

## Zur geotechnischen Stabilität der Grotte des Großen Buddha von Dafosi

### Einleitung

Die Grottenanlage Dafosi, Tempel des Großen Buddha, ca. 160 km nordwestlich von Xi'an, wurde vor ungefähr 1400 Jahren vollendet. Sie wurde in einen Sandsteinfelsen eingeschnitten, indem man eine bestehende Caverne bis auf eine Breite von ca. 35, eine Tiefe von 15 und eine Höhe von 21 m erweiterte. In der Grotte befinden sich ein 17,5 m hoher sitzender Buddha und zwei 12 m hohe Bodhisattva-Figuren. Sie sind aus dem anstehenden Sandstein gemeißelt und mit einer bemalten Lehm-schicht überzogen. Die Wände und die Decke der Grotte sind mit Hunderten von Figuren und Ornamenten verziert. Öffnungen in der teils erhaltenen Frontfelswand und ein sehr viel später hinzugefügter Außentempel aus Ziegel und Holz erlauben den Einfall von Licht und die Besichtigung durch Besucher. Schon vor siebzig Jahren wurde eine Beschreibung von Dafosi durch Pelliot gegeben.<sup>1</sup>

Teile der Felsendecke sind bereits abgestürzt, andere drohen herabzufallen. Die Nacken von zwei Figuren sind von Rissen durchzogen, so daß deren Köpfe herunterzufallen drohen. An einigen Stellen der Decke mußten lose Teile sofort gesichert werden. Daran anschließend muß eine dauerhafte Stabilisierung vorgenommen werden, um den Bestand des Denkmals zu sichern. Der untere Teil der Grotte ist durch Feuchte und Salztransport stark verwittert. Teile der Statuen und der Wände müssen untermauert werden. Der erheblich fortgeschrittenen Verwitterung muß durch Maßnahmen gegen das Eindringen von Sickerwasser Einhalt geboten werden.

Diese geotechnische Studie wurde in vielen Punkten wesentlich unterstützt durch die chinesischen Kollegen Prof. Ge Xiurun (Academia Sinica in Wuhan), Dr.-Ing. Wu Wei vom Xi'an Technical College (Herr Wu arbeitet derzeit bei einer deutschen Firma) und Herrn Zou Yazhou von der University of Hydraulic and Electric Engineering in Wuhan (Herr Zou arbeitet gegenwärtig in Karlsruhe).

Die geotechnischen Probleme dieser Grotte sind verglichen mit anderen gleichgearteten Grotten in China sehr ungewöhnlich, so daß die Erfahrungen aus dem Tunnel- und Bergbau nicht einfach übertragen werden können. Im ersten Teil der Veröffentlichung wird die Geometrie der Grotte beschrieben, welche die Basis für die weiteren geotechnischen und konservatorischen Untersuchungen darstellt. Im folgenden Abschnitt wird die obere Hälfte der Grotte behandelt, die aus einem trockenen, aber geklüfteten Fels besteht. Der abschließende Teil beschäftigt sich mit dem unteren Teil der Grotte und Konservierungsmöglichkeiten des Gesteins. Die hier gemachten Ausführungen können zumindest teilweise auch auf andere Grotten in China übertragen werden.

### Geometrie der Grotte

Eine bloße Beobachtung sowie Photographien und Zeichnungen können keine ausreichend genaue Darstellung der komplizierten

## The Geotechnical Stability Problems of the Dafosi Grotto

### Introduction

The Dafosi (i.e. Great Buddha Temple), about 160 km north-west of Xi'an, was completed approximately 1400 years ago. It was cut into a sandstone cliff by enlarging a cavern to a circa 35 m breadth, 15 m depth and 21 m height. The result was a 17.5 m high sitting Buddha and two 12 m high Bodhisattvas made of sandstone and covered with painted clay. The walls and ceiling of the grotto are decorated with hundreds of figures and ornaments carved into the stone. Light and visitors gain access to the grotto through openings in the partly remaining cliff wall and the front temple made of bricks and wood, which was added at a much later date. The Dafosi grotto was described over seventy years ago by Pelliot.<sup>1</sup>

Parts of the jointed rock ceiling have fallen down and other parts now threaten to follow. The necks of two of the statues are cracked and close to toppling over. Immediate support is needed in some parts of the ceiling. Permanent stabilization of the monument is also necessary. The lower half is seriously weathered due to the transport of water and salt in the direction of the grotto. Parts of the statues and walls need to be supported, and further decay reduced.

This geotechnical study was carried out with the considerable support of the following Chinese colleagues:

- Prof. Ge Xiurun, Academia Sinica, Wuhan,
- Dr.-Ing. Wu Wei, Xi'an Technical College, now working for a German company,
- Mr. Zou Yazhou, University of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan, presently working in Karlsruhe.

The geotechnical problems of this and similar grottos are rather uncommon, so that experience gained from tunnelling and mining cannot be easily applied here. In the first part of this paper the geometry is outlined, which will be the basis for further geotechnical reports and conservation studies. The treatment of the upper half of the grotto, which consists of dry and jointed rock, is discussed in the next section. This is followed by a section dealing with the lower half, showing how the decay there can be explained and reduced. The applied methods can be used at least in part in other grottos.

### Geometry

Normal inspections, photographs and drawings cannot give a sufficiently precise representation of the complicated spatial geometry of the Dafosi Grotto, which is necessary for both geotechnical and conservation reasons. Detailed photogrammetric images of the statues have been made, but this method is not suitable for the grotto as a whole. With the support of the Geodetic Institute of the University of Karlsruhe, in particular Dipl. Ing. Manfred Vogel, the coordinates of about 6300 points of the grotto have been determined with an electrooptical total station (Leica & Wild T2002 and DI3000s rangefinder). The following computer graphics have been processed from this data.

# 论大佛寺岩土力学的稳定性

## 导论

大佛寺石窟位于西安西北 200 公里，大约 1400 年前建成。石窟由砂岩开凿而成，本系自然山洞，后加扩建，现在洞宽约 35 米，深 15 米，高 21 米。窟内现存一尊 17.5 米高的坐佛和两尊 12 米高的菩萨雕像。三像均由现成岩壁雕凿，再敷泥塑彩绘而成。窟壁和窟顶上分布着上百的雕像和装饰纹样。石窟前壁部分尚存，光线和游人可沿此处所开的通道和一座很晚才增建的砖木结构的楼阁进入窟内。早在 70 年前伯希和 (Pelliot)<sup>1</sup> 便描写过大佛寺。此寺现在部分窟顶已塌落，其它部位有坍塌的危险。两坐雕像颈部横穿裂隙，其头部呈滑落之势。窟顶有几处须立即加固。为了保护文物的完整，接着要进行长期稳固。石窟下部因潮湿和盐的渗入而严重风化。部分雕像和窟壁须砌墙保护。另外得采取措施防治浸透水，以阻止风化迅速蔓延。

这项岩石力学的研究在不少方面得到了下列中国同行的鼎力相助：

- 武汉中国科学院的葛修润教授
- 西安技术研究院的吴伟博士工程师 (吴先生现在在一所德国公司任职)
- 武汉水力电力工程大学的邹亚洲先生 (邹先生目前在卡尔斯鲁尔工作)

这座石窟和中国其它类似石窟的岩石力学的问题非常特殊，无论隧道还是矿山的经验均无法轻易照搬。本文第一部分介绍石窟的地质问题，此乃进行下一步岩石力学和保护研究的基础。接下再论石窟的上半部，这一部分的岩石虽然干燥，但已生裂缝。最后一部分探讨石窟的下半部和保护岩石的可能性。这里所做的分析研究至少有一部分值得中国其它石窟借鉴。

## 石窟的几何形状

仅仅观察、摄影和描图，不足于精确地表现大佛寺石窟的复杂的几何空间，而探讨岩石力学和保护问题却

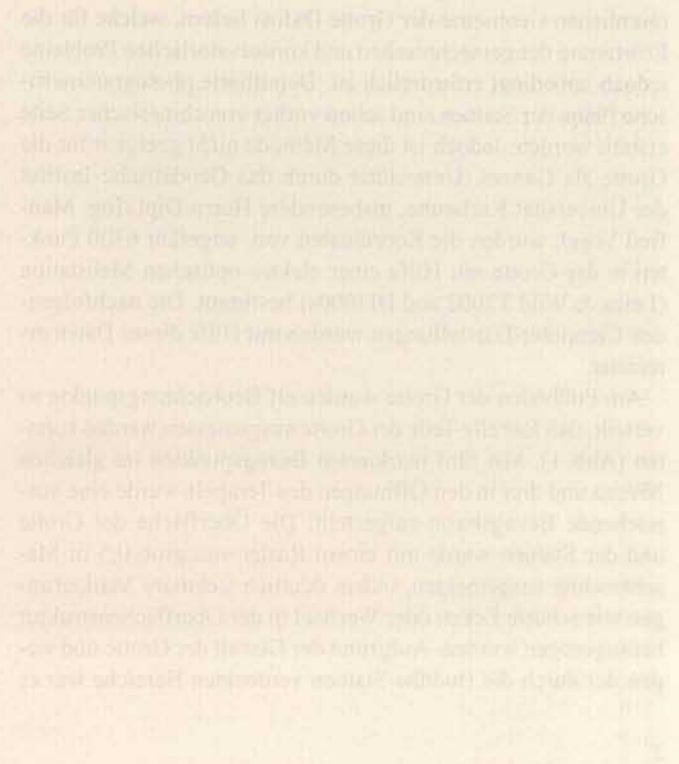
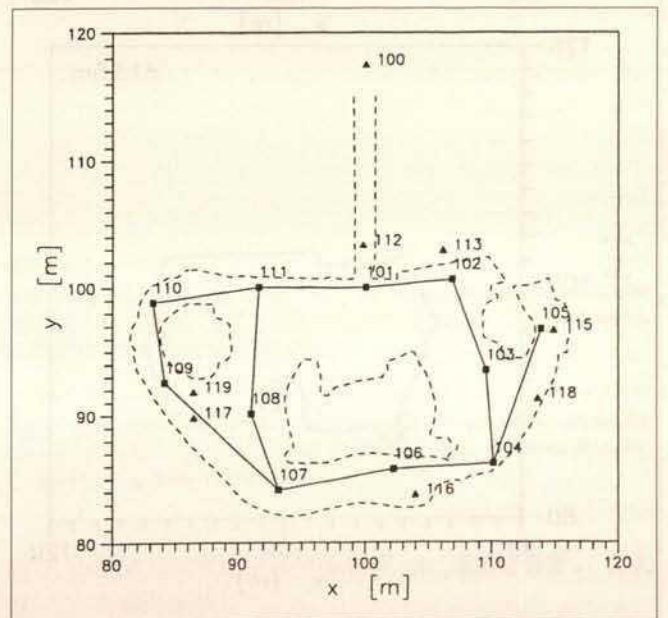


Abb. 1. Traverse mit den Bezugspunkten. Die Punkte Nr. 112 und 113 befinden sich in den Öffnungen auf der ersten Etage des Fronttempels

Fig. 1. Traverse of reference points. Points Nr. 112 and 113 are in the openings on the first floor of the front temple

图 1. 横梁与参考点: 112 和 113 号二点位于正面楼阁第二层的入口。



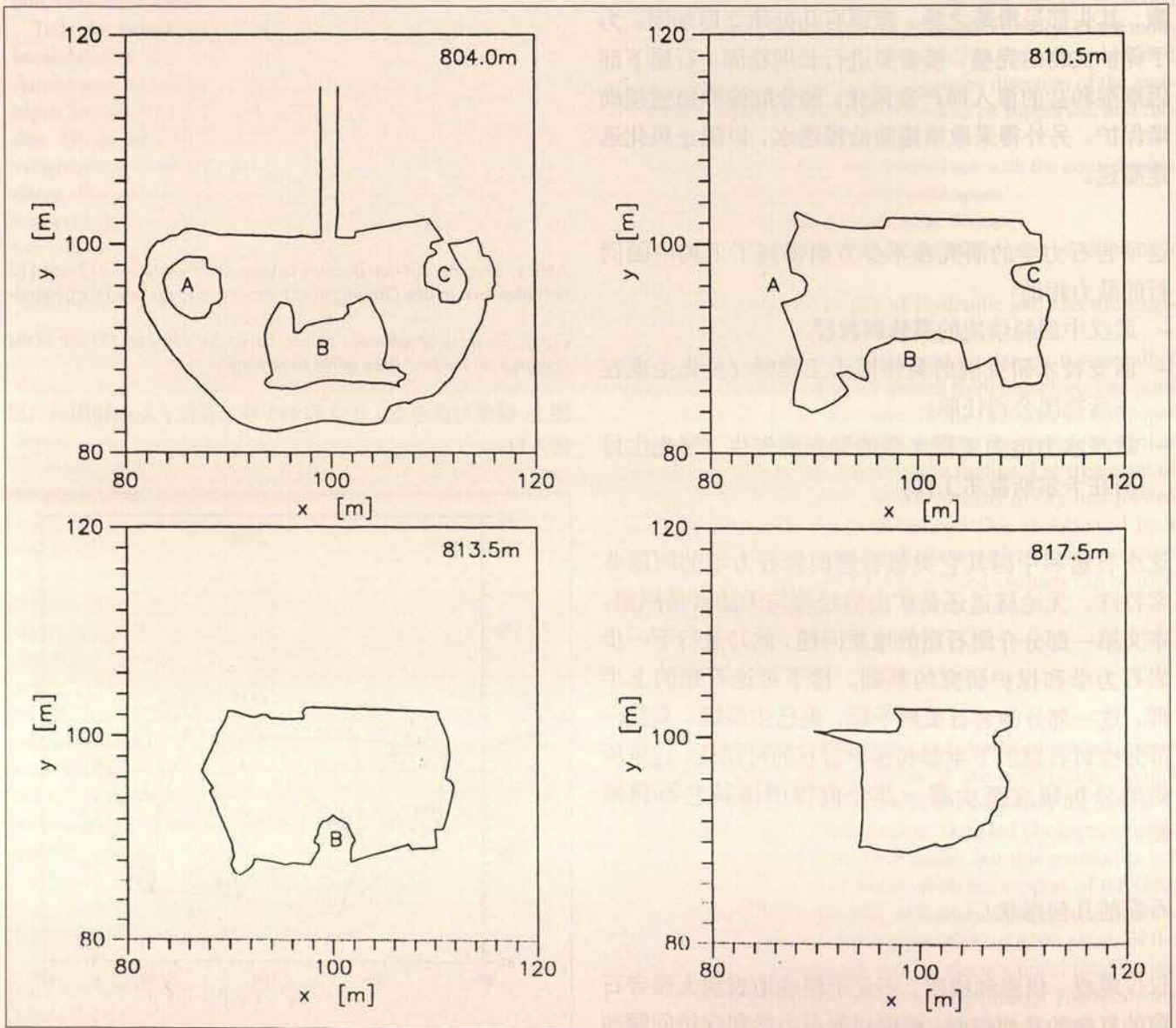
räumlichen Geometrie der Grotte Dafosi liefern, welche für die Erörterung der geotechnischen und konservatorischen Probleme jedoch unbedingt erforderlich ist. Detaillierte photogrammetrische Pläne der Statuen sind schon vorher von chinesischer Seite erstellt worden. Jedoch ist diese Methode nicht geeignet für die Grotte als Ganzes. Unterstützt durch das Geodätische Institut der Universität Karlsruhe, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Manfred Vogel, wurden die Koordinaten von ungefähr 6300 Punkten in der Grotte mit Hilfe einer elektro-optischen Meßstation (Leica & Wild T2002 and DI3000s) bestimmt. Die nachfolgenden Computer-Darstellungen wurden mit Hilfe dieser Daten errechnet.

Am Fußboden der Grotte wurden elf Beobachtungspunkte so verteilt, daß fast alle Teile der Grotte ausgemessen werden konnten (Abb. 1). Mit fünf markierten Bezugspunkten im gleichen Niveau und drei in den Öffnungen des Tempels wurde eine ausreichende Bezugsbasis aufgestellt. Die Oberfläche der Grotte und der Statuen wurde mit einem Raster von grob 0,5 m Maschenweite ausgemessen, indem deutlich sichtbare Markierungen wie scharfe Ecken oder Wechsel in der Oberflächenstruktur herangezogen wurden. Aufgrund der Gestalt der Grotte und wegen der durch die Buddha-Statuen verdeckten Bereiche war es

Elfen observation points on the ground ensured that almost all parts of the grotto could be surveyed (fig. 1). Together with five marked reference points on the same level and three in the openings of the temple a sufficient base of reference was established. The surface of the grotto and the statues was scanned following a grid of roughly 0.5 m mesh-width, using clearly visible marks like sharp edges or change of surface texture. Due to the shape of the grotto and the hidden statues, it was not possible to follow a strict order during the survey. Therefore, some patches on the surface of the grotto and the statues were repeatedly surveyed from several standpoints. Only some small parts on the shoulders of the statues remained hidden from every standpoint. The information gathered about every measured point consisted of its Cartesian coordinates and a number by which the four main typical surface types (rock, ornaments, masonry and weathered fill) were identified. With the aid of these numbers the CAD-model can be segmented and shaded.

First of all the points were filtered with respect to their vertical coordinates, so that 41 sets of elevation data (0.5 m, 1.0 m, 1.5 m,...) with a range of  $\pm 0.25$  m were obtained. The coordinates of the whole ceiling with a wider range were stored in the 41<sup>st</sup> set. Figure 2 shows horizontal cross-sections in four eleva-

2



非得对石窟的几何形状做出精确的描绘不可。之前，中方已对雕像进行了细部的摄影测量。然而，对作为整体的石窟来说，这种方法并不适用。由卡尔斯鲁尔大学大地测量系，尤其是曼夫雷德·福格尔工程师先生的帮助，通过电-光测量站 (Leica & Wild T2002 和 DI3000s)，我们在窟内测定了大约 6300 个点的坐标。下列的计算机显示图便是依靠这些数据画成的。

为了在窟内不留下死角，先在石窟地面上选定 11 个观察点 (图 1)。在相同的水平面上标出 5 个参考点，在大佛寺的入口处标出 3 个参考点，参考基础已经满足。利用清晰可见的记号如锐角或表面结构的变化，按 0.5m 的网距的网络对石窟和雕像的表面进行了测量。由于石窟的形状和佛像遮住的部位，不可能在测量这些点时保持严格的秩序。出于此因，石窟和雕像的某些部位在不同的位置上被反复地测量过。只有雕像肩上几处较小的部位，于任何位置都测不到。每一测点的信息包括其笛卡尔坐标和一个数字，通过它们可以重现表面四种最重要的典型特性，即岩石、纹样、墙体和风化程度。靠这些数字，以后可将 CAD 模型分段上色。

起初将所有点按其纵坐标滤过，这样，依据不同高度 (0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, ...) 和  $\pm 0.25$  m 的范围得到一共 41 组数据。整个窟顶的坐标集中在第 41 组数据里。图 2 即靠此数据所建石窟的四高程的水平截面。无论纵向如何伸展，均可用此法计算，如图 3 所示。同样，制作其它此类的截面图也不难。通过这种方式，可以获得对整个石窟形体、大小和方向的大概印象。

借助于计算机绘图的手段建立石窟整体空间的模型，要复杂得多。问题乃在于，表面不凸出，有的点可能重叠，那些在所选的位置上看不见的部位便不得不放弃。每一组数据里的测点均遵照统一的转向 (右向的笛卡尔坐标系) 排列，对于每一种 CAD 软件来说，这一步都是必要的，以使用由表面向石窟内延伸的正常矢量来确立表面。最后，数据组按材料变化、角和边来平分，以避免 CAD 软件对石窟这些重要部分进行平整的效应。每一从属组的点被 CAD 程序读解为三维的、与直角的表面部分相连的多边形。AUTOCAD Release 12 软件包既用于整个图形显示，也用于 CAD 设计。

图 4 即这种显示图之一例，它传递的石窟印象让人感到相当完整。石窟前面的岩石板和楼阁被挪去，可以

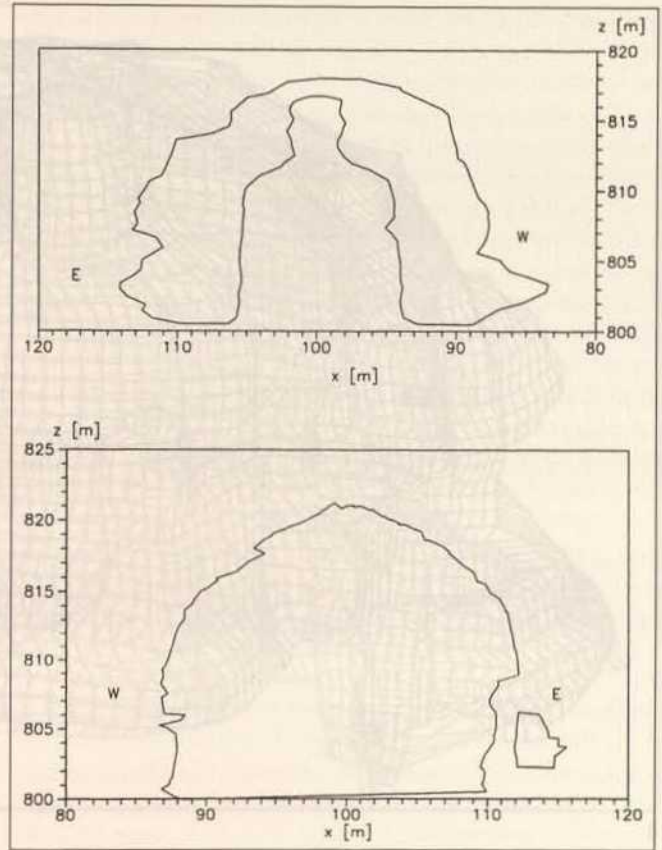


Abb. 3. Zwei vertikale Schnitte durch die Grotte

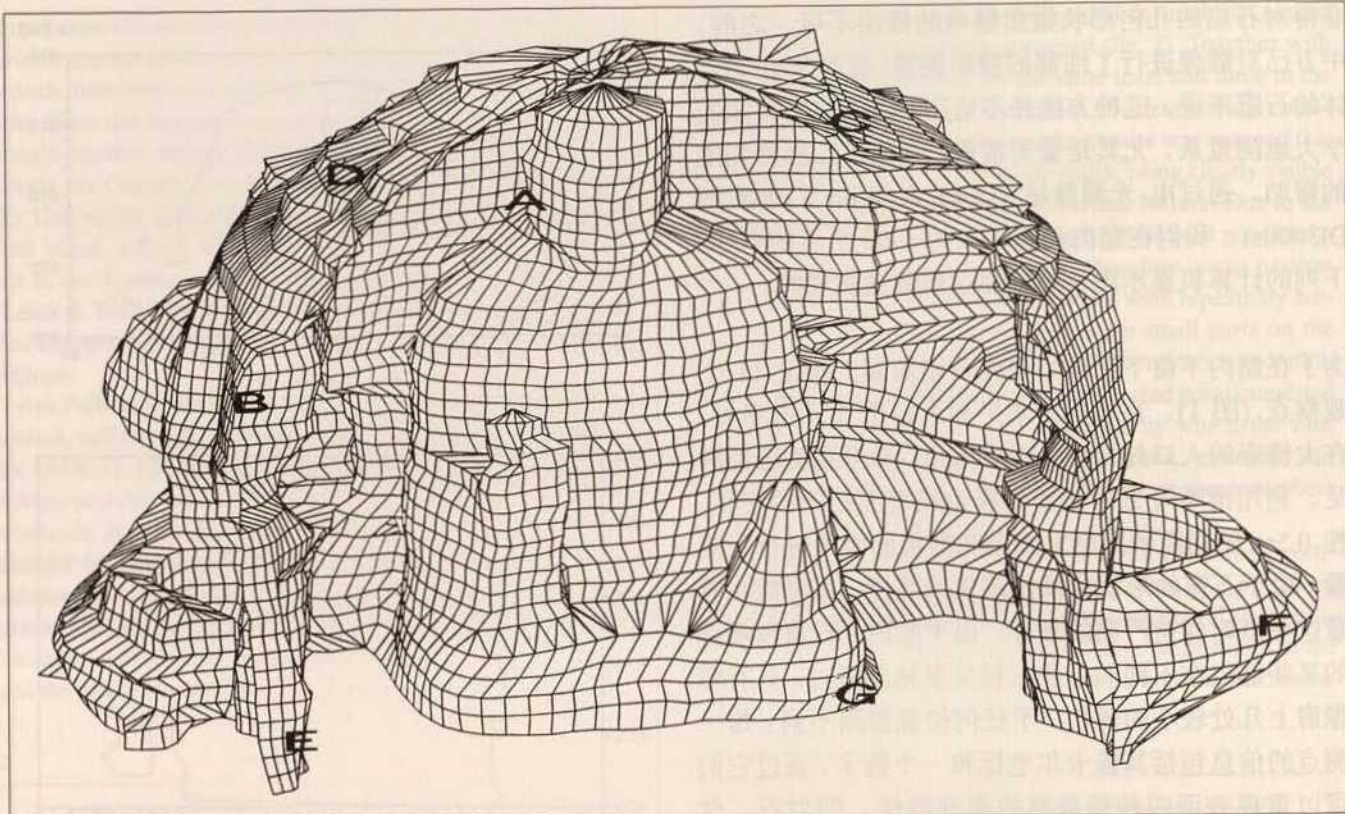
Fig. 3. Two vertical cross sections through the grotto

图 3. 石窟的两个纵截面。

Abb. 2. Horizontale Querschnitte bei vier verschiedenen Höhengniveaus durch die Grotte (A: Bodhisattva Avalokiteshvara, B: Großer Buddha, C: Bodhisattva Mahasthamaprapta)

Fig. 2. Horizontal cross sections at four different elevations above the base of the grotto (A: Bodhisattva Avalokiteshvara, B: Great Buddha, C: Bodhisattva Mahasthamaprapta)

图 2. 石窟的四种高度的水平横截面 (A: 观世音菩萨, B: 大佛, C: 大势至菩萨)。



4

nicht möglich, beim Ausmessen der Punkte eine strikte Ordnung einzuhalten. Deswegen wurden manche Bereiche der Grotte und der Statuen von verschiedenen Standpunkten aus wiederholt eingemessen. Nur einige kleinere Stellen auf den Schultern der Figuren blieben von jedem Standpunkt aus verborgen. Der Informationsgehalt jeden eingemessenen Punktes besteht aus seinen cartesischen Koordinaten und einer Ziffer, mit deren Hilfe die vier wichtigsten typischen Oberflächeneigenschaften – Gestein, Ornament, Mauerwerk und Verwitterungszustand – kodifiziert wurden. Mit Hilfe dieser Ziffern konnte später das CAD-Modell in Segmente unterteilt und koloriert werden.

Am Beginn wurden alle Punkte bezüglich ihrer vertikalen Koordinaten gefiltert, so daß insgesamt 41 Datensets entsprechend der unterschiedlichen Höhe (0,5 m, 1,0 m, 1,5 m...) mit einem Bereich von  $\pm 0,25$  m erhalten wurden. Die Koordinaten der gesamten Decke wurden im 41. Datenset gebündelt. Abbildung 2 zeigt Horizontalschnitte in vier Höhenlagen durch die Grotte, welche mit Hilfe dieser Daten hergestellt wurden. Der gleiche Vorgang kann für jede vertikale Ausdehnung durchgeführt werden, was in Abbildung 3 demonstriert wird. Andere Schnitte dieser Art können ebenfalls leicht hergestellt werden. Auf diese Weise kann ein ungefährender Eindruck der Gestalt, der Größe und der Orientierung der gesamten Grotte gewonnen werden.

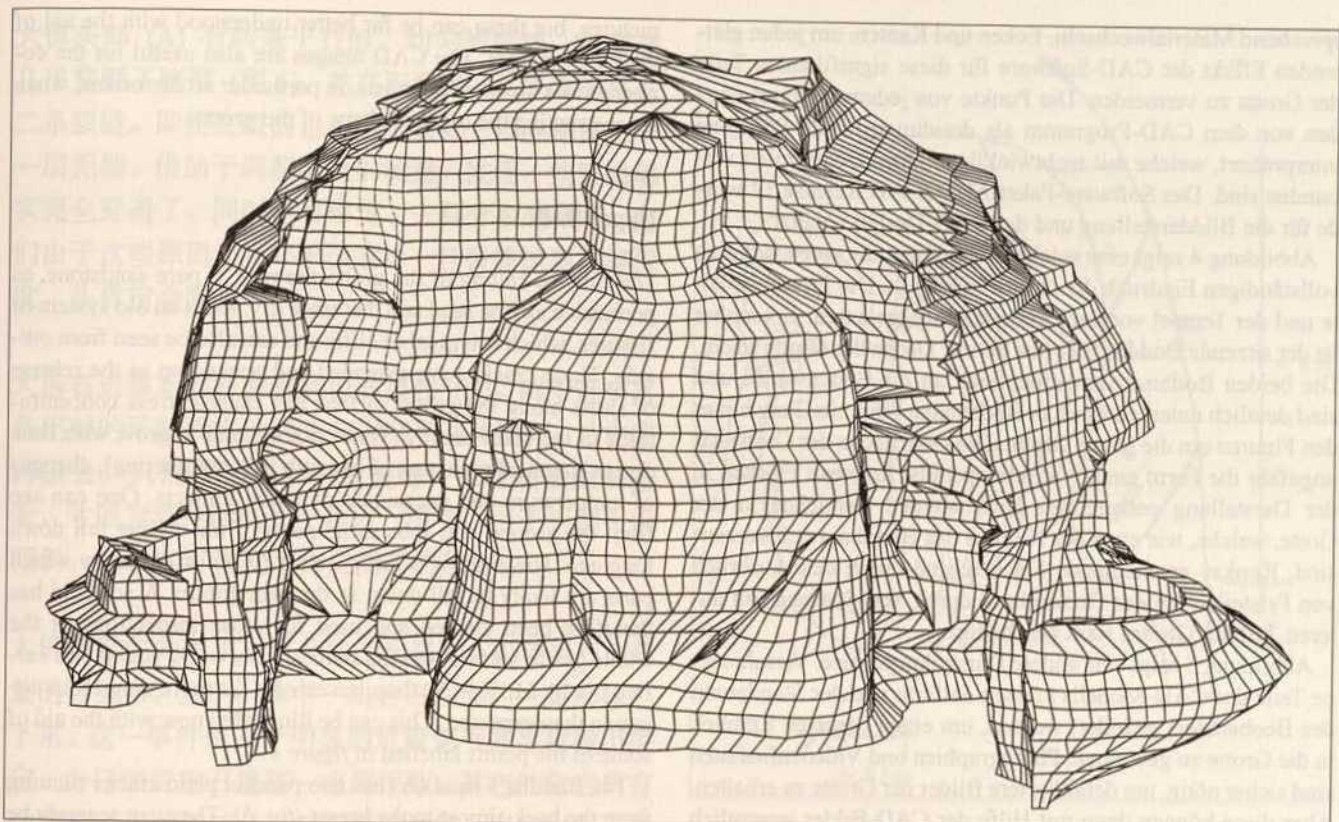
Es ist wesentlich komplizierter, ein komplettes räumliches Modell der Grotte mit Hilfe der Computergraphik herzustellen. Das Problem liegt darin, daß die Oberflächen nicht konvex sind, mögliche Punktüberschneidungen gegeben sind und daß die jeweils verborgenen Bereiche für den gewählten Standpunkt weggelassen werden müssen. Die Meßpunkte eines jeden Datensatzes wurden im Hinblick auf einen einheitlichen Drehsinn (rechtsgerichtetes cartesisches Koordinatensystem) geordnet, was für jede CAD-Software notwendig ist, um Oberflächen mit Normalvektoren herzustellen, die sich von der Oberfläche in die Grotte erstrecken. Schließlich wurde der Datensatz geteilt ent-

tions that were prepared with these data sets. The same process can be done for any vertical extension, as shown in *figure 3*. Other sections of this kind can be done just as easily. Thus a rough impression of the shape, size and orientation of the whole monument can be gained.

It is far more difficult to produce a complete spatial impression of the grotto with computer graphics. The problem lies in the non-convexity of the surfaces, the possible confusion of coordinates and the omission of hidden parts. The points in every data set were rearranged in order to unify the sense of rotation (right-hand Cartesian coordinate system). This is necessary for CAD software so that surfaces with normal vectors extending from the surfaces into the grotto can be produced. Finally, every data set was split according to change of material, corners and edges in order to avoid any smoothing effect of the CAD software at these significant parts of the grotto. The points of each subset were interpreted by the CAD program as three dimensional polygons which were connected with rectangular surface patches. The software package AUTOCAD Release 12 was used for the whole image processing and computer aided design.

*Figure 4* is one example that gives a fairly complete impression (labels for details will be explained in the following sections). The remaining cliff wall and the front temple are omitted. One can see that the sitting Buddha fills the grotto almost to the ceiling. The two Bodhisattvas lean towards the side walls and are clearly subordinated. A partially ceilinged pathway arches around behind the statues. The grotto is shaped roughly like one quarter of an ellipsoid. Only the ceiling and the nimbus of the Buddha are decorated – the rest has been lost due to collapse and erosion.

*Figure 5* shows another image of this kind. The observer's standpoint can be chosen arbitrarily, and various parts of the CAD model can be removed to get a better insight. It is evident that photographs and videos are needed to obtain more detailed



◁ Abb. 4. Nicht schattiertes CAD-Modell; Blickrichtung von Nordost

Fig. 4. Non-shaded CAD model: observer's position in the north-east

图4. 未画阴影的CAD模型。方向东北。

看见几乎高达窟顶的坐佛，身边是两尊小得多的菩萨，紧靠窟壁。窟内有一条环形路通往雕像身后并环绕整个石窟。石窟表面的形状近似于一个椭圆体的四分之一。图示中的凸面相当于石窟中保护较好装饰丰富的部位，如大佛的圣光区。凹面经（窟顶部的）岩崩落，尤其是（石窟下部的）风化影响，破坏严重。

图5为另一种显示方式。为了较好地直观石窟，CAD模型的不同部分可以去掉，观者的位置亦可改变。当然，为了获得石窟的局部图像，有必要摄影和录像。借助CAD图像，它们便可以得到更好的理解。对于跨领域的合作来说，尤其是对于想重视石窟原形的艺术史家来说，CAD图示也能发挥作用。

Abb. 5. Nicht schattiertes CAD-Modell; Blickrichtung von Nord

Fig. 5. Non-shaded CAD model: observer's position in the north

图5. 未画阴影的CAD模型。方向北。

#### 上半部分

石窟顶部为较纯的砂岩，它与沙子一样透气，故干燥。它具有于岩石很典型的裂隙系统，这在窟外的岩壁上也能看见。裂隙还在扩展和伸张，这是因为沿着石窟表面的压荷的作用，裂隙近区的负载大增。化学风化，气温变化和偶然震动均可降低岩石强度，裂隙会逐渐发育。从地上即可看出，前窟顶的主要部分在很久以前即已脱落。但从地上却看不出，哪些部分不久会脱落。由于这些原因，必须搭一脚手架，以便能从跟前仔细检查整个窟顶和雕像。这项由邹亚洲先生完成的工作说明，情况比人们预想的要危险得多。这些特别危险的部位在图4上用点标了出来。

sprechend Materialwechseln, Ecken und Kanten, um jeden glättenden Effekt der CAD-Software für diese signifikanten Teile der Grotte zu vermeiden. Die Punkte von jedem Untersetz wurden von dem CAD-Programm als dreidimensionale Polygone interpretiert, welche mit rechtwinkligen Oberflächenteilen verbunden sind. Das Software-Paket AUTOCAD Release 12 wurde für die Bilddarstellung und das CAD-Design benützt.

Abbildung 4 zeigt eine solche Darstellung, die einen ziemlich vollständigen Eindruck der Grotte vermittelt. Die Frontfelsplatte und der Tempel vor der Grotte sind weggelassen. Erkennbar ist der sitzende Buddha, der fast bis zur Decke der Grotte reicht. Die beiden Bodhisattvas lehnen sich an die Seitenwände und sind deutlich untergeordnet. In Bodennähe führt ein Gang hinter den Figuren um die ganze Grotte. Die Oberfläche der Grotte hat ungefähr die Form eines Viertelellipsoids. Konvexe Flächen in der Darstellung entsprechen guterhaltenen Bereichen in der Grotte, welche, wie etwa der Nimbus des Buddha, reich verziert sind. Konkav erscheinende Flächen sind durch den Ausbruch von Felsteilen (an der Decke) bzw. durch Verwitterung (im unteren Teil der Grotte) stark geschädigt.

Abbildung 5 zeigt eine andere Darstellungsweise. Verschiedene Teile des CAD-Modells können entfernt und der Standpunkt des Beobachters geändert werden, um einen besseren Einblick in die Grotte zu gewinnen. Photographien und Videoaufnahmen sind sicher nötig, um detailliertere Bilder der Grotte zu erhalten. Aber diese können dann mit Hilfe der CAD-Bilder wesentlich besser verstanden werden. Die CAD-Darstellung ist auch für die Zusammenarbeit mit anderen Fachbereichen nützlich, insbesondere für Kunsthistoriker, welche sich um die Rekonstruktion der Originalgestalt der Grotte bemühen.

### Obere Hälfte

Bei der Decke der Grotte handelt es sich um einen ziemlich reinen Sandstein, welcher durchlässig wie Sand und deswegen trocken ist. Er besitzt ein altes System von Klüften, das typisch für Felsen ist und das auch außerhalb der Grotte an der Felswand beobachtet werden kann. Die Klüfte haben sich geweitet und geöffnet, da die Druckentlastung entlang der Grottenoberfläche zu erhöhten Belastungen der unmittelbaren Nachbarschaft der Klüfte geführt hat. Die Klüfte neigen dazu, wegen der Erniedrigung der Gesteinsfestigkeit, welche durch die chemische Verwitterung hervorgerufen wird, aber auch infolge Temperaturwechsels und zufälliger Erschütterungen weiterzuwachsen. Schon vom Boden aus läßt sich erkennen, daß wesentliche Teile der Decke bereits vor langer Zeit herabgefallen sind. Vom Boden aus ist jedoch nicht zu erkennen, welche Teile sich so gelockert haben, daß sie in nächster Zeit herabfallen könnten. Es war also erforderlich, ein Gerüst zu erstellen, um eine genaue Inspektion der gesamten Grottendecke und der Statuen von der Nähe aus durchführen zu können. Diese Arbeit, die durch Herrn Zou Yazhou durchgeführt wurde, zeigte eine wesentlich gefährlichere Situation, als zunächst erwartet. Auf die besonders gefährdeten Stellen wird mit Hilfe von einigen Punkten in Abbildung 4 hingewiesen.

Der Kopf des Buddha (A) weist zwei parallele, ebene Risse auf, welche vom Rücken bis fast zur Brust reichen (Abb. 6). Sie können vom Boden der Grotte aus kaum und auch aus der Nähe nur unvollständig beobachtet werden, da die Figur mit einer Lehmschicht überzogen ist. Mit Hilfe von Transmissionsmessungen schwacher Schockwellen konnte nachgewiesen werden,

pictures, but these can be far better understood with the aid of the CAD images. The CAD images are also useful for the cooperation with other scientists, in particular art historians, when reconstructing the original shape of the grotto.

### Upper Half

Towards the ceiling of the grotto the rock is pure sandstone, as permeable as fine sand and therefore dry. It has an old system of fissures, which is typical of cliffs and can also be seen from outside. These cracks have extended and opened up as the release of stress along the grotto surface has caused stress concentrations in the areas nearby. These cracks tend to grow with time due to chemical reduction of strength (e.g. weathering), changes of temperature and occasional dynamic impacts. One can see from the ground that substantial parts of the ceiling fell down long ago. However, it is not possible to see from below which parts are likely to fall down in the near future. A scaffold has therefore been erected and used for close inspections of the whole grotto surface and the statues. This work, which was carried out by Mr. Zou Yazhou, revealed a far more dangerous situation than expected. This can be illustrated now with the aid of some of the points labelled in figure 4.

The Buddha's head (A) has two parallel plain cracks running from the back almost to the breast (fig. 6). They can scarcely be seen from the floor, and even a closer inspection does not fully reveal them because of the clay covering. By measuring the loss of transmission of weak shock waves it was found that some cracks go through all the way. One can also see that the cracks are partly new and therefore increasing. It is clear that the head will break off when the cracks are sufficiently deep. The eastern Bodhisattva on the right of the Buddha has a similar weakness (B). The head is partly separated from the wall and body by two plain cracks at nearly 90° to each other. Only one of them is visible from the floor, and only a very close inspection revealed the danger (fig. 7). As the head is inclined towards the Buddha there is a risk that it will collapse in this direction.

The ceiling to the left and in front of the Great Buddha showed a few very loose protruding blocks of up to approximately 50 kg mass. One of them fell down about a year ago, highlighting the danger and leading to the decision to use a scaffold to carry out a close examination. The other loose blocks were then discovered. They were removed immediately as they did not belong to the original ceiling, so their documentary value appeared to be low in comparison to the costs necessary for their stabilisation.

A very dangerous zone was discovered to the right of the Buddha's head (D). Orthogonal families of joints nearly separated some plates weighing about two tons each (fig. 8). After minute blows these plates vibrated with a low frequency indicating that the plates are only clamped on one side. The term „coffin lids“ used by miners indicates the danger of such plates. A high risk was already present during the close inspection.

Together with Prof. Ge, a detailed stability analysis has been made and proposals for stabilisation worked out. The two heads will be provisionally secured by steel brackets crossing the cracks. The small boreholes and some glue inside are considered acceptable in the light of the high risk otherwise.

The subsequent long term stabilisation requires bolts nearly vertical to the cracks, as filling them with mortar would possibly lead to a deterioration of the situation. Respect for the statues makes the bolting of their heads from the front impossible,

大佛头部 (A) 有两条平行的、均匀的裂缝, 由背部几乎穿到了胸部 (图 6)。站在石窟里, 几乎看不见这两条裂缝。即使在跟前也不能全看到, 因为雕像上了一层泥塑。借助于弱震波发射测量, 发现一些裂缝确实完全穿透了。同时也可察觉, 一部分裂缝很新, 它们由于这些原因还在不断发育, 一旦裂缝达到足够深度, 头肯定会断掉。

大佛右边靠东的菩萨有类似的损伤 (B)。两个近乎直角相对的水平断面将他的头与岩壁和身体割开。站在窟内望去, 只能看见其中一道裂缝, 只有贴近跟前查看, 才能发觉危险的整个程度 (图 7)。由于头朝大佛倾斜, 所以它有朝这个方向断落的危险。

大佛前靠左的窟顶上有几块凸出来的、松动岩石, 最重的可达 50 公斤。其中一块岩石在大约一年前掉了下来。这一事件是一个明显的危险信号并导致做出决定, 为仔细观察石窟搭一座脚手架。其它的危岩只有站在架子上才能确认。它们当即被除, 因为它们不属于原窟顶, 与将它们固定在窟顶上的费用相比, 其文献价值还太低。

在大佛头部右边, 也发现一处危险区 (D)。一队彼此直角相交的裂隙将几块各重约 20 吨的石板错开 (图 8)。轻轻敲击, 石板会低频率地颤动, 这意味着, 它们只有一面被卡住。矿工使用的“棺材盖”一词是对来自这些石板的危险的生动写照。

在与葛教授的合作下, 我们对石窟的稳定性做了详细分析, 对加固提出了一些建议。两坐佛雕的头部应暂时用横跨裂缝的骑马钉加固。与存在的严重危险相比, 这里虽要使用小钻孔和粘合剂也不显得出格。随后长期的加固需要金属锚杆, 走向要与裂缝呈近乎直角, 因为用砂浆填裂缝有可能会使局面恶化。尊重佛像, 故不能从头的正面打入锚杆, 所以只有从背部特别是侧部钻孔。大佛肩后, 有一小块凹面, 这里只要钻较小直径的孔就够了。同样, 亦可从菩萨的两边, 向从静力学上考虑需要加固的方向钻横穿裂缝的孔。钻孔内插进不锈钢的锚杆。通过灌注经过致密处理的沙子, 外面再套上螺旋垫板, 所需的动力啮合式的连接即可实现。这种岩石锚杆系由俄罗斯科学院矿山研究所在新西伯利亚 (STASHEVSKI & KOLYMBAS 1993)<sup>2</sup> 开发的, 它坚固耐用, 此外在化学上呈中性, 故从保护要求上来说, 不用也是可拆的 (见图 9)。

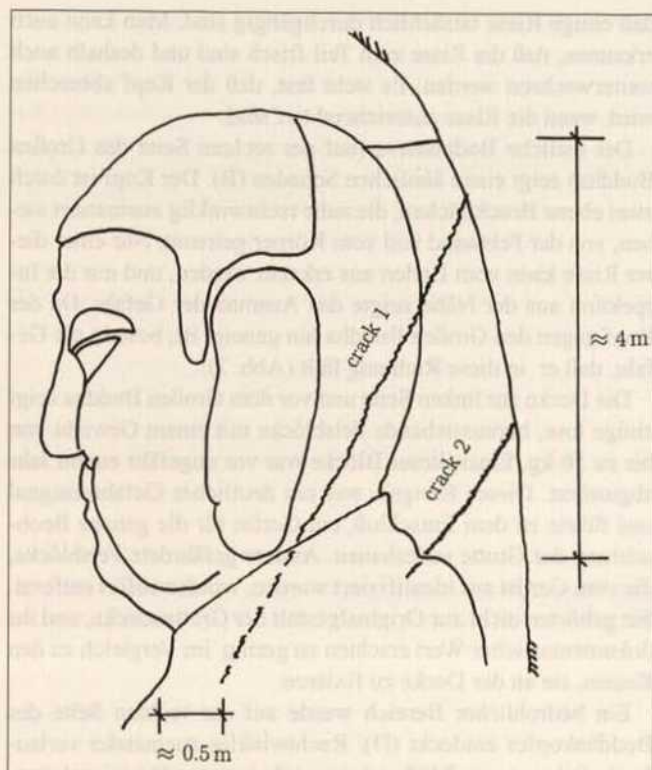


Abb. 6. Die Risse im Kopf des Buddha mit einer Neigung von 60°

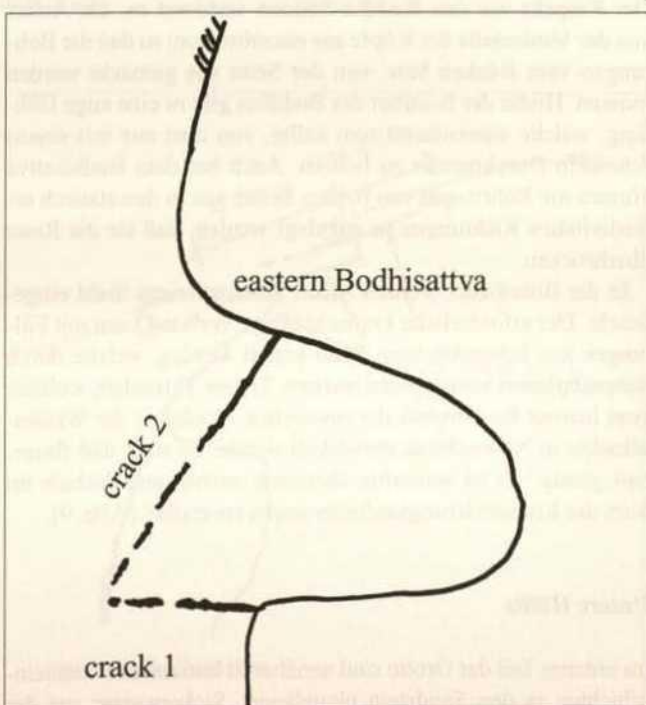
Fig. 6. Cracks at Buddha's head with an inclination of ca. 60°

图 6. 大佛头部的裂缝, 倾斜 60 度。

Abb. 7. Horizontaler Querschnitt durch den Kopf des östlichen Bodhisattva; vereinfachte Darstellung der Rißentwicklung

Fig. 7. Horizontal cross section through the head of the eastern Bodhisattva: rough sketch of the development of the cracks

图 7. 穿过东面菩萨头部的水平横截面, 裂隙发育的简化图。





daß einige Risse tatsächlich durchgängig sind. Man kann auch erkennen, daß die Risse zum Teil frisch sind und deshalb noch weiterwachsen werden. Es steht fest, daß der Kopf abbrechen wird, wenn die Risse ausreichend tief sind.

Der östliche Bodhisattva (auf der rechten Seite des Großen Buddha) zeigt einen ähnlichen Schaden (B). Der Kopf ist durch zwei ebene Bruchflächen, die nahe rechtwinklig zueinander stehen, von der Felswand und vom Körper getrennt. Nur einer dieser Risse kann vom Boden aus erkannt werden, und nur die Inspektion aus der Nähe zeigte das Ausmaß der Gefahr. Da der Kopf gegen den Großen Buddha hin geneigt ist, besteht die Gefahr, daß er in diese Richtung fällt (Abb. 7).

Die Decke zur linken Seite und vor dem Großen Buddha zeigt einige lose, herausstehende Felsblöcke mit einem Gewicht von bis zu 50 kg. Einer dieser Blöcke war vor ungefähr einem Jahr abgestürzt. Dieses Ereignis war ein deutliches Gefahrensignal und führte zu dem Entschluß, ein Gerüst für die genaue Beobachtung der Grotte aufzubauen. Andere gefährdete Felsblöcke, die vom Gerüst aus identifiziert wurden, wurden sofort entfernt. Sie gehörten nicht zur Originalgestalt der Grottendecke, und ihr dokumentarischer Wert erschien zu gering im Vergleich zu den Kosten, sie an der Decke zu fixieren.

Ein bedrohlicher Bereich wurde auf der rechten Seite des Buddhakopfes entdeckt (D). Rechtwinklig zueinander verlaufende Scharen von Klüften trennen dort einige Gesteinsplatten, welche ein Gewicht von jeweils etwa zwei Tonnen haben (Abb. 8). Bei leichtem Anschlag vibrierten diese Platten mit einer tiefen Frequenz, was andeutet, daß sie nur an einer Seite festgeklemmt sind. Der Ausdruck „Sargdeckel“, der von Bergleuten benützt wird, beschreibt die Gefahr von solchen Platten augenfällig.

Zusammen mit Professor Ge wurden eine genaue Stabilitätsanalyse und Vorschläge für die Stabilisierung ausgearbeitet. Die beiden Buddha-Köpfe sollen provisorisch mit Stahlklammern gesichert werden, welche die Risse überbrücken. Die hierfür erforderlichen kleinen Bohrlöcher und der Klebstoff erscheinen im Vergleich mit der Gefahr als vertretbar. Die nachfolgende, dauerhafte Stabilisierung erfordert Metallanker, welche nahezu rechtwinklig zu den Rissen verlaufen, da eine Füllung der Risse mit Mörtel möglicherweise die Situation verschlechtern würde. Der Respekt vor den Buddha-Statuen verbietet es, die Anker von der Vorderseite der Köpfe aus einzubringen, so daß die Bohrungen vom Rücken bzw. von der Seite aus gemacht werden müssen. Hinter der Schulter des Buddhas gibt es eine enge Höhlung, welche ausreichend sein sollte, von dort aus mit einem schmalen Durchmesser zu bohren. Auch bei dem Bodhisattva können die Bohrungen von beiden Seiten aus in den statisch erforderlichen Richtungen so angelegt werden, daß sie die Risse überbrücken.

In die Bohrlöcher werden Anker aus rostfreiem Stahl eingebracht. Der erforderliche kraftschlüssige Verbund kann mit Füllungen aus kompaktiertem Sand erzielt werden, welche durch Schraubplatten vorgespannt werden. Dieser Felsanker, welcher vom Institut für Bergbau der russischen Akademie der Wissenschaften in Nowosibirsk entwickelt wurde, ist stark und dauerhaft genug.<sup>2</sup> Er ist weiterhin chemisch neutral und deshalb im Sinn der Konservierungsanforderungen reversibel (Abb. 9).

## Untere Hälfte

Im unteren Teil der Grotte sind annähernd horizontale Tonsteinschichten in den Sandstein eingelagert. Sickerwasser aus der

so borings will have to be made from behind or from the side. There is a narrow cavity behind the Buddha's shoulders that should suffice for small boreholes. Borings from the side can reach the cracks behind the Bodhisattva at the necessary angles.

Stainless steel rods will be placed in the boreholes. The necessary structural contact can be achieved by using a filling of sand which is compressed by tightening the nuts. This type of rock anchor, which was developed at the Institute of Mining of the Russian Academy of Science in Nowosibirsk,<sup>2</sup> is strong and durable. It is also chemically neutral and reversible – a necessary aspect for conservationists (fig. 9).

## Lower Half

Towards the base of the grotto almost horizontal layers of claystone are embedded in the sandstone. Seepage water coming from the loess cap of the sandstone formation flows along these layers towards the cliff wall of the grotto. Due to capillary forces the water rises so that the sandstone in the lower half is wet, with decreasing water content towards the ceiling. Dissolved salts migrate together with the capillary water. The salts crystallise at the surface so that white coats develop. Part of the salt crystallises behind the surface and produces flakes. These parts of the rock surface are heavily eroded. This type of weathering is well understood in geology and in the case of monuments. It is very difficult, however, to prevent further deterioration by technical means.

Examples of such defects are briefly outlined for the labelled zones of figure 4:

- Part of the foot of the eastern Bodhisattva (E) has broken off. The statue could break apart in the near future;
- The socle of the great Buddha (G) has become very soft and has partly broken off already. It is poorly supported by a filling of sediments from the river and rock material from the grotto.
- The pathway arching behind the statues (F) will widen, so that the rock above will lose its support.

Without mechanical stability analysis it can easily be predicted that this mechanism will destroy the lower part of the grotto and the statues in the course of time. Some parts, such as the nimbus on the right hand side of the great Buddha for instance, are already close to collapse and need immediate support. A further disintegration of the rock surface has to be stopped or at least reduced.

The suggested plan to interrupt the flow of water into the grotto is to enclose the eroded space along the claystone layer with a stone wall. In the space formed behind the wall the seepage water could be collected and let out of the grotto by a drainage system. The reduced flow of water would lead to a slow drying out of the walls.

During the period of drying, the stone surface in this area could be protected by a sacrificial mortar layer, as used for the conservation of buildings. The transported salts are accumulated inside this layer, which is itself destroyed instead of the stone. It can, however, be easily replaced when necessary. Tests have been conducted in Karlsruhe, in cooperation with visiting Chinese scientists, to demonstrate the effect of salt transport and sacrificial mortar layers.

As an immediate measure it was decided to support and reconstruct the broken parts of the Buddha's nimbus and the hanging areas of the erosion zones with stone masonry. The walls are

## 下半部分

石窟下部，砂岩中夹有页岩层，分布几乎呈水平状。渗透水透过砂岩构造上的黄土覆盖层，在这些泥质丰富的岩层表面聚集，然后沿岩壁的方向流入洞窟。另一方面，毛细水由这些水平页岩层向上运动，进入砂岩，由于毛细水沿窟内岩壁蒸发，其作用更得到加强。因此，石窟下部的砂岩很潮湿，往上，水份则降。盐类也随着毛细水流运动，它们在表层形成结晶和白色层，并蔓延开来。一部分盐还在表层下形成结晶和鳞片。这一部分受潮湿和盐所影响的窟壁侵蚀严重。尽管这种风化机制在地质学和建筑保护领域为人熟知，要想靠技术措施阻止风化的蔓延，还是相当的困难。

下面简单地谈一下盐类风化，以图 4 上所标区域为例：

- 东边菩萨 (E) 下部的一部分已经折断。雕像可能不久会倾倒。
- 大佛的基座 (G) 遭到较大的损坏，一部分也已折断。目前它只是靠填补的水泥支撑，而这种支撑也不彻底。
- 雕像后面的甬道 (F) 在逐步扩大，上方的岩石呈悬空状，同样也会塌落。

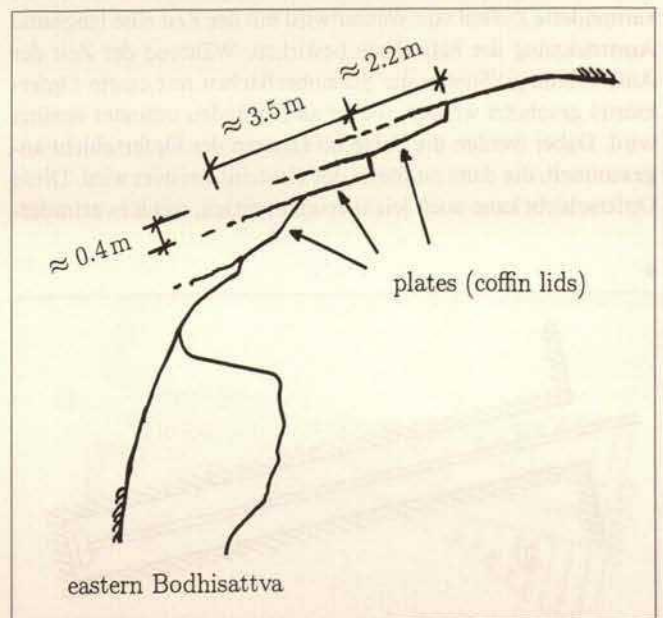
本来在未进行力学稳定性的分析之前便可预言，随着时间的推移，由潮湿和盐类所造成的损坏机制将会完全摧毁石窟的下部和雕像。一些部位，如大佛背光的右边，已经危在旦夕，需要立即加固。岩石表面的不断风化也应阻止，至少也要减慢风化的速度。针对这个原因，拟定了计划，砌一道墙将甬道区风化严重的空间隔离开来，以隔断渗透水沿水平页岩层的流动。这样，渗透水便可以在后面的空间里汇聚，并通过一引流系统排到外边。流水减少，岩壁逐渐会慢慢的干燥。在干燥的期间内，象在保护楼房建筑时间或使用的那样，可在岩石表面敷上一层保护的灰浆。盐类在保护层里面聚集，这层起保护作用的牺牲灰浆到时候则可代替岩石毁之。如果需要，这一保护层还可轻易地更换。在与中方交流来的科学家的合作下，在卡尔斯鲁尔就盐进入保护层的作用展开了试验研究。

采取的直接措施是，砌补佛像背光上所缺的部分。对于在甬道区朝下悬空的窟壁，也应采取同样的措施。这些墙体也能稳定整个石窟的静态。大约在二十多年前，在东面菩萨的左边便砌起一道砖墙，以保护这尊

Abb. 8. Vertikalschnitt durch die Decke und am Kopf des östlichen Bodhisattva; vereinfachte Darstellung der Größe und Form der „Sargdeckel“

Fig. 8. Vertical cross section through the ceiling and the head of the eastern Bodhisattva; rough sketch of the dimensions and shape of the "coffin lids"

图 8. 穿过窟顶和东面菩萨旁的纵截面。“棺材盖”大小和形状的简化图。



Lößüberdeckung der Sandsteinformation wird an der Oberseite dieser tonreichen Schichten gesammelt und fließt von dort in Richtung der Felswände innerhalb der Grotte. Auf der anderen Seite steigt von diesen Tonsteinhorizonten ausgehend Kapillarswasser in den Sandstein nach oben, das noch durch die Verdunstung entlang der Felswände innerhalb der Grotte verstärkt wird. Deshalb ist der Sandstein im unteren Teil der Grotte sehr feucht, wobei der Wassergehalt gegen die Decke hin abnimmt. Zusammen mit dem Kapillarstrom wandern auch die Salze. Sie kristallisieren an der Oberfläche und verursachen weiße Ausblühungen. Ein Teil der Salze kristallisiert auch unterhalb der Oberfläche und verursacht die Bildung von Schuppen. Diese von Feuchte und Salz betroffenen Teile der Felsoberfläche sind stark erodiert. Obwohl dieser Verwitterungsmechanismus in der Geologie und im Bereich des Bautenschutzes grundsätzlich sehr gut verstanden wird, ist es sehr schwierig, die fortschreitende Verwitterung durch technische Maßnahmen zu verhindern.

Beispiele für die Salzverwitterung seien im folgenden kurz für die auf Abbildung 4 bezeichneten Zonen beschrieben:

- Ein Teil des Sockels vom östlichen Bodhisattva (E) ist abgebrochen. Die Statue ist in Gefahr umzustürzen.
- Der Sockel des Großen Buddhas (G) ist stark geschwächt und teilweise ebenfalls ausgebrochen. Gegenwärtig wird er nur sehr unvollständig durch Zementausfüllungen gestützt.
- Der Umgang hinter den Statuen (F) wird sich mit der Zeit weiter ausweiten, so daß die Felsen darüber frei nach unten hängen und ebenfalls abstürzen können.

Bereits ohne eine mechanische Stabilitätsanalyse ist leicht vorherzusagen, daß der durch Feuchte und Salz verursachte Schadensmechanismus den unteren Teil der Grotte und die Figuren im Laufe der Zeit vollständig zerstören wird. Einige Teile, wie z.B. die rechte Seite des Nimbus des Großen Buddhas, sind bereits kurz davor, in sich zusammenzustürzen und benötigen eine sofortige Sicherung. Auch die fortschreitende Rückwitterung der Gesteinsoberfläche muß unterbunden oder zumindest verlangsamt werden.

Aus diesem Grunde besteht der Plan, den Zufluß von Sickerwasser entlang der Tonsteinhorizonte zu unterbrechen, indem der stark herausgewitterte Raum im Bereich des Umgangs durch eine Mauer abgeschlossen wird. In dem dahinterstehenden Raum kann nun das Sickerwasser gesammelt und mit Hilfe eines Drainagesystems nach draußen abgeleitet werden. Der verminderte Zufluß von Wasser wird mit der Zeit eine langsame Austrocknung der Felswände bewirken. Während der Zeit der Austrocknung könnten die Steinoberflächen mit einem Opfermörtel geschützt werden, wie er an Gebäuden mitunter benützt wird. Dabei werden die Salze im Inneren der Opferschicht angesammelt, die dann an Stelle des Gesteins zerstört wird. Diese Opferschicht kann auch leicht ersetzt werden, wenn es erforder-

lich ist. In Zusammenarbeit mit chinesischen Austauschwissenschaftlern wurden in Karlsruhe Versuche begonnen, die Wirkung des Salztransportes in die Opferschichten zu untersuchen.

Als unmittelbare Maßnahme wurde beschlossen, die fehlenden Teile am Nimbus des Buddhas zu untermauern und zu ergänzen. Ebenso sollen die nach unten freihängenden Felsflächen im Umgang gesichert werden. Diese Mauern sind auch in der Lage, die Statik der gesamten Grotte zu stabilisieren. Vor mehr als zwanzig Jahren wurde bereits eine Ziegelmauer links neben dem östlichen Bodhisattva errichtet, um diesen zu sichern. Diese wird nun als unangemessen betrachtet, da ihre Oberfläche fremdartig ist und ihre Form nicht der des ehemaligen äußeren Umrisses der Gotte entspricht. Außerdem versperrt sie den Umgang hinter dem Bodhisattva. Im Gegensatz zu früher soll das Stützmauerwerk heute aus Sandstein mit entsprechend verträglichem Mörtel hergestellt werden, so daß die Oberfläche des Mauerwerks die ehemalige Oberflächengestalt der Grotte besser wiedergibt.

Die Sedimentausfüllung, die den Boden der Grotte bedeckt, soll entfernt werden, so daß die Grotte wieder ihre ehemalige Tiefe erhält. Dies muß jedoch in kleinen, sorgfältig geplanten Schritten erfolgen, um die Stabilität der Grotte nicht zu gefährden und historisch bedeutsame Funde zu sichern. Die Ausgrabung wird derzeit unter der Leitung von Archäologen begonnen. Es werden jeweils nur sehr schmale Gräben ausgehoben, so daß verbleibende Teile noch die nötige Unterstützung herstellen. Das Stützmauerwerk wird dann auf den festen Felsgrund gesetzt und von dort aus bis zum intakten Stein hochgemauert. In manchen Fällen wird es nötig sein, das Mauerwerk mit dem dahinterliegenden Fels durch Anker zu verbinden, wobei auch wieder die oben beschriebenen Sandanker zum Einsatz kommen können.

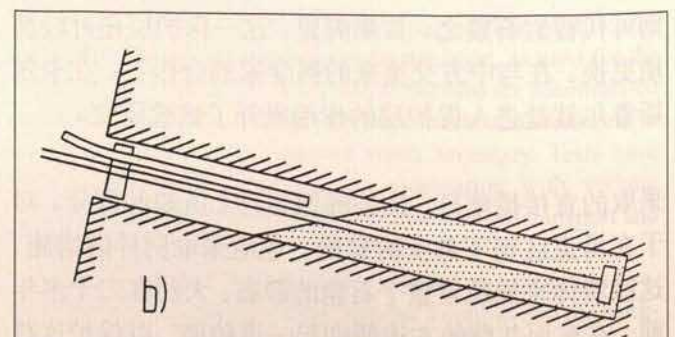
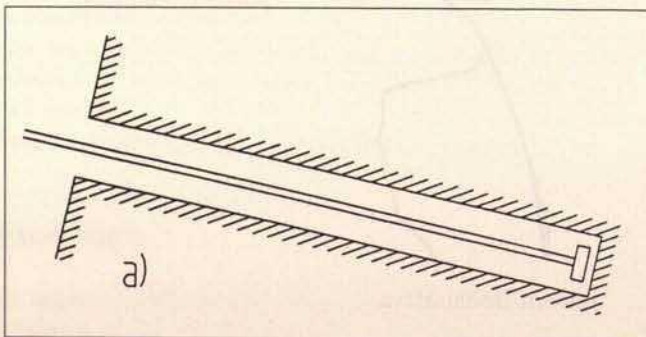
#### Anmerkungen

- 1 PAUL PELLIOT, *Les Grottes de Touen-Houang. Peintures et Sculptures bouddhiques des époques des Wei, des Tang et des Song*, Paris 1924, Bd. VI, S. 371-375.
- 2 S. STASHEVSKI, D. KOLYMBAS, *Prestressed Sand-Anchors*, in: *Geotechnik (DGE) 4/1993*, S. 202 f. (deutsche Fassung).

#### Danksagung

Das Konservierungsprojekt der Dafosi-Grotte ist ein Gemeinschaftsprojekt des Ministeriums für Kulturgüter in Xi'an mit dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege in München. Der Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) für die finanzielle Unterstützung und den chinesischen und deutschen Kollegen für die fruchtbare Zusammenarbeit.

9



capable of stabilizing the structural system of the whole grotto. More than 20 years ago a brick wall was erected left of the eastern Bodhisattva to support it. It is now considered inadequate because the surface is unsuitable and the shape deviates from the original outer rim of the grotto, so that the circuit behind the Bodhisattva is closed there. The supporting masonry will now be made of sandstone blocks, with a small amount of compatible mortar in the joints so that the facade will at least roughly reconstitute the former grotto surface.

The filling at the base will be removed so that the grotto regains its former depth. This has to be done in small careful steps in order to secure historically important findings and to maintain stability. The digging work is now going on in the presence of archaeologists. Only rather narrow pits are being excavated so that the remaining parts can still give sufficient support. The supporting masonry will then be placed on firm ground and erected next to the intact rock surface. At some places in the masonry it will be necessary to connect the rock behind by sand anchors, as outlined in the previous section.

### Notes

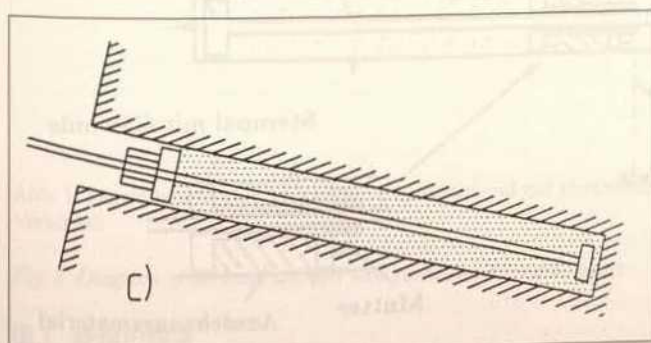
1. PAUL PELLIOT, *Les Grottes de Touen-Houang. Peintures et Sculptures bouddhiques des époques des Wei, des Tang et des Song*, Paris 1924, Vol. VI, pp. 371-375.
2. S. STASHEVSKI, D. KOLYMBAS, *Prestressed Sand-Anchors*, in: *Geotechnik (DGEG)* 4/1993, pp. 202-203.

### Acknowledgement

The conservation of the Dafosi grotto is a cooperative project of the Ministry of Cultural Goods in Xi'an and the Bavarian State Conservation Office in Munich. The support of the project by the German Federal Ministry of Education, Science, Research and Technology (BMBF) and the cooperation with the Chinese and German partners is gratefully acknowledged.

Abb. 9a-d. Funktion eines Sandankers

Fig. 9a-d. Functioning of a sand anchor



雕像。这道墙今天看来已不合时宜，该墙面不协调，其形状也与石窟当时外轮廓的形状不符。此外，它封锁了通向东面菩萨后面去的通道。与过去相反，今天要砌的保护墙应使用砂岩和相应协调的砂浆，使得墙体表面更贴近石窟窟壁的原状。

覆盖在石窟地上的淤积层应该清除，使石窟恢复原有的深度。为了一方面不影响石窟的稳定性，另一方面又使各淤积层内的有文化价值的文物不致遭到破坏，清淤应谨慎地、分小步骤地进行。挖掘工作目前系由考古学家所领导。每次只挖很窄的坑，这样，剩余部分尚能起到必要的支撑作用。最后，在牢固的岩石地基上砌保护墙，砌到完好无损的岩石高度。在某些情况下，有必要将墙体与它后面的岩石用锚杆连接起来，上面介绍的砂锚杆即可派上用场。

### 引用文献

- 1 PELLIOT, P. (1924): *Les Grottes de Touen-Houang. Peintures et Sculptures bouddhiques des époques des Wei, des Tang et des Song*, Vol. VI, Pp.371-375, Paris.
- 2 STASHEVSKI, S. & KOLYMBAS, D. (1993): *Prestressed Sand-Anchors* (德文). *Geotechnik (DGEG)* 4/1993, Pp. 202-203.

### 鸣谢

大佛寺的保护项目是西安陕西省文物局和慕尼黑巴伐利亚州文物保护局的共同项目。感谢联邦教育、科学、研究和技术部 (BMBF) 提供的经济援助，感谢中方和德方伙伴的卓有成效的合作。

图 9a - d. 砂锚杆之功能

