiser in der Werkstatt hergestellten Steinersatzmassen erreichen dieselben Werte wie die am Probefeld in Petra applizierten Massen. Die Vorort-Verarbeitung erfüllt damit dieselben Qualitätsanforderungen.

Alle Meßergebnisse lassen sich zu folgenden Aussagen zusammenfassen:

- Die Festigkeit des Sandsteins und sein E-Modul sind sehr niedrig. Aus diesem Grund genügen auch für die Steinersatzmassen niedrige Werte.
- Gesamtporosität, w-Wert und B-Wert des Gesteins sind mittel bis zum Teil sehr hoch. Die Steinersatzmasse paßt sich diesen Werten an.
- Die Nachfestigung der Steinersatzmasse mit Wacker OH wird als positiv gewertet, um die Festigkeit der Massen zu verbessern. Erforderlich sind jedoch größere Applikationsmengen, da die Eindringtiefe, wie mit Hilfe der Bohrhärtemessungen nachgewiesen wurde, nicht die gesamte Steinersatzmasse erreicht.
- Die Verwendung der roten Steinersatzmasse kann für die Durchführung freigegeben werden. Eine Nachfestigung wird dringend empfohlen, da diese Maßnahme zu einer besseren Anpassung und zu einer Homogenisierung der Eigenschaften führt.
- Die Alveolen und sandenden Oberflächen müssen abgekehrt bzw. ausgekratzt werden, um die versalzten Oberflächenschichten zu entfernen.

It should lie in the range of 20-60 % of that of the natural stone. The most suitable parameter for assessing the adhesion between the natural stone and the artificial stone is the adhesive strength. This should lie between 0,5 and 0,8 of that of the substrate. This ensures that in case of failure, the crack does not occur in the stone but at the interface, or in the artificial stone material. However, the latter can only occur if the tensile strength of the mortar is less than its adhesive strength, which is certainly possible if the substrate has favorable surface qualities and has been well finished.

The elasticity module (E-module) of the artificial stone material is particularly important. It should not exceed 80 % of the E-module of the rock, so that thermal and hygric stress does not lead to material detachments. The E-module is the main way of ensuring that damage arising due to mechanical causes affects the artificial stone and not the original rock.

Results

The artificial stone materials investigated consist of samples taken by the restorer Egon Kaiser during a visit to Petra from 7 to 14 December 1996. The natural stone samples (fig. 2) are from Tomb 825 and are shown on fig. 1.

Due to unsuitable sample shapes, it was only possible to carry out three of the tests listed in table 1: measurement of the w value; measurement of bending strength of drill core disks as a substitute for compressive strength; and measurement of the microdrill hardness, to analyze the transition between artificial stone and natural stone. Drill hardness can also be used to compare the strengths of the materials, since it correlates with compressive strength and bending strength.

Table 2 gives the measurement results for the E-module, bending strength and w value. Comparison of the values shows that the artificial stone meets the requirements. Only the water absorption coefficient is slightly above the specification criterion.

Measurements of drill hardness were used because it was not possible to measure the adhesive strength as originally planned, due to incorrect geometry in the core samples. The drilling speed is given in mm/s at 1 kg contact pressure.

As table 3 shows, the strength of the artificial stone is much lower than that of the rock. The drill reaches speed rates of 4 mm/s on average. Subsequent strengthening with Wacker OH or Remmers 510 is advantageous, since this makes the artificial stone more uniform and reduces the difference from the natural stone. Subsequent strengthening appears as irregularities in the drill curves. In addition, all of the drill curves show that the transition between the artificial stone and the rock has no disruptive discontinuities. There are no loose rupture surfaces. The artificial stone produced in the workshop by the restorer, Egon Kaiser, has the same values as the substances applied in the sample area in Petra. Local processing therefore meets the same quality standards.

The measurement results can all be summed up in the following statements:

- The strength of the sandstone and its E-module are very low. Low values are therefore also sufficient for the artificial stone.
- The total porosity, w value, and B value of the rock show figures ranging from medium to sometimes very high. The artificial stone adapts itself to these values.

Tabelle 1. Zusammenstellung der Qualitätsprüfungen für Steinersatzstoffe zur Beurteilung der Anpassung der Eigenschaften an den Naturstein¹

Qualitätsprüfungen für Steinersatzstoffe		
Eigenschaft	Symbol	Anforderung*
Dynamischer E-Modul	E-dyn	bis 80 %
Druckfestigkeit	β_{CS}	bis 60 %
Feuchtedehnkoeffizient	α_{Hy}	50-100 %
Wärmedehnkoeffizient	α_T	50-150 %
Wasseraufnahmekoeffizient	w	50-100 %
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	μ	50-100 %
Haftzugfestigkeit**	β_{AS}	0,5 ... 0,8 β HZ, Substrat
*) Die Anforderungen sind auf die Eigenschaften des Substrats bezogen.		
**) Ein Versagen ist im Steinersatzstoff wünschenswert.		

Table 1. List of quality tests carried out on artificial stone materials to assess adaptation to the properties of the natural stone¹

Quality tests for artificial stone materials		
Property	Symbol	Specification*
Dynamic E-module	E-dyn	Up to 80 %
Compressive strength	β_{CS}	Up to 60 %
Hygic expansion coefficient	α_{Hy}	50-100 %
Thermal expansion coefficient	α_T	50-150 %
Water absorption coefficient	w	50-100 %
Value of water vapor diffusion resistance	μ	50-100 %
Adhesive strength **	β_{AS}	0.5 ... 0.8 β HZ, Substrate
* The specifications relate to the properties of the substrate.		
** Failure in the artificial stone material is desirable.		

Tabelle 2. Eigenschaften der roten Steinersatzmasse im Vergleich zum Naturstein

Eigenschaft	Naturstein	Rote Steinersatzmasse	Anforderung
E-Modul	4,4 bis 7,3 kN/mm ²	2,1 kN/mm ²	bis 80 %, möglichst um 60 %
Biegezugfestigkeit	0,47 bis 2,10 N/mm ²	0,36 N/mm ²	bis 60 %, möglichst um 60 %
Wasseraufnahmekoeffizient w-Wert	3,5 bis 7,7 kg/m ² √h	8,1 kg/m ² √h	50-100 %

Table 2. Properties of the red artificial stone substance in comparison with the natural stone

Property	Natural stone	Red artificial stone substance	Specification
E-module	4.4-7.3 kN/mm ²	2.1 kN/mm ²	Up to 80%, ca. 60% if possible
Bending strength	0.47-2.10 N/mm ²	0.36 N/mm ²	Up to 60%, ca. 60% if possible
Water absorption coefficient (w value)	3.5-7.7 kg/m ² √h	8.1 kg/m ² √h	50-100%

Tabelle 3. Bohrhärte (mm/s) von Kieselolmassen (SES) mit und ohne Nachfestigung im Vergleich zum Naturstein von Monument 825. Nachfestigung mit Wacker OH bzw. Remmers 510

Material	Mittel (mm/s)	Max (mm/s)	Min (mm/s)
SES ohne	4,2	7,3	2,5
SES mit	2,5	4,3	3,3
Stein	0,3	1,2	0,2

Table 3. Drill hardness (mm/s) of silica sol repair mortars (SES) with and without subsequent strengthening, in comparison with the natural stone of Tomb 825. Subsequent strengthening with Wacker OH or Remmers 510

Material	Average (mm/s)	Max. (mm/s)	Min. (mm/s)
SES without	4.2	7.3	2.5
SES with	2.5	4.3	3.3
Stone	0.3	1.2	0.2

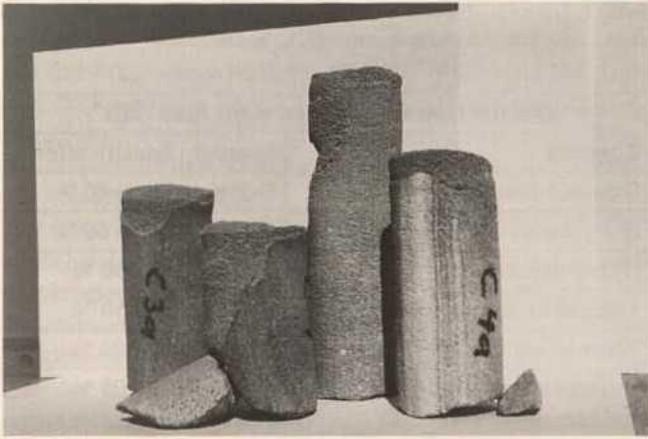


Abb. 2. Bohrkern mit roter Steinersatzmasse vom Probefeld
Fig. 2. Cores from the sample area with red artificial stone material

Anmerkungen

- 1 D. KNÖFEL/P. SCHUBERT (Hrsg.), *Handbuch der Mörtel und Steiner-gänzungsstoffe in der Denkmalpflege*, Sonderheft der Publikationsreihe BMFT-Verbundforschung für die Denkmalpflege, Berlin 1993, S. 225.
- 2 D. KNÖFEL/F. WINNEFELD, *Anpassung von Fugendeckmörteln an Ziegelmauerwerk*, in: Rolf Snethlage (Hrsg.), *Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung*, Bd. 5 (1993), Berlin 1995, S. 147–157. – F. WINNEFELD/D. KNÖFEL, *Modifizierung von Kalkmörteln zur Fugenreparatur von Ziegelmauerwerk*, in: Rolf Snethlage (Hrsg.), *Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung*, Bd. 6 (1994–1996), Stuttgart 1998 a, S. 227–236. – F. WINNEFELD/D. KNÖFEL, *Entwicklung eines Kalkputzmörtels für Ziegelmauerwerk am Beispiel der Orangeriesäle im Schloß Schwerin*, in: Rolf Snethlage (Hrsg.), *Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung*, Bd. 6 (1994–1996), Stuttgart 1998 b, S. 261–267. – ROLF SNETHLAGE, *Leitfaden Steinkonservierung*, Stuttgart 1997.
- 3 SNETHLAGE (wie Anm. 2).

Abbildungsnachweis

Alle Abbildungen vom Autor

- Subsequent strengthening of the artificial stone using Wacker OH shows positive values in improving the strength of the substances. However, larger amounts have to be applied, since the drill hardness measurements show that the full depth of the artificial stone is not penetrated.
- The use of red artificial stone can be approved for implementation. Subsequent strengthening is strongly recommended, since this leads to improved adaptation and homogenization of the material's properties.
- The alveoli and sanding surfaces must be brushed or scraped in order to remove salted surface layers.

Translation from the German into English by Michael Robertson

References

- 1 D. KNÖFEL/P. SCHUBERT (eds.), *Handbuch der Mörtel und Steiner-gänzungsstoffe in der Denkmalpflege*, Special issue of series 'BMFT-Verbundforschung für die Denkmalpflege', Berlin, 1993, p. 225.
- 2 D. KNÖFEL/F. WINNEFELD, 'Anpassung von Fugendeckmörteln an Ziegelmauerwerk', *Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung*, Rolf Snethlage (ed.), vol. 5 (1993), Berlin, 1995, pp. 147–157. – F. WINNEFELD/D. KNÖFEL, 'Modifizierung von Kalkmörteln zur Fugenreparatur von Ziegelmauerwerk', *Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung*, Rolf Snethlage (ed.), vol. 6 (1994–1996), Stuttgart, 1998 a, pp. 227–236. – F. WINNEFELD/D. KNÖFEL, 'Entwicklung eines Kalkputzmörtels für Ziegelmauerwerk am Beispiel der Orangeriesäle im Schloss Schwerin', *Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung*, Rolf Snethlage (ed.), vol. 6 (1994–1996), Stuttgart, 1998 b, pp. 261–267. – ROLF SNETHLAGE, *Leitfaden Steinkonservierung*, Stuttgart, 1997.
- 3 SNETHLAGE (note 2).

Photo Credits

All figures by the author