

## Der Sandstein von Dafosi – Untersuchungen zu den Ursachen der Schäden und zur Konservierung

### Zusammenfassung

Dafosi liegt im Gebiet der Lößhochebene der Provinz Shaanxi nahe der Kreisstadt Binxian. Die Grotte ist in einen Sandsteinfels im Tal des Jing-Flusses eingegraben. In ihrem Innern tritt Sickerwasser an einer Tonsteinschicht, welche die gesamte Grotte in ca. 2 m Höhe durchschneidet, als kleine Quelle aus. Kapillarer Feuchte- und Salztransport haben zu gravierenden Schäden an den Wänden geführt. Bei den Sandsteinen unterhalb der genannten Tonsteinschicht handelt es sich petrographisch um Kalksandsteine, bei denen oberhalb davon um sehr poröse, aber dickbankige Sandsteine mit Gesteinsbruchstücken. Die Festigkeiten liegen sehr niedrig um  $1,5 \text{ N/mm}^2$ , der E-Modul um  $2 \text{ kN/mm}^2$ . Remmers 300 hat sich bei der Erprobung verschiedener Steinfestiger als am besten geeignet erwiesen. Es besitzt die beste Eindringtiefe und erzielt ein homogenes Festigkeitsprofil. Klimamessungen zeigen, daß aufgrund des größten Taupunktabstands die Tränkungen im Herbst durchgeführt werden sollten. Die relative Luftfeuchte soll dabei unter 65 % betragen, da sonst aufgrund von Kondensation zu hohe Porenfüllgrade auftreten können.

### Zur Topographie und Geologie von Dafosi

Die Topographie der Umgebung von Dafosi wird ausführlich im dem Bericht von Pang Bietong & Fan Yun (1989) beschrieben. Vertieft wird diese Untersuchung durch eine Studie zur „Geologie und Verwitterung von Dafosi“ durch das Untersuchungs-institut des Ministeriums für Technik und Elektrizität (1991, sog. 80000-Zeichen-Bericht). Beide Berichte sind im Auftrag des Staatsministeriums für Kulturgüter und des Ministeriums für Kulturgüter der Provinz Shaanxi sowie des Technischen Zentrums für Denkmalpflege der Provinz Shaanxi entstanden. Die folgenden Ausführungen fassen die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammen.

#### Topographie und Klima

Dafosi liegt auf der Lößhochebene im Norden der Provinz Shaanxi nahe der Kreisstadt Binxian in einer hügeligen Landschaft. Das Gebiet wird vom Jing-Fluß in einem breiten Tal mit flachen Ufern durchflossen. Dafosi liegt ca. 840 m über NN; die mit Löß bedeckten Bergrücken erreichen Höhen von 1024 bis 1030 m über NN (Farbtafel XVIII). Die Lößrücken sind durch tiefe Erosionsrinnen bis auf die unterliegenden Sandsteine eingeschnitten. Die Flanken der aus Sandstein aufgebauten Talränder des Jing-Flusses sind durch eiszeitliche Gletscher gerundet.

Das Gebiet hat ein halbtrockenes Kontinentalklima. Die Regenfälle sind auf wenige Monate konzentriert, es überwiegt die

## The Sandstone of Dafosi – Investigation into Causes of Deterioration and Conservation Methods

### Abstract

Dafosi is situated in the loess upland plain of the Shaanxi province near the district town of Binxian. The grotto is carved into a sandstone rock in the Jing river's valley. A claystone layer in the sandstone intersects the grotto about 2 m above the present ground level, causing water to seep into the grotto. Capillary moisture and salt transport have severely damaged the walls. The sandstone below this claystone layer is calcareous, whereas that above is thick-layered, very porous and contains rock fragments. The strength of the rocks is very low at  $1.5 \text{ N/mm}^2$ , the E-modulus is  $2 \text{ kN/mm}^2$ . Tests showed that Remmers 300 was the most suitable consolidant. It has the greatest penetration depth and produces a homogeneous strength profile. Climatic measurements show that the conservation measures should be carried out in autumn due to the large dew point temperature interval at this time. The relative humidity should be below 65%, as condensation could otherwise lead to too high a moisture content in the stone.

### The Topography and Geology of Dafosi

The topography of the Dafosi's surroundings is described in detail in the report by Pang Bietong & Fan Yun (1989). "The Study and Survey of the Environmental and Geological Situation and Deterioration of Dafosi Cave in Binxian" by the Institute of Survey of the Technical and Electrical Ministry (1991, the so-called 80000 Signs Report) goes into even greater detail. Both reports were prepared for the State Ministry for Cultural Property and the Ministry for Cultural Property in Shaanxi Province, as well as the Technical Centre for the Preservation of Cultural Property in Shaanxi Province. The following points summarise the main findings of these investigations.

#### Topography and Climate

Dafosi lies in the loess plain in the northern part of the Shaanxi province near the district town of Binxian. The landscape is hilly and is cut through by the broad valley of the flat-banked Jing river. Dafosi is about 840 m above sea level. The hills, covered by layers of loess, reach heights of between 1024 and 1030 m above sea level (color plate XVIII). Erosion has led to deep channels cutting through the loess layers right down to the sandstone below. The sandstone rocks of the valley have been rounded by ice-age glaciers.

The area has a semi-dry continental climate. Evaporation is predominant, rainfall being concentrated to a few months. Great

施奈特拉格 马涛 和玲  
温得勒 沙得勒 西蒙

# 大佛寺砂岩风化原因 及其保护方法的研究

## 摘要

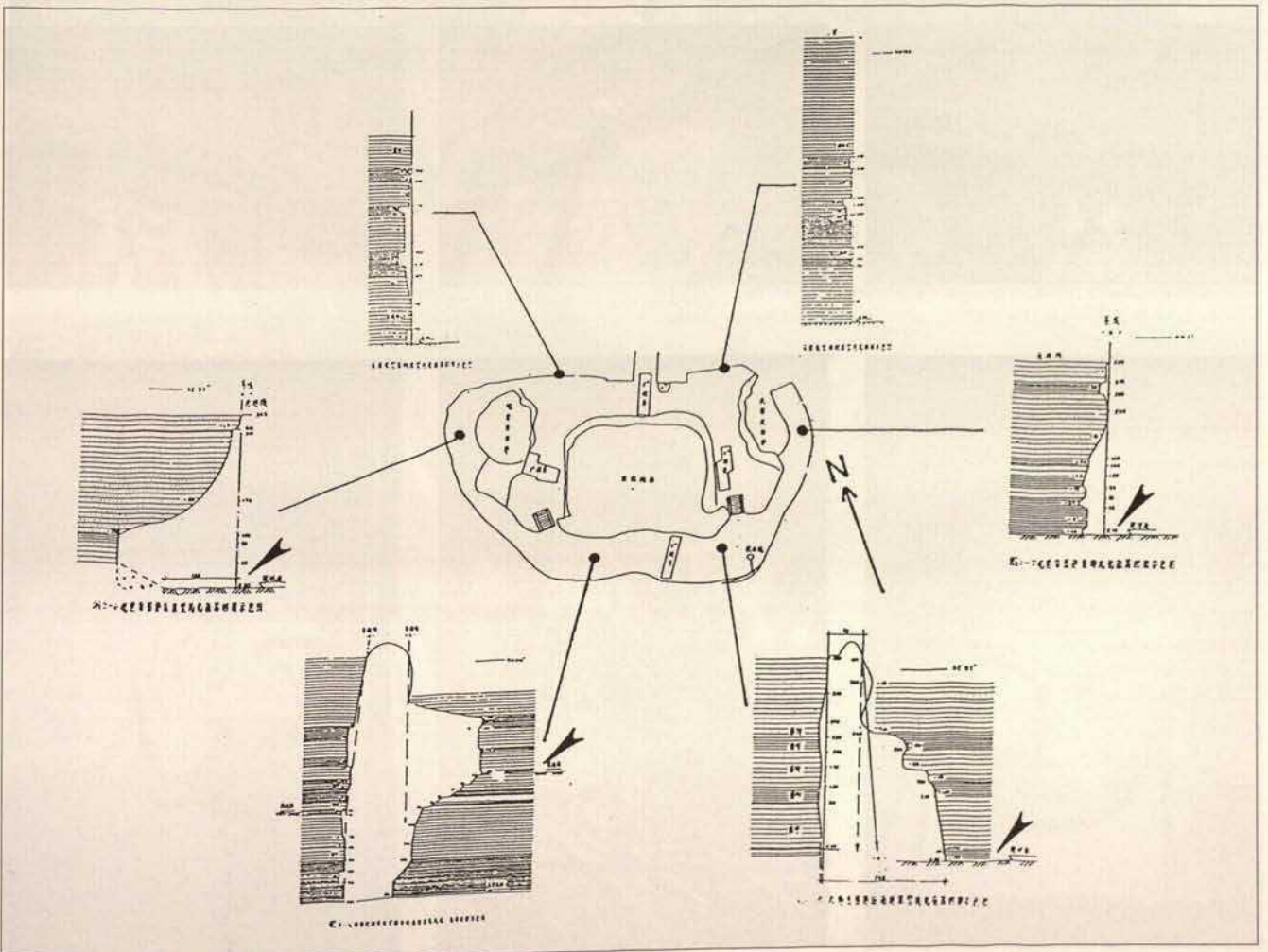
大佛寺位于陕西省彬县附近的黄土高原上,大佛寺石窟开凿于泾河谷系的砂岩体中。距窟内现地面约2米高的岩壁出露有一泥质页岩层贯穿整个石窟,导致山体迳流水沿此层面源源渗出。毛细水和盐份的迁移

是破坏岩壁的最主要因素。该页岩层以下的砂岩就岩相学看属石灰砂岩,页岩层以上的则是沉积较厚,孔隙较大并拌有岩屑的厚层砂岩。大佛寺砂岩力学强度很低,约为  $1 \text{ N/mm}^2$ , 弹性系数约为  $3 \text{ KN/mm}^2$ 。实验

Abb. 1. Stratigraphie und Erosion der Sandsteine in der Grotte Dafosi; der wasserstauende Tonsteinhorizont ist jeweils mit einem Pfeil markiert (80 000 Zeichen Bericht)

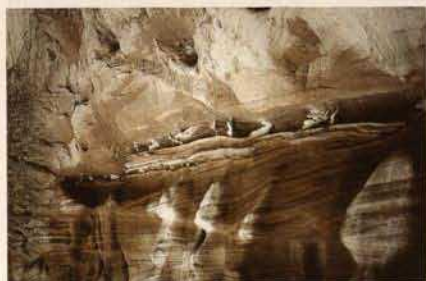
Fig. 1. The stratigraphy and erosion of the sandstone in the Dafosi grotto; the claystone layer responsible for accumulating water is marked with arrows

图1. 大佛寺石窟地层结构外观及岩石风化情况 (富集水的粘土层用箭头标示)





1



2



3

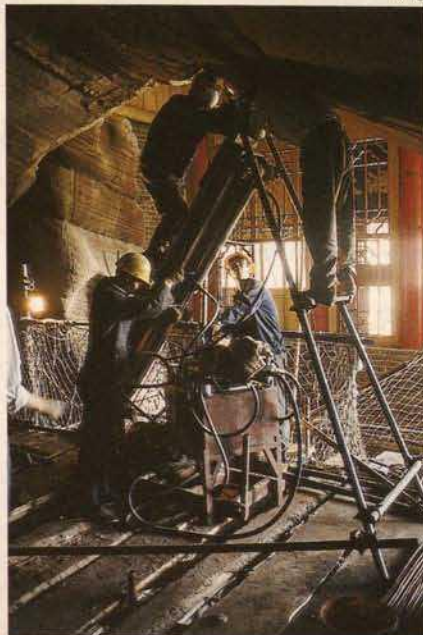


4

▽ 5



▽ 6



▽ 7





Verdunstung. Tages- und Jahrestemperatur sind großen Schwankungen unterworfen. Die jährliche Niederschlagsmenge liegt bei 814 mm, das Minimum bei 410 mm. Die Regenmonate sind Juli, August und September. In dieser Zeit fallen etwa 60 % der Jahresniederschlagsmenge. Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt zwischen 9,5 und 11,5 °C, die Maximaltemperatur bei 40 °C und die Minimaltemperatur bei -21,3°C. Die durchschnittliche Jahresverdunstung beträgt 1186-1237 mm. Sie ist etwa doppelt so hoch wie die durchschnittliche Regenmenge eines Jahres. Die Luftfeuchtigkeit liegt bei etwa 60 %, in den Monaten September bis Oktober bei 70-80 %.

Das hydrologische System ist hauptsächlich vom Jing-Fluß geprägt. Charakteristisch für dieses Flußnetz sind große Schwankungen des Wasserstandes, ein großer Erosionskoeffizient und ein hoher Sandgehalt des Flußwassers. Die transportierte Wassermenge beträgt 42-100 t/s. Der höchste Wasserstand der Geschichte lag bei 850 m über NN, der niedrigste bei 820 m über NN. Die durch den Fluß transportierte Sandmenge beträgt 67-305 kg/m<sup>3</sup>. In einem Jahr werden somit zwischen 41 und 636 Mio. t Sand transportiert. Die Jahreserosion beträgt 960-1500 t/km. Der Fluß ist Vorfluter für das Grundwasser. Der Abfluß der Niederschläge von der Hochfläche ist gut.

Aus den langfristigen Beobachtungen des Wasserstandes des Jing-Flusses läßt sich abschätzen, daß alle 100 bis 200 Jahre Wasserhöhen erreicht werden können, welche zu einer Überflutung der Grotte führen. Diese Sedimenteintragungen in die Höhle sind im jetzigen Boden der Grotte nachgewiesen, der sich z.B. im Salzgehalt von den Gesteinsschichten unterscheidet. Weiterhin sind aber auch künstliche Auffüllungen des Bodenniveaus vorgenommen worden.

## Geologie

Die Grotte Dafosi ist in die Sandsteinfelsen der Talflanke eingeschnitten (Farbtafel XVIII). Man hat dazu eine natürliche Höhle nach unten und nach oben grabend erweitert. Der rote Sandstein gehört der Kreideformation an (siehe 80000-Zeichen-Bericht bzw. Sneathlage 1993). Überlagert wird er von Lößformationen des Quartär, die hier mit einer sandig-tonigen Lage des frühen Q 3 einsetzen. Darüber folgen zwei weitere Schichten Lößsand aus mittlerem und oberem Q 3. Aus dem geologischen Profil geht eine annähernd horizontale Lagerung der Gesteinsschichten hervor. Die gesamte Höhendifferenz von der Talsohle bis auf die Lößhochfläche beträgt 180 m, die Höhe der Sandsteinfelswand 55 m, die Mächtigkeit der Lößformation N 2 ist 15 m, die der beiden anderen Formationen aus Q 3 zusammen bis zu 110 m.

Die Ansicht des Felsens von Dafosi von Norden her gesehen (Farbtafel XVIII) zeigt eine Vielzahl von etwa 45° NO-SW und 145° SO-NW streichenden und etwa 45° nach SE bzw. SW einfallenden Klüften, die den Felsen durchsetzen und in einzelne Blöcke zerlegen. Eingelagert in den Sandstein sind unterschiedlich ausgedehnte, leicht eingedellte Tonsteinlagen, welche als Wasser-Stauhohizonte wirken. Eine dieser Linsen ist in der Farbtafel XVIII deutlich links neben dem Tempelvorbau zu sehen. Eine ebensolche Tonsteinlinse durchschneidet auch die Grotte im Innern mit einer Umfanglänge von 65 m. Das an ihr austretende Sickerwasser ist der Hauptschadensfaktor für die Zerstörungen an den Wänden und den Figuren im Innern der Grotte.

Der 80000-Zeichen-Bericht (1991) gibt eine Beschreibung der Sandsteinstratigraphie im Innern der Grotte an sechs maßgeblichen Stellen (Abb. 1). Aus ihr kann die Abfolge der Sand-

fluctuations are present in the daily and annual temperatures. There is an annual downfall of 814 mm, the minimum being 410 mm. Rain falls in July, August and September. During this period approximately 60% of the total annual rainfall takes place. The average annual temperature lies between 9.5 and 11.5°C, the maximum temperature being 40°C and the minimum -23°C. The average annual evaporation is 1186-1237 mm, about double the amount of the average annual rainfall. The annual mean of relative humidity is circa 60%, increasing to 70-80% from September to October.

The hydrologic system is determined on the whole by the Jing river. Characteristics of this river network are the large fluctuations in the water level, a large erosion coefficient and a high sand content in the water. Water is transported at 42-100 t/s. The highest recorded water level was 850 m above sea level, the lowest 820 m above sea level. The river transports between 67-305 kg/m<sup>3</sup> of sand, so that in one year between 41 and 636 million tons of sand are transported. The annual erosion is 960-1500 t/km. The river is fed by the groundwater. The drainage system from the plain is good.

A long-term observation of the Jing river's water level indicates that every 100-200 years the level can be so high that the grotto is flooded. Proof that sediment has been carried into the cave has been found in the present base of the grotto, which, for example, has a different salt content to the rock's layers. The base has, however, also been deliberately filled in from time to time.

## Geology

The Dafosi grotto has been carved into the sandstone rock of the valley walls (*color plate XVIII*). It is a natural cave that was enlarged by digging both upwards and downwards. The red sandstone is part of the Cretaceous period (see the 80000 Signs report or Sneathlage, 1993), which is covered by loess layers starting with a sand-clay layer from the early Q3. Two further layers from the middle and late Q3 follow. The geological profile shows a horizontal layering of the strata. The vertical distance between the base of the valley and the top of the hill is 180 m. The sandstone rock is 55 m high. The loess formation N2 is 15 m high and the remaining two formations from the Q3 are together 110 m.

When the Dafosi rocks are viewed from the north (*color plate XVIII*) a multitude of fissures throughout the rock stretching 45° NE-SW and 145° SE-NW with a 45° inclination towards the SE or SW can be seen. These fissures separate the rock into detached blocks. Within the sandstone series are claystone layers that collect the water seeping from the top of the hill. One of these layers can be clearly seen to the left of the temple entrance in *color plate XVIII*. The claystone layer that intersects the grotto is 65 m long. The water seeping out at this layer is the main cause of the damage to the walls and the figures inside the grotto.

The 80000 Signs report (1991) describes the sandstone stratigraphy of six relevant areas within the grotto (*fig. 1*), by which the sequence of the sandstone layers and the extent of damage can be explained. The lower strata consist of thin, 20-30 cm thick layers of sandstone alternating with thin claystone beds, both of which are severely crevassed. These unstable beds are responsible for the deterioration and increasing lack of stability of the two Bodhisattvas and in particular the nimbus of the Great

◀◀◀ Farbtafel XVIII

- 1 Die Landschaft von Dafosi mit dem Jing Fluß
- 2 Gesteinschichtungen am Fels von Dafosi
- 3 Abscherende Gesteinsschichten am Fels von Dafosi
- 4 Ausgewaschene Tonschichten im Sandstein von Dafosi
- 5 Haupt des Großen Buddha
- 6 Vernadelung der Grottendecke
- 7 Haupt des Großen Buddha, Seitenansicht

◀◀ Farbtafel XIX

Höhlendecke; Gesicht der Fliegenden Gottheit (Figur Nr. 13)

◀◀◀ Color Plate XVIII

- 1 The landscape of Dafosi, including the Jing river
- 2 Layers on stone in the bedrock at Dafosi
- 3 Sheering off stone layers in the bedrock at Dafosi
- 4 Washed out clay layers in the sandstone at Dafosi
- 5 Head of the Great Buddha
- 6 Anchoring of the grotto ceiling
- 7 Side view of the head of the Great Buddha

◀◀ Color Plate XIX

Face of on of the Flying Deities (no. 13) on the ceiling

◀◀◀ 彩色图版十八

- 1 石窟寺前泾河景观
- 2 岩壁堆积岩层
- 3 脱落之岩层
- 4 沉积泥质页岩层
- 5 大佛头部
- 6 石窟顶部钻钉
- 7 大佛头部侧视

◀◀ 彩色图版十九

大佛洞窟顶; 第 13 号飞天面部

表明: Remmers 300 是一系列石质加固剂中最适于大佛寺石质的保护剂, 它的渗深最大并能形成强度均匀的剖面。小气候监测的结果表明: 加固工作应在秋季实施, 因为这时相对湿度低于 65%, 露点温度也较高, 否则冷凝作用会使岩石有较高的含湿量而影响加固效果。

### 大佛寺石窟的地形与地质

大佛寺周围区域地形地貌已由潘别桐和方云 (1989) 详细叙述于其踏勘报告中。这些问题又由机械电子工业部勘察研究院在其《环境地质条件及病害的勘察与研究》报告中深入探讨。两篇报告均由国家文物局, 陕西省文物保护中心委托成文。下面将综合两篇勘察报告的主要结果。

#### 地形与气候

大佛寺位于陕北黄土高原南部原梁沟壑区上, 离彬县不远, 地势起伏大, 泾河穿越本区, 河谷及其两岸地势低缓。大佛寺标高约 840 米, 基岩由黄土覆盖。原上标高 1024 至 1030 米 (彩色图版十八), 黄土原深受沟谷切割, 且切穿黄土层而嵌入基岩层。区内气候属半干旱大陆性气候, 降水量小而集中, 蒸发作用较强烈。年温差和日温差变化大, 年降水量最高达 814 mm, 最低仅 410 mm。降水期为七月, 八月和九月, 占年降水量的 60% 以上。多年平均温为摄氏 9.5 度到 11.5 度, 极端最高气温可达 40 度, 最低为 -21.3 度。多年平均蒸发量为 1186 — 1237 mm, 为年降水量的两倍左右。相对湿度在 60% 左右, 而九月至十月为 70 — 80%。地表水系主要为泾河水系。泾河主要特点是: 水位、水量变化极大, 侵蚀模数大且含砂量高, 年平均流量 42 — 100 吨/秒, 历史上最高洪水位高达海拔 850 米, 最低水位仅海拔 820 米。年平均含砂量 67 — 305 公斤/方, 年输砂量达 41 至 636 百万吨。年侵蚀模数为 960 — 1500 吨/平方公里。纵观泾河水位的历史资料, 可以大致估算出每隔 100 到 200 年, 泾河水位就有可能升到一定高度而倒灌进石窟。研究表明, 窟内现地面的堆积物, 其成份 (粉土质土层)、含湿量、含盐量均与岩石相差很大, 可以肯定是泾河洪水带进的洪积物。

#### 地质

大佛窟开凿于泾河谷地的红色砂岩体中, 它是由一天然山洞向上和向下拓凿而成的 (彩色图版十八)。该红

steinschichten und das Ausmaß der Schäden entnommen werden. Die unteren Gesteinsschichten bauen sich aus einer Abfolge von dünnbankigen, 20-30 cm mächtigen Sandsteinlagen im Wechsel mit dünnen Tonsteinlagen auf, die beide stark zerklüftet sind. Diese instabilen Schichten sind verantwortlich für die Schäden und die drohenden statischen Gefährdungen an beiden Boddhisattvas und insbesondere der Stützsichten des Nimbus des Großen Buddha. Abgeschlossen wird diese dünnbankige Abfolge von dem bereits oben genannten durchgängigen Tonsteinhorizont, an dem insbesondere nach starken Regenfällen überall Wasser in die Grotte einsickert. Eine Einzeluntersuchung hat ergeben, daß nach einem Regenereignis das Sickerwasser nach einer 14tägigen Verweildauer im Felsen verstärkt austritt. Über diesem Tonsteinhorizont folgen dick gebankte, weniger zerklüftete Sandsteinschichten mit Mächtigkeiten von 1 m und mehr.

An den Einzelprofilen in Abbildung 1 läßt sich die starke Erosion im Bereich des Tonsteinhorizontes sehr gut ablesen. Die Rückerosion beträgt im Umgang hinter dem Großen Buddha bis zu 2,50 m. Der ursprüngliche Boden liegt hier bis zu 2,80 m unter dem heutigen Niveau. Geringer sind die Schäden an der nach außen abschließenden Nordwand, da dieses Gestein nicht vom Sickerwasser durchfeuchtet wird.

Abbildung 2 zeigt eine schematische Vertikalabfolge der Schadensintensitäten in der Grotte. Die Schäden sind am stärksten in der Zone B (Höhenbereich von 2-6 m), an deren Basis der Sickerwasserhorizont liegt. Auch die unmittelbare Bodenzone A ist intensiv geschädigt. Nach oben hin nehmen die Schäden in den Zonen C und D deutlich ab. In Zone A und B treten besonders starke Salzausblühungen auf, die zu intensiver Schuppenbildung und Absanden führen. Zone C und D sind vor allem durch Absanden gekennzeichnet.

Die östliche Grottendecke ist bereits fast vollständig abgestürzt. Als Ursache kann vor allem an der Felswand abfließendes Regenwasser angesehen werden, welches von außen kommend in die Grottendecke eingedrungen ist. Diese wird nach Regenfällen aber auch durch Kluftsickerwasser durchfeuchtet. Um das Abfließen von Regenwasser an der Felswand zu verhindern, hat man oberhalb der Sandsteinfelswand in der Schicht Q 2 einen Entwässerungsgraben eingezogen, welcher das Oberflächenwasser nach beiden Seiten hin ableiten soll.

## Beschreibung der Sandsteine

Die für die folgenden Untersuchungen verfügbaren Proben stammen aus zwei Vertikalprofilen entlang der Felswand auf der rechten und linken Seite des Großen Buddha (Abb. 2). Es handelt sich um Bohrkernproben aus unterschiedlichen Höhenlagen und um Kratzproben. Die Entnahmepunkte sind so gelegt, daß sie die unterschiedlichen Gesteinsvarietäten und Schadenszonen erfassen.

### Petrographische Beschreibung

Die mikroskopischen Dünnschliffuntersuchungen lassen sich zu folgenden Ergebnissen zusammenfassen:

#### Sandstein 1 m Höhe:

Struktur: dicht, feinkörnig; Textur: parallele Einregelung von Glimmern; Korngröße: max. 0,2 mm, mittlere 0,05-0,1 mm; Kornform: angular, selten subgerundet; Kornkontakte: Linie, ferritische Bindung; Matrix: Calcit, Gesteinsbruchstücke,

Buddha. At the upper end of the claystone strata is the previously mentioned claystone bed, along which water, especially after heavy rainfall, seeps into the grotto. An examination showed that water remained in the rock for 14 days following a downpour and then seeped out. Above the claystone bed are sandstone layers with a thickness of 1 m or more that are less crevassed.

The severe erosion around the claystone layer can be clearly seen in the profiles in *figure 1*. The sandstone behind the Great Buddha has been eroded back by 2.50 m. The original base of the grotto is 2.80 m below the present level. The damage is not so great along the outer northern wall, as this rock face is not affected by seepage water.

*Figure 2* is a vertical view of the deterioration in the grotto. The worst damage is in Zone B (2-6 m) at the base of which the water seeps out. Zone A, directly below, is also severely damaged. The deterioration is noticeably less further up, in the Zones C and D. In Zones A and B salt efflorescences cause an intensive flaking and sanding off. Zones C and D suffer mainly from sanding off.

The eastern part of the grotto's ceiling has already almost completely collapsed as a result of rainwater driven in from outside flowing down the rock wall. The wall is however also saturated by seepage water following a downpour. To prevent the rainwater from running down the rock wall a drainage channel has been dug in the layer Q2 above the sandstone wall that should drain the surface water away.

## Description of the Sandstones

The samples used for the following analyses are from two vertical profiles along the rock wall on the left and right side of the Great Buddha (*fig. 2*). Surface scrapings and drill core samples taken at different heights were used. They were taken at different points so that all the stone varieties and levels of deterioration could be covered.

### Petrographic Description

The microscopic thin section analysis leads to the following results:

#### Sandstone at 1 m:

Structure: compact, fine-grained; Texture: parallel formation of mica; Grain size: max. 0.2 mm, average 0.05-0.1 mm; Grain shape: angular, seldom rounded; Grain contacts: linear, ferric bond; Matrix: calcite, rock fragments, clayey-ferric; Pore size: 0.01 mm; Composition: quartz 60 Vol.-%, feldspar 10 Vol.-%, calcite 20 Vol.-%, rock fragments 5 Vol.-%, pores 5 Vol.-%; Clay minerals: illite, kaolinite, ± chlorite; Classification: feldspar-bearing calcareous sandstone.

#### Sandstone at 2 m:

Structure: compact, fine-grained; Texture: not detectable; Grain size: max. 0.4 mm, average 0.2 mm; Grain shape: rounded; Grain contacts: linear and point contact, clayey-ferric bond; Matrix: carbonatic, rock fragments, clayey-ferric; Pore size: 0.1-0.2 mm; Composition: quartz 45 Vol.-%, feldspar 15 Vol.-%, calcite 15 Vol.-%, rock fragments (shale and quartzite) 15 Vol.-%, pores 10 Vol.-%; Clay minerals: illite, kaolinite, ± chlorite; Classification: feldspar-bearing calcareous sandstone with rock fragments.

色砂岩属于白垩系志丹群洛河组砂岩，并由早第三系 N2 泥砂质黄土层所覆盖，再上分别为第三系中期和晚期黄土。地质剖面图表明该区岩层基本呈水平构造，谷底与黄土原顶高差约有 180 米：砂岩岩壁高 55 米，黄土原 N2 厚 15m，其它 Q3 时期形成的两层冲积沉积层共高 110 米。从大佛寺北边看大佛寺岩体的全貌（彩色图版十八），有多组走向为 45 东北—西南，145 东南—西北且倾向为 45 东南或西南的裂隙构造贯穿岩体并把岩体切割成多块。在砂岩层中夹杂有不少泥质页岩层，它们阻碍了山顶的下渗水，使之在其界面上汇集形成局部渗水带。其中一个很明显的页岩汇水带可以在彩色图版十八中进窟甬道左边见到。该页岩层将大佛寺窟内砂岩分成二段，出露范围达 65 米长，从其交界面渗出的水就是破坏窟壁和石窟内造像的主要因素。《大佛窟环境地质条件与病害的勘察与研究》报告中，对大佛窟内 6 个主要地带的砂岩层理结构进行了勘察（图 1），依此可以列出砂岩层的顺序和受损害的情况。窟内底部岩层由细粒，20—30 厘米厚的砂岩层与薄层页岩交错形成，两者均受裂隙交切。这些不稳固的岩层基础对两尊菩萨造像，特别是大佛身光下半部的力学结构有很大的影响，从而导致稳定性降低和风化。在前已述及的渗水页岩层上部，时常有水渗出，特别是雨后。据 94 年夏天观测：雨后渗水在岩体中储存 14 天后才基本流出。该页岩层以上的砂岩由厚度在 1 米或 1 米以上的厚层、较少裂隙交切的砂岩构成。图 1 显示了该页岩层周围岩石风化的严重程度：大佛背后砂岩风化形成的凹槽深度达 2.5 米，原来的窟底在现窟底 2.80 米以下。大佛窟的北壁（外墙）由于不受渗水浸湿，风化损坏相对轻微的多。

图 2 给出了大佛窟内的垂向风化状况。损坏最严重的是 B 区（高度在 2—6 米之间），其下部就是有渗水的页岩层。其次是 B 区下边的 A 区，损坏也很严重。往上进入 C 区和 D 区，风化损害明显递减。A 区和

Abb. 3. Vertikalprofil der löslichen Kationen

Abb. 4. Vertikalprofil der löslichen Anionen (logarithmische Darstellung)

Fig. 3. Vertical profile of the soluble cations

Fig. 4. Vertical profile of the soluble anions (logarithmic presentation)

图 3. 可溶阳离子浓度垂直分布图

图 4. 可溶阴离子浓度垂直分布图

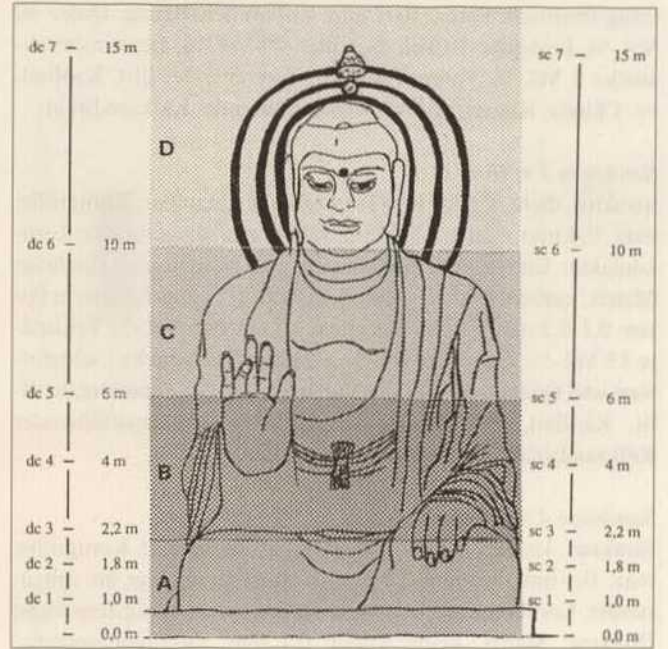
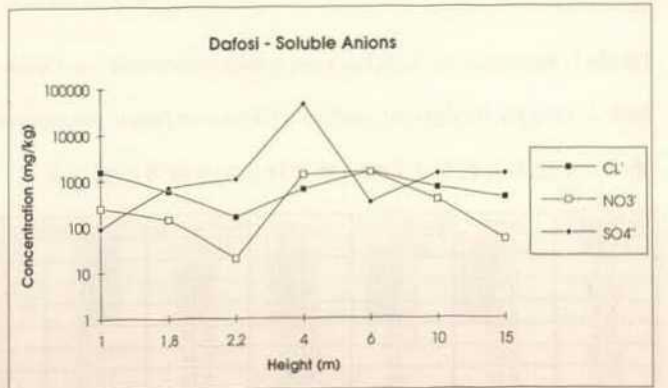
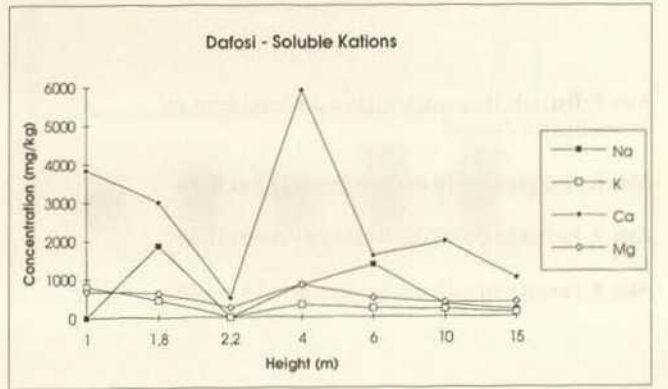


Abb. 2. Vertikalabfolge der Schadenszonen im Inneren der Grotte Dafosi (80 000 Zeichen Bericht). Lage und Entnahmehöhe von Bohrkernen (dc) und Schabeproben (sc) zur Gesteinsuntersuchung (vgl. Tab. 1)

Fig. 2. Vertical view of the deterioration in the Dafosi grotto (80 000 Sign Report), including position and height of drill core samples (dc) and surface scrapings (sc). (see table 1)

图 2. 大佛寺石窟岩石风化随高度垂直分布图（岩芯、刮样位置及高度分布图）





tonig-ferritisch; Poren: 0,01 mm; Zusammensetzung: Quarz 60 Vol.-%, Feldspäte 10 Vol.-%, Calcit 20 Vol.-%, Gesteinsbruchstücke 5 Vol.-%, Poren 5 Vol.-%; Tonminerale: Illit, Kaolinit, +/- Chlorit; Klassifikation: Feldspatführender Kalksandstein.

**Sandstein 2 m Höhe:**

Struktur: dicht, feinkörnig; Textur: nicht erkennbar; Korngröße: max. 0,4 mm, mittlere 0,2 mm; Kornform: subgerundet; Kornkontakte: Linie und Punktkontakt, tonig-ferritische Bindung; Matrix: carbonatisch, Gesteinsbruchstücke, tonig-ferritisch; Poren: 0,1-0,2 mm; Zusammensetzung: Quarz 45 Vol.-%, Feldspäte 15 Vol.-%, Calcit 15 Vol.-%, Gesteinsbruchstücke (Schieferone und Quarzit) 15 Vol.-%, Poren 10 Vol.-%; Tonminerale: Illit, Kaolinit, +/- Chlorit; Klassifikation: Feldspatführender Kalksandstein mit Gesteinsbruchstücken.

**Sandstein 4 m Höhe:**

Struktur: locker, porös; Textur: nicht erkennbar; Korngröße: max. 0,4 mm, mittlere 0,2 mm; Kornform: angular bis subgerundet; Kornkontakte: Linie und Punktkontakt, tonig-ferritische Bindung; Matrix: keine; Poren: 0,1 mm; Zusammensetzung: Quarz 40 Vol.-%, Feldspäte 10 Vol.-%, Gesteinsbruchstücke (Schieferone und Quarzit) 30 Vol.-%, Poren 20 Vol.-%; Tonmi-

**Sandstone at 4 m:**

Structure: loose, porous; Texture: not recognisable; Grain size: max. 0.4 mm, average 0.2 mm; Grain shape: angular to rounded; Grain contacts: linear and point contact, clayey-ferric bond; Matrix: none; Pore size: 0.1 mm; Composition: quartz 40 Vol.-%, feldspar 10 Vol.-%, rock fragments (shale and quartzite) 30 Vol.-%, pores 20 Vol.-%; Clay minerals: chlorite, ± illite; Classification: feldspar-bearing sandstone with many rock fragments.

**Sandstone at 15 m:**

Structure: loose, porous; Texture: not recognisable; Grain size: max. 0.3 mm, average 0.15 mm; Grain shape: angular to rounded; Grain contacts: point contact, subordinate linear contact, clayey-ferric bond; Matrix: none; Pore size: 0.1 mm; Composition: quartz 30 Vol.-%, feldspar 25 Vol.-%, rock fragments (shale and quartzite) 30 Vol.-%, calcite ±, pores 15 Vol.-%; Clay minerals: chlorite, ± illite; Classification: feldspar-rich sandstone with many rock fragments.

All sandstone varieties basically have a clayey-ferric binding cement. The red colour is caused by ferric oxide clay mineral layers on the sand grain surfaces. The sandstones at 1 m and 2 m

Abb. 5. Biaxiale Biegezugfestigkeit des Sandsteins im unverwitterten Zustand

Abb. 6. Festigkeitsprofil des Sandsteins in 2 m Höhe

Abb. 7. Festigkeitsprofil des Sandsteins in 6 m Höhe

Abb. 8. Festigkeitsprofil des Sandsteins in 10 m Höhe

Fig. 5. Biaxial bending strength of the unweathered sandstone

Fig. 6. Strength of the sandstone at 2 m

Fig. 7. Strength of the sandstone at 6 m

Fig. 8. Strength of the sandstone at 10 m

Tabelle 1: Kenndaten der verschiedenen Sandsteinvarietäten von Dafosi; zur Lage der Probenahmepunkte siehe Abb. 2

Table 1: Data for the different sandstone varieties in Dafosi; for position and height of samples taken see fig. 2

表一: 大佛寺岩石有关参数 (所采样品的高度及位置见图 2)

Nr/Height (-)/(M)	Density g/cm <sup>3</sup>	Rough Dens g/cm <sup>3</sup>	Porosity vol.-%	H <sub>2</sub> O upt npr Weight %	H <sub>2</sub> O upt npr Vol.-%	H <sub>2</sub> O upt vac Weight %	S (-)	W kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup>	B cm/h <sup>1/2</sup>	W/B kg/m <sup>3</sup>	Vapour Diff μ(-)	Hygric Dilat μm/m
1/1	2,69	2,29	15,00	3,91	8,93	6,56	0,60	1,04	n.d.	n.d.	32	244
2/1,8	2,71	2,30	15,30	3,99	9,17	6,65	0,60	1,33	1,8	74,7	20	332
4/4	2,67	2,02	24,05	7,51	15,22	11,88	0,64	37,2	26	142,5	17	719
5/6	2,67	2,06	22,73	6,36	13,12	11,01	0,58	11,6	10	117,5	n.d.	404
6/10	2,66	1,91	28,50	9,44	17,99	14,96	0,63	36,7	24	158,3	13	524
7/15	2,68	1,96	26,70	8,75	17,13	13,63	0,64	19,8	14	142,5	14	371

B 区有大量风晶花状盐份在表面析出, 从而引起岩层表面的砂化和剥落, C 区和 D 区的风化主要是表面砂化。由于外部雨水沿岩壁向下渗流的影响, 以及雨后裂隙水的浸湿, 窟内东部的顶板几乎全部崩落。为了疏导窟顶的雨水, 在砂岩壁上部的 Q2 岩层中已挖了泄洪排水沟疏导窟顶表面的来水。

### 大佛窟砂岩特性

下列分析所采用的样品采自大佛左、右两边岩壁两个垂直剖面 (采样点布设见图 4), 分别在不同高度取岩芯及表面刮样, 以尽量表现不同岩石类型和高度的情况。

#### 岩相分析

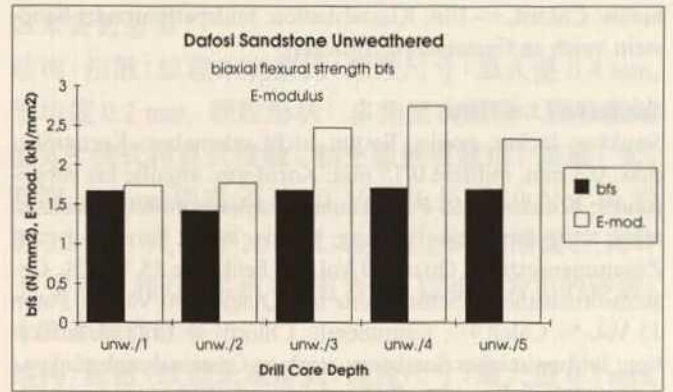
显微镜薄片分析研究的结果综合如下:

一米高的砂岩:

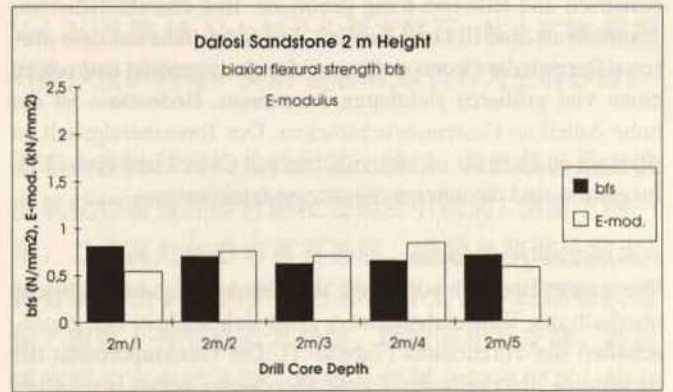
结构: 紧密, 微细颗粒; 纹理: 云母平行方向; 颗粒尺寸: 最大值 0.2 mm, 平均值 0.05-0.1 mm; 颗粒形状: 多角形及少量次圆形; 颗粒胶结型式: 线式接触, 铁质胶结; 基质: 碳酸盐, 岩屑及铁质粘土; 孔隙: 0.01 mm; 组成: 石英 60 Vol.-%, 长石 10 Vol.-%, 方解石 20 Vol.-%, 岩屑 5 Vol.-%, 孔隙 5 Vol.-%; 粘土矿物: 伊利石, 高岭土, 少量绿泥石。类别: 长石为主的石灰砂岩。

二米高的岩石:

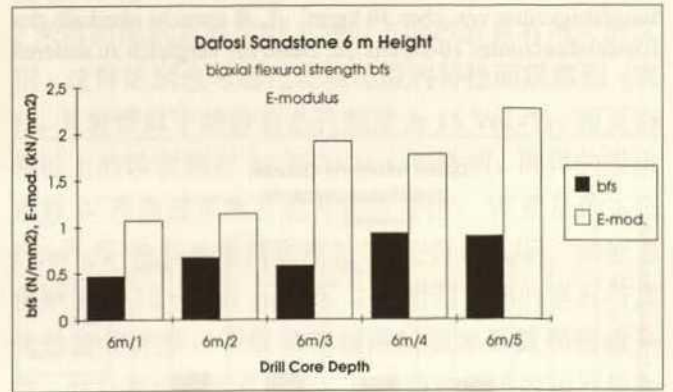
结构: 紧密, 微细颗粒; 纹理未观察到; 颗粒尺寸: 最大值 0.4 mm, 平均值 0.2 mm, 颗粒形状: 次圆形; 颗粒胶结型式: 线式和点式接触, 粘土质铁质胶结; 基质: 碳酸盐, 岩屑及铁质粘土; 孔隙: 0.1 mm-0.2 mm; 组成: 石英 45 Vol.-%, 长石 15 Vol.-%, 方解石 15 Vol.-%, 岩屑 15 Vol.-%, 孔隙 10 Vol.-%; 粘土矿物: 伊利石, 高岭土, 少量绿泥石。类别: 含岩屑以长石为主的石灰砂岩。



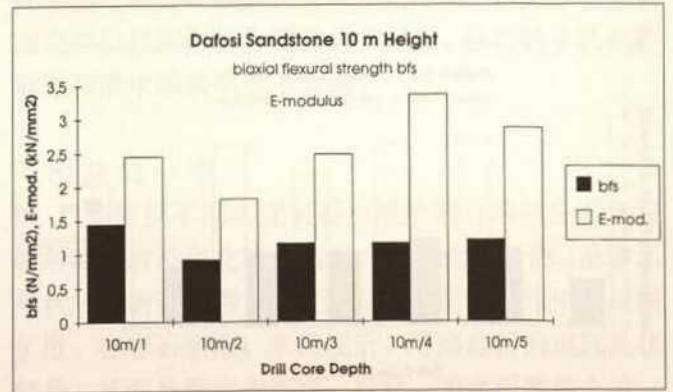
5



6



7



8

图 5. 未风化砂岩之双轴抗折强度

图 6. 窟高二米处岩石强度

图 7. 窟高六米处岩石强度

图 8. 窟高十米处岩石强度

nerale: Chlorit, +/- Illit; Klassifikation: feldspatführender Sandstein, reich an Gesteinsbruchstücken.

**Sandstein 15 m Höhe:**

Struktur: locker, porös; Textur: nicht erkennbar; Korngröße: max. 0,3 mm, mittlere 0,15 mm; Kornform: angular bis subgerundet; Kornkontakte: Punktkontakte, untergeordnet Linienkontakte, tonig-ferritische Bindung; Matrix: keine; Poren: 0,1 mm; Zusammensetzung: Quarz 30 Vol.-%, Feldspäte 25 Vol.-%, Gesteinsbruchstücke (Schiefertone und Quarzit) 30 Vol.-%, Poren 15 Vol.-%, Calcit +/-; Tonminerale: Chlorit, +/- Illit; Klassifikation: feldspatreicher Sandstein, reich an Gesteinsbruchstücken.

Grundsätzlich weisen alle Sandsteinvarietäten einen tonig-ferritischen Zement auf. Ihre rote Farbe wird durch eisenoxidefärbte Tonmineralhäutchen auf den Kornoberflächen verursacht. Die Sandsteine in 1 m und 2 m Höhe sind jedoch matrixreich, carbonatisch und teilweise tonig gebunden. Ihre charakteristischen Tonminerale sind Illit und Kaolinit. Die Sandsteine aus dem oberen Bereich der Grotte sind matrixfrei, korngestützt und zeigen einen viel größeren sichtbaren Porenraum. Bedeutsam ist der hohe Anteil an Gesteinsbruchstücken. Der Tonmineralegehalt ist geringer und besteht im wesentlichen aus Chlorit und etwas Illit. Insgesamt sind die unteren Sandsteine feinkörniger.

**Porenraumeigenschaften**

Die große Unterschiedlichkeit der Sandsteine unterhalb und oberhalb des Tonsteinhorizontes zeigt sich auch in den Eigenschaften des Porenraums (Tabelle 1). Die Gesamtporosität der Sandsteine unterhalb des Tonsteinhorizontes selbst beträgt um die 15 Vol.-%, die der Gesteine oberhalb des Tonsteinhorizontes zwischen 22 und 28 Vol.-%. Dementsprechend ändern sich auch der Wasseraufnahmekoeffizient W und der Wassereindringkoeffizient B. W springt von Werten um  $1 \text{ kg/m}^2 \sqrt{\text{h}}$  auf extrem hohe Saugfähigkeiten von über  $30 \text{ kg/m}^2 \sqrt{\text{h}}$ . B erreicht oberhalb des Tonsteinhorizontes  $10\text{-}26 \text{ cm}/\sqrt{\text{h}}$ . Diese im Vergleich zu anderen

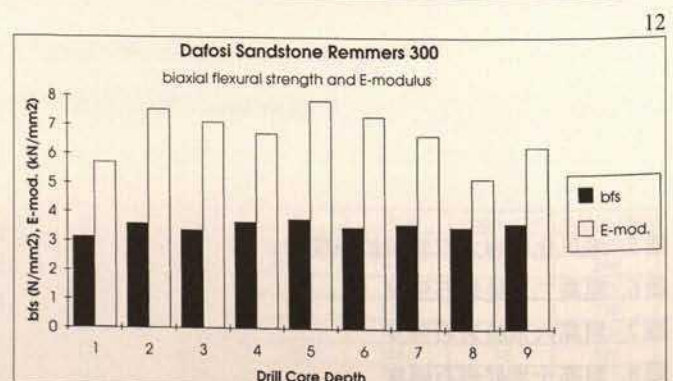
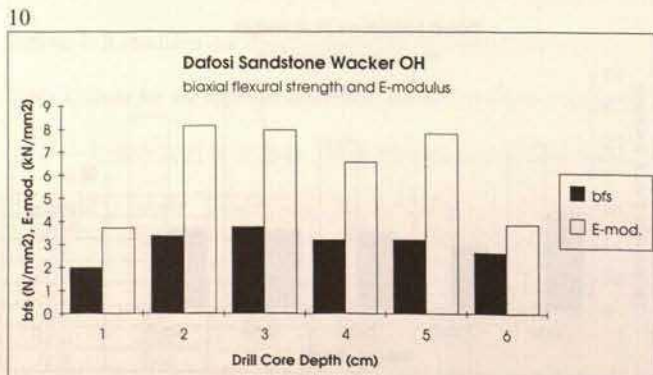
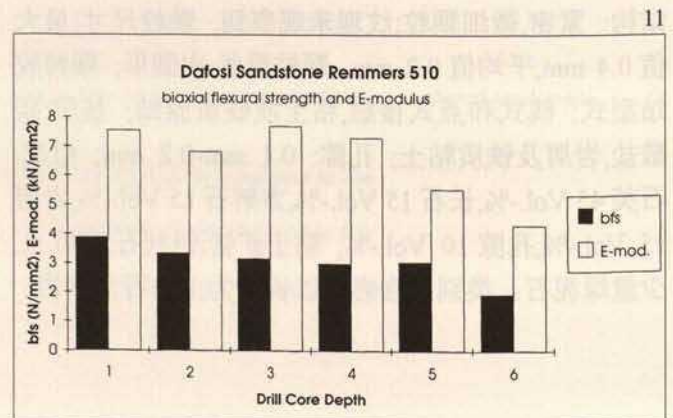
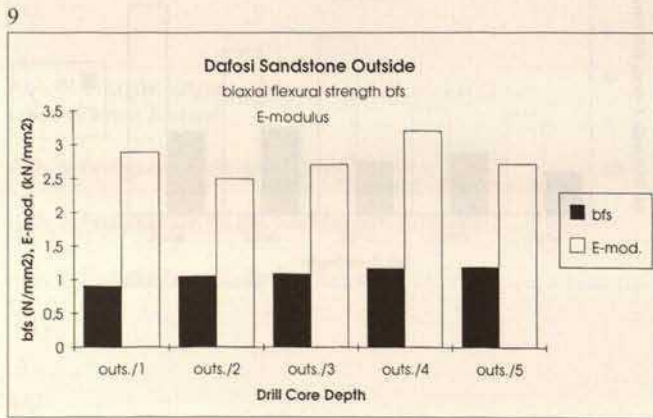
are however matrix rich, carbonatic and partly clay-bound. Their characteristic clay minerals are illite and kaolinite. The sandstones in the upper area of the grotto are matrix free and grain supported, with a visibly larger porosity. The large proportion of rock fragments is also significant. The clay mineral content is lower and consists on the whole of chlorite and some illite. The lower layers of sandstone are more finely grained.

**Pore Space**

The significant differences between the sandstones below and above the claystone layer can be seen when comparing the pore space (table 1). The total porosity of the sandstones below the claystone bed is 15 Vol.-%, whereas that of the sandstones above ranges from 22 to 28 Vol.-%. The water uptake coefficient W and the water penetration coefficient B change accordingly. W jumps from values of around  $1 \text{ kg/m}^2 \sqrt{\text{h}}$  to extremely high values of over  $30 \text{ kg/m}^2 \sqrt{\text{h}}$ , whilst B is  $10\text{-}26 \text{ cm}/\sqrt{\text{h}}$  above the claystone layer. The sandstones above the claystone layer are not only very absorbent in comparison to other sandstones but also have a high porosity that make them ideal for the use of consolidants. An insufficient penetration depth and a disproportionate strengthening of the outer area would not be expected. The application could be limited however when too much moisture is absorbed under unfavourable climatic conditions, so it is necessary to test the absorbency on certain areas. Water vapour diffusion and hygric dilatation do not have particularly high values in the sandstone.

**Distribution of Soluble Salt**

The vertical change in the intensity of deterioration as shown in figure 2 is due to the varying moisture and salt distribution in the rock. The water seeping along the claystone layer spreads out due to capillary forces. As the water evaporates the crystallizing salts form grey deposits that lead to severe sanding off and flaking. The stone at the base of the grotto is badly worn down be-



- ◁ Abb. 9. Festigkeitsprofil des Sandsteins außerhalb der Grotte. Bezugsprofil für die Bewertung der Festigungsversuche
- Abb. 10. Festigkeitsprofil nach Festigung mit Wacker OH
- Abb. 11. Festigkeitsprofil nach Festigung mit Remmers 510
- Abb. 12. Festigkeitsprofil nach Festigung mit Remmers 300

Fig. 9. Strength of the sandstone outside the grotto. Reference for the assessment of the consolidation experiments

Fig. 10. Strength profile following consolidation with Wacker OH

Fig. 11. Strength profile following consolidation with Remmers 510

Fig. 12. Strength profile following consolidation with Remmers 300

- 图 9. 窟外砂岩强度 (加固实验评价参考)
- 图 10. Wacker-OH 处理后的岩石强度曲线
- 图 11. Remmers 510 处理后的岩石强度曲线
- 图 12. Remmers 300 处理后的岩石强度曲线

四米高的岩石:

结构:松散;纹理未观察到;颗粒尺寸:最大值 0.4 mm, 平均值 0.2 mm, 颗粒形状:多角至次圆形;颗粒胶结型式:线式和点式接触、粘土质铁质胶结;基质:无;孔隙:0.1mm;组成:石英 40 Vol.-%,长石 10 Vol.-%,岩屑 30 Vol.-%,孔隙 20 Vol.-%;粘土矿物:绿泥石,高岭土,少量伊利石。类别:富有岩屑、以长石为主的砂岩。

十五米高的岩石:

结构:松散;纹理未观察到;颗粒尺寸:最大值 0.3 mm, 平均值 0.15 mm; 颗粒形状:多角至次圆形; 颗粒胶结型式:点式接触,铁质粘土胶结; 基质:无; 孔隙: 0.1 mm; 组成: 石英 30 Vol.-%, 长石 25 Vol.-%, 岩屑 30 Vol.-%,孔隙 15 Vol.-%及少量方解石; 粘土矿物:绿泥石及少量伊利石。类别:富岩屑,以长石为主的砂岩。

基本上各种砂岩均是铁质粘土胶结。其红颜色是由铁质氧化物覆盖在砂岩颗粒表面所引起的。佛窟下部一米,二米高处的砂岩富有基质,碳酸盐和部分粘土,特有的粘土矿物为伊利石和高岭土,砂岩颗粒较微细。佛窟上部的砂岩无基质,颗粒间相互支撑,并能观察到相当大的孔隙。主要是岩屑占的比例高,粘土矿物的含量少且主要由绿泥石和部分伊利石组成。

#### 孔隙特性

2米高的泥质页岩层以上和以下的砂岩具有很大的区别,这种区别也可通过比较孔隙的特性而观察到(表1)。页岩带以下的砂岩总孔隙度为 15 Vol.-%,而页岩带以上的砂岩则在 22 至 28 Vol.-%之间。同样的吸水系数  $W$  和渗透系数  $B$  也有相应变化。 $W$  值从约 1 公斤/ $m^2 \sqrt{h}$  急剧地增高到超过 30 公斤/ $m^2 \sqrt{h}$ ,砂岩  $B$  值则达到 10—26  $cm/\sqrt{h}$ 。页岩带上部的岩石与其他砂岩相比较,不仅具有较高的吸水系数和渗透系数,而且有很大的孔隙率。这种特性很适和用石质加固剂来对其进行浸渗加固。不必担心渗透度小、内层加固不均匀的问题。但是加固的效果很可能因气候条件不适,岩石含湿量较高而受到限制。因此,在某些固定部位监控岩石含湿量非常必要。砂岩的水蒸汽扩散率和浸水膨胀率也不太高。

#### 可溶盐的分布

图 2 是根据不同高度岩石含湿量和可溶盐分布状况而对窟内岩石风化程度所做的垂直向评价图。沿着水平状的页岩渗水带,渗水及可溶盐受毛细作用向周围扩散。在岩石表层,水蒸发后,可溶盐析出成风晶状结晶,从而导致岩表剥落、砂化。因而距窟底 2 米一

Sandsteinen sehr großen Saugfähigkeiten und Eindringtiefen bei den Gesteinen oberhalb des Tonsteinhorizontes, die auch mit einer hohen Porosität verbunden sind, lassen sehr günstige Eigenschaften für eine Tränkung mit Steinfestigern erwarten, so daß Schwierigkeiten mit einer zu geringen Eindringtiefe und Überfestigung der Außenzone nicht zu befürchten sein dürften. Eingeschränkt sein kann dieses günstige Verhalten jedoch bei zu hoher Sorptionsfeuchte unter ungünstigen Klimabedingungen, so daß das Aufnahmeverhalten an Musterflächen überprüft werden muß. Die Wasserdampfdiffusion und die hygri sche Dehnung zeigen keine im Bereich der Sandsteine auffälligen Werte.

#### Salzverteilung

Die in Abbildung 2 gezeigte Vertikalabfolge der Schadensintensitäten hat ihre Ursache im unterschiedlichen Auftreten von Feuchte- und Salzverteilung. Das entlang des Tonsteinhorizontes einsickernde Wasser breitet sich nach unten und oben, den Kapillargesetzen folgend, aus. An den Verdunstungsfronten zeichnen sich die kristallisierenden Salze in Form von grauen Ablagerungen ab, die mit starkem Absanden und Abschuppen verbunden sind. Aufgrund der hohen Dauerfeuchte am Boden der Grotte ist das Gestein stark zermürbt. Im Bereich um 2 bis 6 m ist die Rückwitterung infolge Absanden zum Teil so gravierend, daß ganze Flächen mit kleinen Buddha-Nischen bereits abgetragen sind.

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die Vertikalverteilung der löslichen Anionen und Kationen im Oberflächenbereich der Gesteine. Auffällig ist das relative Minimum am Tonsteinhorizont in 2,2 m Höhe. Hier befindet sich das Liefergebiet für die Salze, die sich dann nach oben und unten ausbreiten. Das wichtigste Kation ist Calcium, mit einem starken Maximum in 4 m Höhe, dem Kristallisationsbereich oberhalb der Tonsteinlage. Die Konzentrationen der anderen Kationen sind eher gering mit Werten bis ca. 1000 mg/kg (0,1 %). Bei den Anionen überwiegt Sulfat bei weitem die anderen Ionenarten. Das Maximum liegt ebenfalls in 4 m Höhe. Im Bodenbereich konzentrieren sich Chlorid und Nitrat, was auf Infiltrationen aus dem Untergrund schließen läßt. Mit Ausnahme des Sulfat in 4 m Höhe liegen aber auch die Konzentrationen der Anionen, bezogen auch auf die hohe Porosität der Sandsteine, eher in niedrigen Bereichen. Die zusätzliche Bestimmung der Salzverteilung entlang von Bohrkernprofilen ergibt, daß die Salze alle unmittelbar an der Oberfläche bis etwa 10 mm Tiefe angereichert sind. Gefährdungshorizonte in Gesteinstiefen unterhalb der Oberfläche sind deshalb nicht zu erwarten. Bei den kristallisierenden Salzen handelt es sich um Gips, Calcit und Magnesiumsulfat. Im Bodenbereich findet sich weiterhin Kaliumnitrat. Besonders das Auftreten von Calcit als Ausblüfung zeigt die direkte Zulieferung der Salze durch Sickerwässer an, in denen Calcit durch den  $\text{CO}_2$ -Gehalt des Wassers beim Durchfluß durch die Lössschichten gelöst wird. Weder Gips noch Calcit wirken hygroskopisch, so daß die Sorptionsfeuchte durch Gehalte an Magnesiumsulfat und die physikalischen Temperatureffekte gesteuert wird.

#### Festigkeitseigenschaften

Die Messung der Festigkeitseigenschaften der Sandsteine erfolgt an Bohrkernscheiben von 5 oder 8 cm Durchmesser, wobei die runden Scheiben auf einen Ring aufgelegt und belastet werden (zum Meßverfahren siehe Sattler, 1992). Die Sandsteine von Dafosi besitzen keine hohe Festigkeiten. Im unverwitterten Zustand liegt die biaxiale Biegezugfestigkeit um  $1,5 \text{ N/mm}^2$ , der E-Modul bei  $2 \text{ kN/mm}^2$  (Abb. 5). Beide Werte sind für Sand-

cause of the permanently high moisture content there. The sandstone between 2 and 6 m is in some places so severely weathered that complete areas containing the small Buddha niches have already been worn away.

Figures 3 and 4 show the vertical distribution of the soluble anions and cations in the surface area of the rocks. Their presence along the claystone layer at 2.2 m is conspicuously small as this is where the salts are delivered before spreading out through the rock. The greatest concentration of the most important cation, calcium, is at 4 m, the area above the claystone bed where crystallisation takes place. The concentration of the other cations is relatively low, with values of up to approximately 1000 mg/kg (0.1%). Sulphate is the main anion present and is also most concentrated at 4 m. The greatest amount of chloride and nitrate is in the lower area of the rock, which leads to the conclusion that they have infiltrated from below. With the exception of sulphate the greatest concentrations of anions are in the lower areas of the sandstone, owing to its high porosity.

The analysis of the salt distribution along the surface parts of the drill cores shows that all of the salts are directly at the surface, spreading only to a 10 mm depth, leading to the assumption that the rock below the surface will not be at risk. The salts found were gypsum, calcite and magnesium sulphate. Potassium nitrate was also found in the lower area. The calcite efflorescences in particular prove that the salts are formed by the seepage water, which dissolves the calcite as it passes through the loess layers. Neither gypsum nor calcite are hygroscopic, so the moisture content in the stone is dependent on the magnesium sulphate content and climatic conditions.

#### Strength

The strength of the sandstone was measured using round slices with a diameter of either 5 or 8 cm from the drill core samples, by putting them on a ring and placing loads on top (for a description of the technique see Sattler, 1992). The tests show that the Dafosi sandstone is not very strong. The biaxial bending strength of the unweathered stone is approximately  $1.5 \text{ N/mm}^2$ , while the E-modulus is  $2 \text{ kN/mm}^2$  (fig. 5). Both values are considered low for sandstone. Drill core profiles at 2, 6 and 10 m all produce similar results (fig. 6-8). At 2 m in particular the biaxial bending strength and E-modulus are extremely low ( $\beta_{\text{bzt}} = 0.5 \text{ N/mm}^2$ , E-modulus  $0.7 \text{ kN/mm}^2$ ). The strength of the stone at 6 m clearly decreases towards the outer edge, due to weathering by salt and moisture. No change in strength however can be detected at 2 m (claystone layer, continuously high moisture level, no salt crystallisation) and at 10 m (beyond Zone B with its high moisture and salt content). These measurements indicate that a stabilisation of the middle section of the grotto is necessary to improve the strength of the rock. The upper area's surface must also be treated to prevent further loss of material.

#### Experiments with stone consolidation

Sandstone drill core samples from the rocks outside the grotto were used to test various consolidants. The strength profile of the untreated stone (fig. 9) is used as a reference to assess the effect of the treatment with different strengtheners. The stone's strength before treatment is low at  $1 \text{ N/mm}^2$ , and slightly decreases towards the outer edge. The E-modulus is  $3 \text{ kN/mm}^2$ .

The following consolidants were used:

– Wacker OH: silicic acid ester without hydrophobic properties,

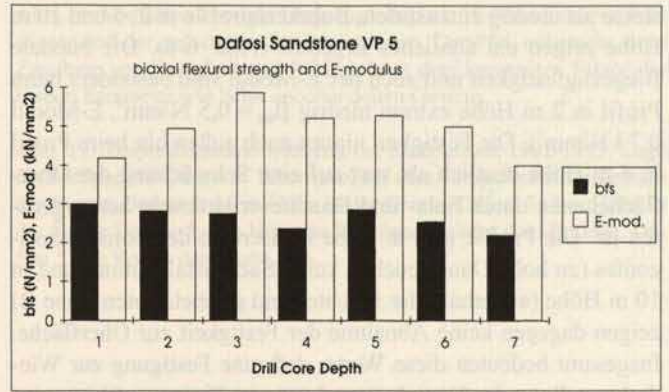
6米高的砂岩带因风化严重，使整个高度窟壁上的小佛龛均因此而消失殆尽。

图3和图4显示了岩石表面溶解态阳离子和阴离子的垂直分布图。很突出的是：可溶盐相对最低值在页岩层上面（距地面2.2米处），这里是可溶盐的供应区，从此往上和往下迁移。主要阳离子是钙，最大浓度在4米高处，也就是渗水页岩层上方的结晶区域，其他离子含量较少，浓度大约为1000 mg/kg。主要阴离子是硫酸根，最大浓度也在4米高处。页岩层以下的砂岩，阴离子则以氯和硝酸根为主，这可能来自于窟底毛细作用的影响。

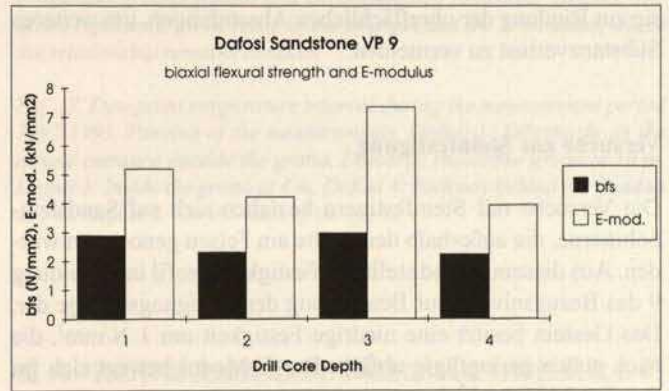
另外，沿岩芯深度方向的可溶盐分析表明：所有可溶盐都集中在表面10 mm以内。因此可以说，表面以下（内）的岩体深处岩石风化很小，表层的可溶盐主要是石膏、碳酸钙和硫酸镁。窟顶岩表还有硝酸钾。碳酸钙的风晶花结晶恰恰证明了可溶盐份来自渗出水：当通过黄土层时，渗出水溶解了其中的碳酸钙，携带至窟内岩表结晶析出。由于石膏和碳酸钙都不是吸水性物质，因而岩石的含湿量只与硫酸镁和小气候条件有关。

### 强度特性

砂岩强度特性的测量是对直径5或8 cm的岩芯切片（测量其双轴抗折强度参见沙得勒测量法，1992）。大佛寺的砂岩硬度不高。在风化的状态下，双轴抗折强度约 $1.5 \text{ N/m}^2$ ，弹性系数E为 $2 \text{ kN/mm}^2$ （图5）。两个



13



14

Abb. 13. Festigkeitsprofil nach Festigung mit Versuchsprodukt VP 5

Abb. 14. Festigkeitsprofil nach Festigung mit Versuchsprodukt VP 9

Abb. 15. Überprüfung von Festigkeitssteigerung und Eindringtiefe mit Ultraschallmessungen

Fig. 13. Strength profile following consolidation with Wendler VP 5

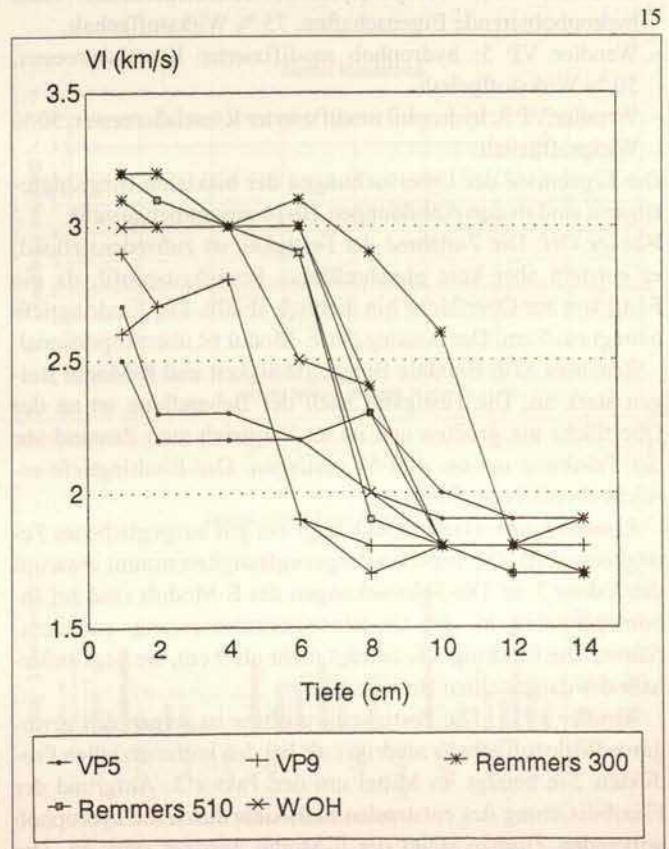
Fig. 14. Strength profile following consolidation with Wendler VP 9

Fig. 15. Determination of the strength increase and penetration depth using ultrasonic velocity

图 13. VP 5 处理后的岩石强度曲线

图 14. VP 9 处理后的岩石强度曲线

图 15. 超声波检测岩石强度值及渗透深度



15

steine als niedrig einzustufen. Bohrkernprofile in 2, 6 und 10 m Höhe zeigen ein ähnliches Ergebnis (Abb. 6-8). Die biaxiale Biegezugfestigkeit und auch der E-Modul sind besonders beim Profil in 2 m Höhe extrem niedrig ( $\beta_{\text{ver}} = 0,5 \text{ N/mm}^2$ , E-Modul  $0,7 \text{ kN/mm}^2$ ). Die Festigkeit nimmt nach außen hin beim Profil in 6 m Höhe deutlich ab, was auf eine Schwächung der Oberflächzone durch Salz- und Feuchteverwitterung hervorgerufen ist. Die Profile in 2 m Höhe im Bereich des Tonsteinhorizontes (zu hohe Dauerfeuchte, keine Salzkristallisation) und in 10 m Höhe (außerhalb der feuchte- und salzbelasteten Zone B) zeigen dagegen keine Abnahme der Festigkeit zur Oberfläche. Insgesamt bedeuten diese Werte, daß eine Festigung zur Wiederherstellung des Festigkeitsverlustes im Tiefenprofil im mittleren Bereich der Grotte begründet ist. Im oberen Bereich dient sie zur Bindung der oberflächlichen Absandungen, um weiteren Substanzverlust zu vermeiden.

### Versuche zur Steinfestigung

Die Versuche mit Steinfestigern beziehen sich auf Sandsteinbohrkerne, die außerhalb der Grotte am Felsen genommen wurden. Aus diesem Grund stellt das Festigkeitsprofil in Abbildung 9 das Bezugsniveau zur Beurteilung der Festigungserfolge dar. Das Gestein besitzt eine niedrige Festigkeit um  $1 \text{ N/mm}^2$ , die nach außen geringfügig abfällt. Der E-Modul bewegt sich im Bereich  $3 \text{ kN/mm}^2$ .

Tränkungen zur Steinfestigung sind mit folgenden Materialien ausgeführt worden:

- Wacker OH: Kieselsäureester ohne hydrophobierende Eigenschaften, 75 % Wirkstoffgehalt.
- Remmers 510: Kieselsäureester ohne hydrophobierende Eigenschaften, 100 % Wirkstoffgehalt.
- Remmers 300: vorhydrolysiertes Kieselsäureester ohne hydrophobierende Eigenschaften, 75 % Wirkstoffgehalt.
- Wendler VP 5: hydrophob modifizierter Kieselsäureester, 50 % Wirkstoffgehalt.
- Wendler VP 9: hydrophil modifizierter Kieselsäureester, 50 % Wirkstoffgehalt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen der biaxialen Biegezugfestigkeit sind in den Abbildungen 10-14 zusammengestellt.

*Wacker OH:* Die Zunahme der Festigkeit ist zufriedenstellend; es entsteht aber kein gleichmäßiges Festigkeitsprofil, da die Festigkeit zur Oberfläche hin deutlich abfällt. Die Eindringtiefe beträgt ca. 5 cm. Der Anstieg des E-Modul ist überproportional.

*Remmers 510:* Biaxiale Biegezugfestigkeit und E-Modul steigen stark an. Die Festigkeit nach der Behandlung ist an der Oberfläche am größten und ist im Vergleich zum Zustand vor der Tränkung um ca. 400 % gestiegen. Die Eindringtiefe erreicht ebenfalls ca. 5 cm.

*Remmers 300:* Das Produkt zeigt ein gut ausgeglichenes Festigkeitsprofil. Die biaxiale Biegezugfestigkeit nimmt etwa um den Faktor 3 zu. Die Schwankungen des E-Moduls sind auf Inhomogenitäten in der Gesteinszusammensetzung zurückzuführen. Die Eindringtiefe beträgt mehr als 9 cm, sie liegt außerhalb des dargestellten Bereichs.

*Wendler VP 5:* Die Festigkeitszunahme ist wegen des geringeren Wirkstoffgehalts niedriger als bei den kommerziellen Produkten. Sie beträgt im Mittel um den Faktor 3. Aufgrund der Flexibilisierung des entstehenden  $\text{SiO}_2$ -Gels durch die hydrophob wirkenden Zusätze steigt der E-Modul weniger stark an. Die

active ingredient 75%

- Remmers 510: silicic acid ester without hydrophobic properties, active ingredient 100%
- Remmers 300: prehydrolysed silicic acid ester without hydrophobic properties, active ingredient 75%
- Wendler VP 5: modified silicic acid ester with hydrophobic properties, active ingredient 50%
- Wendler VP 9: modified silicic acid ester with hydrophilic properties, active ingredient 50%

Figures 10-14 show the results of the biaxial bending strength tests.

*Wacker OH:* The increase in strength is satisfactory; it is not however spread out evenly, since the strength visibly decreases towards the surface. The penetration depth is approximately 5 cm. There is a disproportionate increase in the E-modulus.

*Remmers 510:* There is a large increase in the biaxial bending strength and the E-modulus. The strength present following the treatment is greatest at the surface, and represents an increase of 400% when compared to its condition prior to treatment. The penetration depth is also approximately 5 cm.

*Remmers 300:* The product gives an even result. The biaxial bending strength increases by approximately factor 3. The variations in the E-modulus are due to the inhomogeneous structure of the stone. The penetration depth is more than 9 cm and lies outside the area covered in the diagram.

*Wendler VP 5:* The lower percentage of active ingredient means that the increase in strength is not so high as that gained with the commercial products. An increase of approximately factor 3 is gained at the centre. The E-modulus does not increase as much because the resulting  $\text{SiO}_2$  gel is more flexible due to the special additive. The penetration depth cannot be clearly read. It is approximately 6 cm.

*Wendler VP 9:* The lower percentage of active ingredient in this case too means that the increase in strength is not so high as that gained with the commercial products. Values of around factor 2 to 3 are achieved. The E-modulus does not increase as much because the resulting  $\text{SiO}_2$  gel is more flexible due to the special additive. The penetration depth cannot be clearly read. It is approximately 3-4 cm.

The increase in strength and the penetration depth can also be successfully determined using ultrasonic velocity on drill core samples with a diameter of 5 cm (fig. 15). The results correspond with those obtained with the biaxial bending strength tests. There is a clear reduction in the ultrasonic velocity when it reaches the end of the penetrated area, making it possible to determine the depth. This method also shows that Remmers 300 has the greatest penetration depth. Wendler VP 5 produces the most favourable stone profile, as the ultrasonic velocity is evenly reduced and the increase in strength is also sufficient.

To assess the tests it is necessary to consider both the increase in strength and the increase in the E-modulus. The main risk present when using an unsuitable consolidant is in producing a disproportionate increase in the E-modulus. For physical reasons, every increase in strength, however, is bound with an increase in the E-modulus. It is therefore reasonable to use the biaxial bending strength and the E-modulus of the unweathered and untreated stone as the assessment criteria. This relationship should remain constant during any increase following treatment. This ideal relationship is represented by the arrow in figure 16. The condition of all the treated stone lies more or less clearly above this line. VP 5 and VP 9 (more flexible gel) lie closest to the line, whereas Wacker OH and Remmers 510 are furthest

数值在砂岩来说属于低值。2.6 和 10 米高处的岩芯深向强度分布分析结果相似 (图 6—8)。2 米高处的岩芯深向强度就双轴抗折强度和弹性系数而言都特别低 ( $0.5 \text{ N/mm}^2$ 、 $0.7 \text{ kN/mm}^2$ )。六米高处岩芯深向强度分布分析结果表明, 表面的强度明显减弱, 原因归因于可溶盐和湿度软化了岩石表面。水平页岩带二米高处 (湿度恒高, 无结晶盐) 和 10 米高 (远离湿气和含盐带的 B 区) 的岩芯深向强度分布分析结果表明, 表面不见其强度减弱。总之, 这些参数指出, 要想增加窟体中间部分岩体的稳定性, 就必须增加该区岩石的力学强度, 即使是窟顶部岩石, 为防止表面砂化也应进行表面岩石加固。

### 岩石加固试验

岩石加固试验的岩芯样采自大佛窟外的岩体。图 9 是未加固岩芯样的力学强度剖面, 用它做为不同加固剂加固效果的评价参考。处理前岩石的强度很低。约为  $1 \text{ N/mm}^2$ , 并由内向外岩石力学强度有递减趋势。E 值约为  $3 \text{ kN/mm}^2$ 。

#### 选择加固剂

Wacker-OH: 不含憎水性质的硅酸酯, 有效组份占 75%。

Remmers 510: 不含憎水性质的硅酸酯, 有效组份占 100%。

Remmers 300: 预先水解的硅酸酯, 无憎水性质, 有效组份占 75%。

VP 5 (温得勒实验室产品): 含憎水性能的硅酸乙酯, 有效组份占 50%。

VP 9 (温得勒实验室产品): 含憎水性能的硅酸乙酯, 有效组份占 50%。

图 10-14 是双轴抗折强度测试结果。

Wacker-OH: 用它对岩石样加固处理后, 可得到令人满意的岩石强度增加效果, 但强度的增加随渗透深度呈不均匀的变化: 随渗透深度的增加, 双轴抗折强度明显降低。Wacker-OH 对大佛寺岩石的渗透深度大约 5 cm, 弹性系数 E 的增加量则不太令人满意。

Remmers 510: 双轴抗折强度与弹性系数 E 都偏大。用其处理岩石后, 强度最大值在岩石表面, 与未处理前相比, 强度增加了 400%, 渗透深度大约 5 cm。

Remmers 300: 这一保护剂给出的结果比较均匀。双轴抗折强度大约增加了三个因子, 弹性系数 E 的改变则

Abb. 16. Verhältnis biaxiale Biegezugfestigkeit / E-Modul der ungefestigten und der gefestigten Sandsteinproben. Der Pfeil entspricht einer Zunahme von Festigkeit und E-Modul mit dem konstanten Faktor der beiden Parameter wie beim unbehandelten Gestein

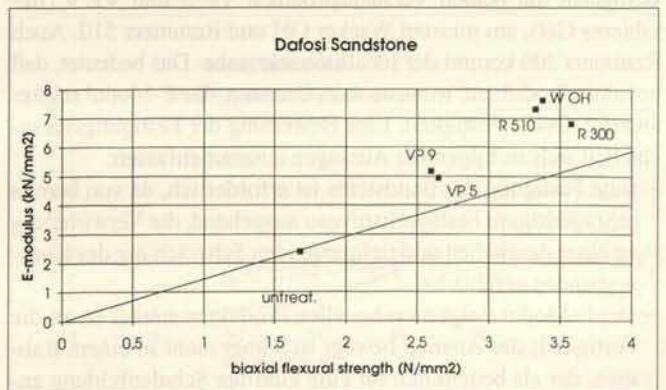
Abb. 17. Taupunkt Abstand während der Meßperiode 1992-1993. Lage der Meßpunkte. Dafosi 1: Tabernakel auf dem Tempelvorbau außerhalb der Grotte, Dafosi 2: 10 m Höhe in der Grotte, Dafosi 3: 4 m Höhe in der Grotte, Dafosi 4: 2 m Höhe im Durchgang hinter dem Buddha, Dafosi 5: am Boden der Grotte

Fig. 16. Relationship between the biaxial bending strength and the E-modulus of consolidated and unconsolidated sandstone samples. The arrow represents an increase in the strength and the E-modulus, where the relationship remains constant

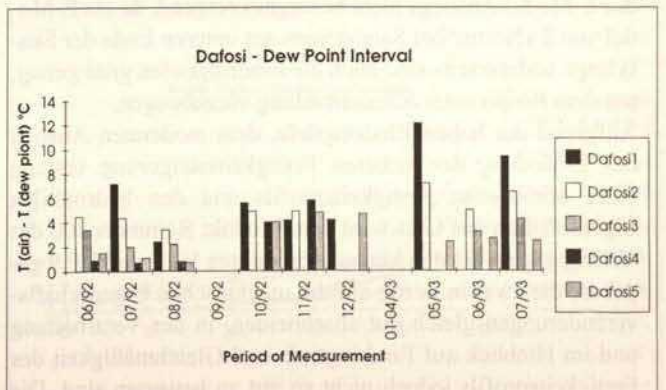
Fig. 17. Dew point temperature interval during the measurement period 1992-1993. Position of the measurements. Dafosi 1: Tabernacle on the temple entrance outside the grotto, Dafosi 2: Inside the grotto at 10 m, Dafosi 3: Inside the grotto at 4 m, Dafosi 4: Pathway behind the Buddha at 2 m, Dafosi 5: On the base of the grotto

图 16. 岩石样品及加固处理后双轴抗折强度与弹性系数 E 的关系

图 17. 1992 - 1993 大佛寺石窟露点温度范围测量点: Dafosi: 窟外大佛寺木楼顶层; Dafosi 2: 窟内 10 米高处; Dafosi 3: 窟内 4 米高处; Dafosi 4: 大佛背后甬道 (2 米高处); Dafosi5: 窟内地面



16



17



Eindringtiefe kann aus dem Meßprofil nicht genau abgelesen werden. Sie beträgt ca. 6 cm.

*Wendler VP 9:* Die Festigkeitszunahme ist wegen des geringeren Wirkstoffgehalts ebenfalls niedriger als bei den kommerziellen Produkten. Sie erreicht Werte um den Faktor 2 bis 3. Aufgrund der Flexibilisierung des entstehenden  $\text{SiO}_2$ -Gels durch die hydrophil wirkenden Zusätze steigt der E-Modul weniger stark an. Die Eindringtiefe kann aus dem Meßprofil nicht genau abgelesen werden. Sie beträgt ca. 3-4 cm.

Die Zunahme der Festigkeit und die Eindringtiefen lassen sich auch sehr gut mit Hilfe der Ultraschallgeschwindigkeiten nachweisen (Abb. 15). Die Meßwerte sind an Bohrkernen von 5 cm Durchmesser erzielt worden. Die Ergebnisse korrespondieren mit denen der biaxialen Biegezugfestigkeit. An der Grenze der Eindringtiefe erfolgt ein sehr deutlicher Abfall. Für das Mittel Remmers 300 ist auch mit dieser Methode die bei weitem größte Eindringtiefe nachweisbar. Das Versuchsprodukt VP 5 zeigt das günstigste Festigkeitsprofil, da die Ultraschallgeschwindigkeit gleichmäßig zurückgeht und auch die erzielte Festigkeitssteigerung ausreichend ist.

Für die Bewertung der Festigungsversuche ist die gemeinsame Betrachtung von Festigkeitszunahme und E-Modul-Steigerung erforderlich. Die Risiken einer ungeeigneten Festigung liegen in erster Linie in einer unerwünschten, zu hohen Steigerung des E-Moduls. Aus physikalischen Gründen muß jedoch jede Festigkeitssteigerung auch mit einer Zunahme des E-Moduls verbunden sein. Als Bewertungskriterium wird deshalb aus Plausibilitätsgründen das ursprüngliche Verhältnis von biaxialer Biegezugfestigkeit des Gesteins und E-Modul im unverwitterten und ungesättigten Zustand herangezogen. Durch die Behandlung sollen biaxiale Biegezugfestigkeit und E-Modul nur in diesem Verhältnis zunehmen dürfen. In Abbildung 16 resultiert aus dieser Vorgabe der Pfeil, welcher vom Zustandspunkt des unbehandelten Gesteins ausgeht. Die Zustandspunkte aller gefestigten Gesteine liegen mehr oder weniger deutlich über dieser Linie, am wenigsten die beiden Versuchsprodukte VP 5 und VP 9 (flexibleres Gel), am meisten Wacker OH und Remmers 510. Auch Remmers 300 kommt der Ideallinie sehr nahe. Das bedeutet, daß bei allen Produkten, wenn auch in Grenzen, der E-Modul stärker ansteigt als die Festigkeit. Eine Bewertung der Festigungsversuche läßt sich zu folgenden Aussagen zusammenfassen:

- Eine Festigung des Sandsteins ist erforderlich, da von bereits sehr niedrigem Festigkeitsniveau ausgehend, die Verwitterung zu einer deutlichen und tiefgreifenden Schwächung des Kornverbandes geführt hat.
- Der E-Modul steigt zwar bei allen Produkten stärker an als die Festigkeit; der Anstieg bewegt sich aber nicht in einem Rahmen, der als bedenklich für eine künftige Schalenbildung angesehen werden müßte. Einerseits sind die absoluten Beträge des E-Modul Anstiegs nicht besorgniserregend, da ein E-Modul von  $8 \text{ kN/mm}^2$  bei Sandsteinen am unteren Ende der Skala liegt; andererseits sind auch die Eindringtiefen groß genug, um dem Risiko einer Schalenbildung vorzubeugen.
- Aufgrund der hohen Eindringtiefe, dem moderaten Anstieg des E-Moduls, der sicheren Festigkeitssteigerung entlang eines homogenen Festigkeitsprofils und den hydrophilen Eigenschaften des Gels wird dem Produkt Remmers 300 der Vorzug gegenüber den Versuchsprodukten VP 5 und VP 9 gegeben, die zwar in bezug auf die mechanischen Eigenschaftsveränderungen gleich gut abschneiden, in der Verarbeitung und im Hinblick auf Eindringtiefe und Gleichmäßigkeit des Festigkeitsprofils jedoch nicht so gut zu bewerten sind. Die

away. Remmers 300 is also very close to the ideal. The results show that with all the tested products, however slight, the E-modulus increases more than the strength. By evaluating the tests it can be concluded:

- The sandstone must be treated since weathering has caused a significant and far-reaching weakening of the grain structure.
- Although all products cause the E-modulus to increase more than the strength, the increase is not so great that there is a risk of scales forming in the future. The absolute amount of the increase in the E-modulus is on the one hand not a cause for concern, since an E-modulus of  $8 \text{ kN/mm}^2$  for sandstone is at the lower end of the scale. On the other hand the penetration depth is large enough to avoid the risk of scale formations.
- The high penetration depth, moderate increase in the E-modulus, and homogeneous increase in strength, as well as the hydrophilic nature of the gel, make Remmers 300 preferable to the products VP 5 and VP 9. Although these produced good results with regard to the mechanical properties, they are not so suitable when considering the treatment, penetration depth and homogeneous strength of the stone. Remmers 510 and Wacker OH can be ruled out due to too great an increase in the biaxial bending strength and E-modulus.

### Recommendations Regarding the Treatment

Both the testing of the consolidants using samples as well as the actual implementation of the treatment rely on favourable climatic conditions in the grotto. Seepage water and condensation lead to a higher moisture content in the stone, which could, due to a partial filling of the pore space with water, make the carrying out of the treatment too risky, if not impossible. The salt contaminated stone also has a higher moisture content than uncontaminated stone, because condensation occurs even by a lower humidity. The negative conditions for treatment can be analysed by taking climatic measurements and determining the stones' absorption isotherms.

The results of the climatic measurements in 1992 and 1993 are shown in *figure 17*. The average dew point temperature interval, calculated from the average monthly values for temperature, relative humidity, and dew point temperature, is illustrated. Several power cuts in the grotto, however, halted individual sensors or sometimes the whole set, so that the data is in parts incomplete. It can, however, be clearly seen that in autumn, as expected, a large dew point temperature interval of approximately  $5^\circ\text{C}$  is present in all the measured areas of the grotto (measuring points Dafosi 2-5). During this period the grotto can dry out, making it favourable for consolidation work and other measures aimed at securing the layers. During winter (not shown) the temperature in the grotto often sinks below  $0^\circ\text{C}$ , so that it is too cold for the use of consolidants. All treatments using consolidants should therefore, without exception, be carried out in autumn.

The absorption isotherms give readings for the moisture content of the stone at different relative humidity levels. The influence of salts in particular on the moisture content can be clearly seen. The results of the measurements are given in *figures 18 and 19*. The absorbed amounts of moisture slowly increase at a constant rate until the relative humidity is approximately 85 %. At this point there is a huge increase in the absorption levels, the surface samples containing the greatest quantities of salt being most severely affected. The cause of this increase is probably

是岩石结构的差异。渗透深度大于 9 cm, 并且随着加固反应的时间而逐渐向内部扩散。

VP 5: 较低的活性组份表明, 处理后样品的强度不太高, 达不到商业产品的效果。中心部位岩石强度大约增加了三倍, 弹性系数 E 的增加不大是因为加了憎水组份后产生的 SiO<sub>2</sub> 胶具有一定的柔韧性, 渗透深度不明显, 大约 6 cm。

VP 9: 该保护剂同样含有较低的活性组份, 强度的增加也不如商业产品理想, 大约增加了 2 - 3 倍, 弹性系数 E 的增加不大也是因为加了憎水组份后产生的 SiO<sub>2</sub> 胶具有一定的柔韧性。渗透深度大约 3 - 4 cm。岩石强度的增加及加固剂渗透深度同样也可以用超声波速度在直径 5 cm 的岩芯样片上测得 (图 15)。测得的结果与双轴抗折强度的测试结果相对应。当到达渗透末端时, 超声波速度明显降低, 可用此速度变化来测算渗透深度。VP 5 具有最理想的岩石曲线, 因为超声波速度均匀下降, 强度增加程度也令人满意。为客观评价这些试验结果, 很有必要同时考虑强度的增加及弹性系数 E 的增加。当使用一种不太合适的加固剂时, 存在的危险是产生不协调的弹性系数 E。就物理学来说强度的增加总是与弹性系数 E 的增加相互制约。因此, 应该用未风化与未处理岩石作标准, 用双轴抗折强度及弹性系数 E 两个参数同时评价测量结果才是较合理的。这种关系在保护处理后任何一种增加应保持不变。这种理想的相关性质在图 16 中用箭头表示出。我们所处理的岩石多多少少在这条线以上。VP 5 与 VP 9 与这条线最接近, 而 Wacker-OH、Remmers 510 相距最远, Remmers 300 与这条线也较近。结果表明: 在所有使用的加固剂中, 不管程度如何, 弹性系数 E 增加的程度大于双轴抗折强度增加的程度。评价结果总结如下:

- 1) 由于风化已经引起砂岩颗粒结构松散, 所以必须进行加固处理。
- 2) 仅管所用加固剂处理后都引起弹性系数 E 的增加程度大于双轴抗折强度的增加程度, 但相差不过分大, 在将来处理过程中不会产生危险的鳞片状剥落。一方面, 弹性系数 E 的绝对增加量肯定不是一个原因, 因为砂岩 8 kN/mm<sup>2</sup> 的 E 值是要求的低限, 另一方面渗透深度较大, 可以避免鳞片状剥落的形成。
- 3) 较大的渗透深度、合适的弹性系数 E 增加值以及岩石强度的均匀增加, 另外还有硅胶的憎水特性, 都使得 Remmers 300 加固剂优于 VP 5 和 VP 9。就力学性能而言, 这些保护剂具有良好的保护效果。但考虑到处理方法、渗透深度以及岩石剖面强度均匀

Abb. 18. Sorptionsisothermen einiger Sandsteinproben

Abb. 19. Darstellung der Sorptionsisothermen als Sättigungskoeffizient des Porenraums

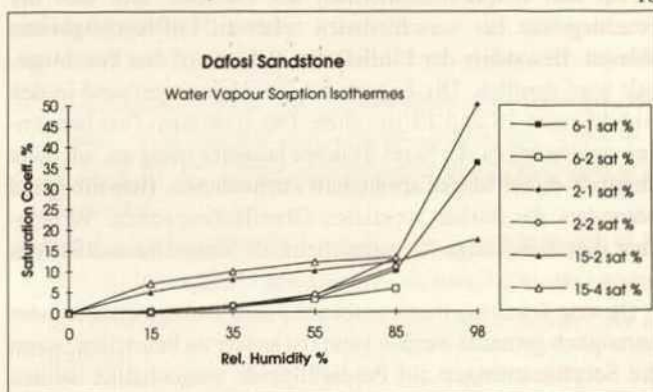
Fig. 18. Absorption isotherms of some sandstone samples

Fig. 19. Absorption isotherms portrayed as a saturation coefficient of the pore space

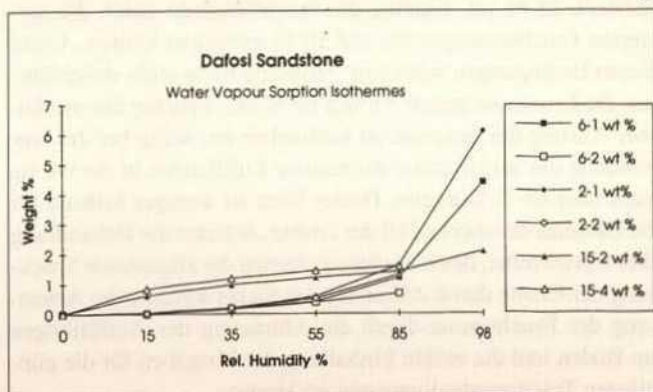
图 18. 大佛寺砂岩吸附等温线

图 19. 用孔隙饱和因子描述的吸附等温线

18



19



Produkte Remmers 510 und Wacker OH scheiden wegen zu hoher Festigkeits- und E-Modulsteigerungen aus.

### Hinweise zur Anwendung

Sowohl die Erprobung der Steinfestigung an einer Musterfläche als auch die endgültige Durchführung der Maßnahme sind an günstige klimatische Verhältnisse in der Grotte gebunden. Einsickerndes Wasser und Kondensation von Feuchte aus der Luft führen zu einer Erhöhung des Feuchtegehalts im Gestein, so daß möglicherweise infolge der partiellen Füllung des Porenraums mit Wasser eine Tränkung nicht durchführbar oder zumindest zu riskant wäre. Die im Gestein vorhandenen Salze verursachen weiterhin einen im Vergleich zum nicht belasteten Gestein erheblich erhöhten Feuchtegehalt, da Kondensation bereits bei niedrigeren Luftfeuchten einsetzt. Auskunft über die Abschätzung dieser Beeinträchtigungen geben Klimamessungen und Bestimmungen der Sorptionsisothermen der Gesteine.

Die Resultate der Klimamessungen in den Jahren 1992 und 1993 sind in Abbildung 17 zusammengestellt. Abgebildet ist der mittlere Taupunktstand, berechnet aus den monatlichen Mittelwerten von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Taupunkttemperatur. Aufgrund häufigen Stromausfalls in der Grotte sind die Daten zeitweise sehr lückenhaft, da einzelne Fühler oder der gesamte Fühler auszufallen sind. Es ist aber deutlich zu erkennen, daß in den Herbstmonaten, wie zu erwarten, an allen Meßplätzen in der Grotte (Meßpunkte Dafosi 2-5) ein großer Taupunktstand von ca. 5 °C herrscht. Um diese Zeit kann die Grotte austrocknen, so daß Tränkungen mit Steinfestigern und anderen Mitteln zur Sicherung der Farbschichten günstig ausgeführt werden können. In den Wintermonaten (nicht abgebildet) sinkt die Temperatur in der Grotte häufig unter 0 °C ab, so daß die Bedingungen für eine Tränkung zu kalt sind. Alle Behandlungen mit Konservierungsmitteln sollten deshalb unbedingt im Herbst stattfinden.

Aus den Sorptionsisothermen der Gesteine läßt sich der Feuchtegehalt bei verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten ablesen. Besonders der Einfluß von Salzen auf den Feuchtegehalt wird deutlich. Die Ergebnisse der Messungen sind in den Abbildungen 18 und 19 zu sehen. Die sorbierten Feuchtemengen steigen bis ca. 85 % rel. Feuchte langsam stetig an, um dann oberhalb dieser Marke sprunghaft zuzunehmen. Betroffen sind besonders die stärker versalzten Oberflächenproben. Verursacher dieses Anstiegs ist wahrscheinlich Magnesiumsulfat, das neben Gips und Calcit als Ausblüfung vorliegt.

Ob eine Tränkung durch sorbierte Feuchte eingeschränkt oder unmöglich gemacht werden kann, ist besser zu beurteilen, wenn die Sorptionsmengen auf Porenfüllgrade umgerechnet werden (Abb. 19). In dieser Abbildung ist deutlich zu erkennen, daß oberhalb 85 % rel. Feuchte die Porenfüllgrade durch die sorbierten Feuchtemengen bis auf 50 % ansteigen können. Unter diesen Bedingungen wäre eine Tränkung nicht mehr durchführbar. Da bereits zwischen 55 und 85 % rel. Feuchte ein merklicher Anstieg der Sorption zu beobachten ist, sollte bei der Anwendung der Steinfestiger die relative Luftfeuchte in der Grotte nicht über 65 % betragen. Dieser Wert ist weniger kritisch für die Gesteine im oberen Teil der Grotte. Je tiefer die Behandlung aber fortschreitet, desto wichtiger werden die allgemeine Trocknung der Grotte durch Ableitung des Sickerwassers, die Absenkung der Feuchtezone durch die Abtragung der Auffüllungen am Boden und die strikte Einhaltung der Vorgaben für die günstigsten Tränkungsbedingungen im Herbst.

magnesium sulphate, which is present along with gypsum and calcite as efflorescences.

It is easier to judge whether the absorbed moisture limits or makes impossible the use of consolidants if the absorption level measurement is converted into the pore filling level (fig. 19). As the diagram shows, when the relative humidity is above 85% the pore filling level can increase up to 50 % due to the absorbed moisture. In this situation a consolidation cannot be carried out. As a noticeable increase in absorption takes place between 55 and 85% relative humidity, the consolidant should not be used by a relative humidity greater than 65%. This value is not so important with regard to the stone in the upper area of the grotto. As the treatment progresses towards the lower areas, however, the dryness of the stone becomes increasingly important. The grotto can be dried out by the draining of seepage water and the removal of the sediments from the base. The conditions required for a successful treatment must, without exception, be strictly adhered to.

### Bibliography

- PANG BIETONG, FAN YUN (1989), *The Topography and Geology of Dafosi*. Report in Chinese.
- LUDWIG SATTLER, *Research into the Effect and Durability of Sandstone Consolidants Containing Silicic Acid Ester*. Thesis Ludwig-Maximilians-Universität Munich, published as Research Report 9/1992, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Zentrallabor, 156 pp.
- ROLF SNETHLAGE (1993), *The Topography and Geology of Dafosi*. In: "The Second Conference Respecting the Chinese-German Cooperation in the Preservation of Historical Monuments", 21-22 Jan. 1993, Munich, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Zentrallabor, Research Report 8/1993.
- The Study and Survey of the Environmental and Geological Situation and Deterioration of Dafosi Cave in Binxian, Xi'an*, Oct. 1991 (80000-Signs-Report), Ed.: The Institute of Survey of the Technical and Electrical Ministry (1991).

### Literatur

- PANG BIETONG, FAN YUN (1989), *Die Topographie und Geologie von Dafosi* (Bericht in chinesischer Sprache).
- LUDWIG SATTLER (1992), *Untersuchungen zur Wirkung und Dauerhaftigkeit von Sandsteinfestigern mit Kieselsäureester*, Dissertation an der Ludwig-Maximilians-Universität München, erschienen als Forschungsbericht 9/1992, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Zentrallabor, 156 S.
- ROLF SNETHLAGE (1993), *Zur Topographie und Geologie von Dafosi*, in: Zweite Konferenz zur Chinesisch-Deutschen Zusammenarbeit in der Denkmalpflege, 21.-22. Jan. 1993, München, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Zentrallabor, Forschungsbericht 8/1993.
- The Study and Survey of Environmental and Geological Situation and Deterioration of Dafosi Cave in Binxian, Xi'an*, Oct. 1991 (80000-Zeichen-Bericht), Hrsg. The Institute of Survey of the Technical and Electrical Ministry (1991).

度等等,它们仍然不是很理想。由于弹性系数E及双轴抗折强度都有较大的增大,使得Wacker-OH及Remmers 510难以使用。

- 4) 实验室的加固研究可以用于窟内风化岩石的加固处理,但其效果取决于窟内的小气候条件,窟内渗水及冷凝水导致岩石具有较高的含水量,也就是说岩石的部分孔隙已被水填充,从而影响加固剂在岩石中的使用。影响较高处理的因素可由气候测量及岩石吸附等温线来分析。1992~1993年窟内气候测量结果见图17。图中给出了平均露点温度范围(由月平均温度值、相对湿度、露点温度等计算得来)。由于当地条件限制,停电期间不能测量,所以数据不全。尽管如此,还是可以清楚地看出:在秋季,正如我们所期望地那样,窟内测量点2-5都有一个大约5°C的较大的露点范围。在这个期间,窟内比较干燥,可以进行加固处理工作。冬季,窟内温度低于0°C,太冷不适于用保护剂处理,所以加固工作只能在秋季进行。岩石吸附等温线给出了在不同湿度下岩石的含湿量。可以清楚地看出盐分对含湿量的影响,参见图18~19。岩石对潮气的吸收量以固定的速度随RH的增大而慢慢增大。当

RH达到85%时,吸湿量有一增加突变。RH对岩石含湿量影响最大的是表面有盐分富集的岩样。含盐样品吸湿量的较大增加可能是由于MgSO<sub>4</sub>的存在。通过实验室分析,硫酸镁、石膏及方解石在风化物中均有存在。

如果将吸附等温线的测量转为岩石孔隙填充程度的测量(见图19),那我们就很容易判断岩石含湿量会限制加固剂的使用还是根本不可能使用加固剂。正如图中表示的那样,当相对湿度大于85%时,由于岩石吸收了湿汽,孔隙大约有50%被湿汽添满。这种情况下,不可能进行加固处理。相对湿度在55%~85%之间时,岩石吸湿量有明显的增加。从图可以看出:当相对湿度大于65%时,就不能进行加固处理。当然这个数值对于大佛窟上部的砂岩处理不是很重要。对于大佛窟下部的砂岩,岩石的干燥度就显得很重要。如何降低窟内湿度因而成为首先需要解决的问题。可以用排水管道导出窟内渗水、清除窟底淤泥等措施使窟内变地干燥。总之,窟内的湿度是影响加固工作的重要因素。

## 参考文献

- 潘别桐、方云(1989),《大佛寺之地形与地质勘察》(*Die Topographie und Geologie von Dafosi*) (原文为中文)。
- Ludwig Sattler (沙得勒)(1992), *Untersuchungen zur Wirkung und Dauerhaftigkeit von Sandsteinfestigungen mit Kieselsaeureester* («以硅酸乙酯固定砂岩之功效及耐久性»), Dissertation an der Ludwig-Maximilians-Universitaet Muenchen, 慕尼黑大学博士论文,发表于巴伐利亚文物保护局中央实验室研究论文集 9/1992, 自156页起。
- Rolf Sneathlage (1993), *Zur Topographie und Geologie von Dafosi*, 中德文物保护合作计划第二次研讨会, 1993年1月21至22日, 巴伐利亚文物保护局中央实验室研究论文集 8/1993。
- 机械电子工业部勘察研究院(主编)(1991),《环境地质条件及病害的勘察与研究》(*The Study and Survey of Environmental and Geological Situation and Deterioration of Dafosi Cave in Binxian*)。