

Stabilität und Stabilisierung der Felsen in der Dafosi-Grotte

The Stability and Stabilizing of the Rocks in the Dafosi Grotto

Einleitung

Die Dafosi-Felsgrotte ist so groß, daß bereits kleinere gefährdete Felspartien über eine Tonne wiegen. Durch eine numerische Berechnung mit der sogenannten Finite Element Methode kann die Stabilität der gefährdeten Felsen nicht beurteilt werden. Deshalb war es notwendig, die Stabilität an Ort und Stelle zu untersuchen. Im Text werden einige Meßergebnisse angegeben, und die Stabilität der gefährdeten Felsen wird beurteilt. Weiterhin werden einige Maßnahmen zur Stabilisierung vorgeschlagen.

Introduction

The Dafosi grotto is so large that even the smaller rock particles that are in danger of breaking off weigh over 1 ton. The stability of these dangerous rocks cannot be judged by a numeric calculation using the Finite Element Method. It is therefore necessary to use the hands-on approach and examine the stability at the site itself. This paper will contain some of the results and will assess the stability of the endangered rocks. Some suggestions on how to stabilize the grotto will also be made.

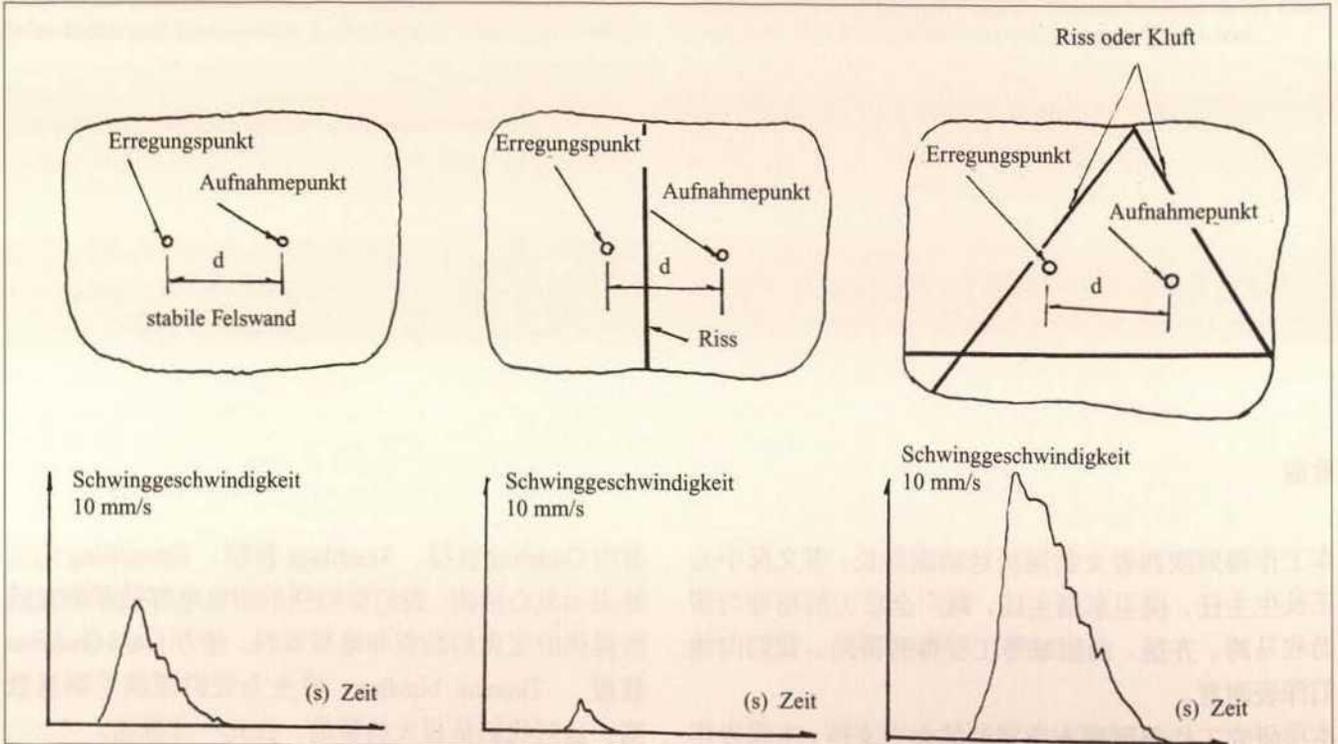
Messungen

Um die Stabilität der Felsen und die Tiefe der Risse zu beurteilen, wird eine dynamische Meßmethode benutzt. Beim Klopfen auf eine ungerissene Felswand kann ein Schwingungssignal durch einen integrierten Schwingungsmesser gemessen werden (Abb. 1 a). Wenn es einen Riß oder eine Kluft zwischen dem Erreger- und dem Aufnahmepunkt gibt (Abb. 1 b), ist das Schwingungssignal schwächer. Wenn der Riß sehr tief ist und wenn es keine Verbindung zwischen den zwei Rißflanken gibt, kann das Schwingungssignal nicht aufgenommen werden. Wenn ein Fels von einigen Rissen oder Klüften geschnitten wird (Abb. 1 c) und wenn es eine schwache Verbindung zwischen dem Fels und einem stabilen Fels gibt, ist das Schwingungssignal stärker. Wie

Measurements

The stability of the rocks and the depth of the cracks can be assessed using a dynamic measuring method. By tapping at one point on an undamaged rock face the oscillation can be measured using an integrated machine placed at another point of the wall (fig. 1 a). The signal becomes weaker when a crack or crevice is present between the two points (fig. 1 b). If the crack is very deep and there is no connection between the two edges it is not possible to record a signal. If a rock contains cracks or crevices (fig. 1 c) and there is a weak connection between the rock and another rock that is stable the signal is stronger. The method used to assess the stability of rock is similar to the use of a stethoscope in a hospital.

1



大佛寺石窟岩石稳定性及其加固

引言

大佛寺石窟之大, 其中一个较小的危岩就可能重过一吨, 对于这种情况, 采用有限单元的数值计算方法来判断这些危岩的稳定性常常比较困难, 为此在原位直接判断其稳定性是十分必要的。该报告中给出了一些原位的实测结果; 同时对一些危岩的稳性进行了评价; 此外提出了一些加固危岩的措施。

危岩测试

在石窟内采用动力测量方法, 对危岩的稳定性及裂缝的深度进行了测量。如图 1a 所示, 当在一个无裂缝的完整岩壁上敲击时, 积分测振仪即可接收到振动信号; 如果在激振点和测振点之间有裂缝或节理存在, 则测得的信号较弱 (图 1b); 若裂缝很深, 且其间完全没有连接, 则测振仪就接收不到信号; 当一块岩石

Abb. 1. Grundlage der dynamischen Messung zur Beurteilung der Felsstabilität sind:

1a: Schwingungssignal beim gesunden Felsen; 1b Schwingungssignal bei Klüften und Rissen im Fels; 1c: Schwingungssignal bei extrem schwacher Verbindung von gelockertem Fels zum Muttergestein

Abb. 2. Numerisches Modell der Höhle mit den drei Figuren. (Die Ziffern 1-6 werden im Text näher erläutert.)

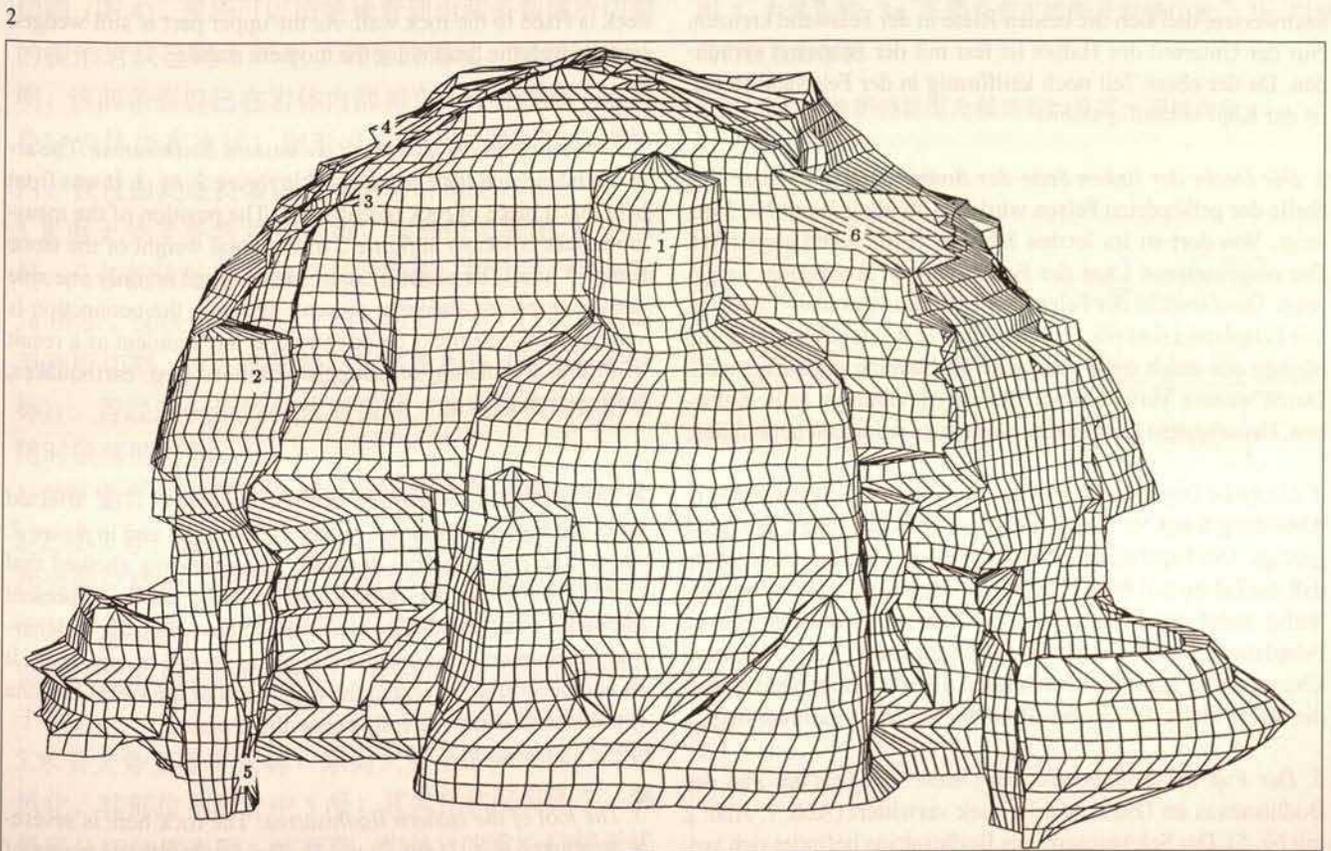
Fig. 1. The basis for the dynamic measurement to determine the rock stability: 1a: signal oscillation for undamaged rock; 1b: signal oscillation for cracks and crevices in the rock; 1c: signal oscillation for extremely weak connection between loose rock and the bedrock

Fig. 2. Numerical model of the half of the grotto with the three figures. (The numbers 1-6 are described in detail in the text)

图 1. 岩石动力测量之原则及岩石稳定性:

1a: 完整岩壁之振动信号; 1b: 岩壁存在裂缝或节理时之振动信号; 1c: 岩体无连接或局部微弱连接时之振动信号

图 2. 大佛寺及窟内三佛像之数值模拟测绘图 (图上 1-6 之说明见文内)



mit einem Stethoskop im Krankenhaus kann so die Stabilität des Felsens beurteilt werden.

Die gefährdeten Felsen in der Dafosi-Grotte können nach ihrer Gefährdung in drei Gruppen eingeteilt werden:

Erste Gruppe

Diese Gefährdungsklasse ist an der Decke der Grotte weit verbreitet (z.B. in Abb. 6 Nr.1-1, 1-2, 1-3). Von den gefährdeten Felsen hat jeder ein Gewicht unter 100 kg. Sie sind stark verwittert und zerklüftet. Leichtes Klopfen läßt einige kleine Sandsteinplatten abfallen.

Zweite Gruppe

Die Felsen in dieser Gruppe sind zerklüftet. Sie sind groß und wiegen zwischen einer und 70 Tonnen. An fünf Stellen gibt es absturzgefährdete Felsen dieser Größe.

1. Kopf und Hals des Großen Buddha: Die Situation wird in Abbildung 2 mit Nr. 1 gezeigt. Vom Kopf bis zum Hals des Großen Buddha erstrecken sich zwei parallele Risse (Abb. 3.a). Die Ergebnisse der Schwingungsmessungen haben gezeigt, daß die Risse sehr tief sind. Vermutlich gehen die Risse von Osten nach Westen durch. Aus der Erfahrung kann man vermuten, daß die beiden Risse sich seit der Entstehung des Großen Buddha immer mehr vergrößert haben. Nur der Oberteil des Kopfes und der Unterteil des Halses sind mit der Felswand verbunden. Die Ergebnisse der dynamischen Messung zeigen, daß der Fels zwischen den beiden Rissen locker ist. Der Einfallswinkel der Risse beträgt etwa 60°. Der Kopf wiegt ungefähr 70 Tonnen.

2. Kopf und Hals des Bodhisattvas im Osten: Die Situation wird in Abbildung 2 mit Nr. 2 gezeigt. Zwei Risse schneiden den Kopf des Bodhisattvas im Osten (Abb. 4). Man kann deutlich erkennen, daß sich der keilförmige Fels entlang der Risse nach unten bewegt. Mit Hilfe der Schwingungsmessungen läßt sich nachweisen, daß sich die beiden Risse in der Felswand kreuzen. Nur der Unterteil des Halses ist fest mit der Felswand verbunden. Da der obere Teil noch keilförmig in der Felswand steckt, ist der Kopf vorläufig stabil.

3. Die Decke der linken Seite des Bodhisattvas im Osten: Die Stelle der gefährdeten Felsen wird in Abbildung 2 mit Nr. 3 gezeigt. Von dort ist im letzten Jahr ein Felsbrocken abgestürzt. Die eingemessene Lage der Felsen wird in Abbildung 5.a gezeigt. Das Gewicht der Felsen beträgt insgesamt über 5 Tonnen. Die Felsplatten sind nur noch auf einer Seite eingeklammert und bleiben nur durch diese schwache Verbindung vorläufig stabil. Durch weitere Verwitterung oder durch Vibration (z.B. Erdbeben, Bauarbeiten) können diese Felsen zu jeder Zeit herabfallen.

4. Decke im Osten der Grotte: Die gefährdeten Felsen werden in Abbildung 6 mit Nr. 2-1, 2-2, 2-3 und in Abbildung 2 mit Nr. 4 gezeigt. Die Ergebnisse der dynamischen Messungen ergaben, daß die Felsen z.T. hohl hängende Platten sind. Sie bleiben vorläufig stabil durch die schwache Verbindung mit den oberen Felsplatten. Durch weitere Verwitterung oder durch Vibration können sie zu jeder Zeit herabfallen. Es soll betont werden, daß die rechte Hand des Großen Buddha fast direkt darunter liegt.

5. Der Fuß des Bodhisattvas im Osten: Der Fels am Fuß des Bodhisattvas im Osten ist sehr stark verwittert (Abb. 7, Abb. 2 mit Nr. 5). Der Schwerpunkt des Bodhisattvas befindet sich ver-

The rocks at risk in the Dafosi grotto can be sorted into three groups, according to the level of risk:

First group

This group is spread across the ceiling of the grotto (e.g. in Fig. 6, no. 1-1, 1-2, 1-3). Each rock weighs less than 100 kg and is severely weathered with many crevices. Gentle tapping causes some small pieces of sandstone to fall off.

Second group

These rocks have fissures, are large, and weigh between 1 and 70 tons. There is a danger of these rocks breaking off in five areas of the grotto.

1. Head and neck of the Great Buddha: The problem is shown in figure 2, no. 1. Two parallel cracks spread from the head to the neck of the Great Buddha (fig. 3 a). The results of the dynamic measurements showed that the cracks are very deep and probably spread from east to west. From experience it can be assumed that over time the two cracks have become increasingly larger. Only the top half of the head and the lower half of the neck are attached to the rock wall. The results of the dynamic test showed that the rock between the two cracks is loose. The cracks' angle of incidence is about 60°. The head weighs approximately 70 tons.

2. Head and neck of the eastern Bodhisattva: The situation is shown in figure 2, no. 2. Two cracks cut through the head (fig. 4) and it can be clearly seen that the wedge-shaped rock next to the cracks is shifting downwards. The dynamic measurements have shown that the cracks cross each other. Only the lower half of the neck is fixed to the rock wall. As the upper part is still wedged into the wall the head is for the moment stabile.

3. The ceiling on the left side of the eastern Bodhisattva: The area of endangered rock is displayed in figure 2, no. 3. It was from here that a piece of rock recently fell. The position of the measured rocks is shown in figure 5 a. The total weight of the stone is over 5 tons. The plates of stone are clamped on only one side and are therefore stabile at present, although the connection is very weak. These rocks could fall off at any moment as a result of further weathering or through vibrations (e.g. earthquakes, construction work).

4. The ceiling in the eastern part of the grotto: The affected rocks are shown in figure 6, points 2-1, 2-2, 2-3 and in figure 2, no. 4. The results of the dynamic measurements showed that some of the plates are hollow and are only stabile at present through a weak connection with plates above. Further weathering or vibrations could cause the plates to fall at any time. It should be stressed here that the right hand of the Great Buddha is positioned almost directly below these plates.

5. The foot of the eastern Bodhisattva: The rock here is severely weathered (fig. 7; fig. 2, no. 5). The Bodhisattva's centre of

由几条裂缝或节理所切割, 并且被切割的岩块与稳定的大块岩体无连接或仅有局部微弱连接时, 敲击这块岩石, 则可在该岩块上测到较强的振动信号 (图 1c)。象用听振器给病人看病一样, 用这种方法可判断岩块的稳定性。

大佛寺石窟中的危岩按其危险程度可分为三类:

一. 窟顶小块危岩: 如图 6 中所示 1-1, 1-2, 1-3 号危岩, 这些危岩已强裂风化, 只要轻轻敲击就有小块岩石脱落。这些危岩重约 100 公斤。

二. 被裂缝或节理所切割的岩块, 这些岩块重约 1 到 70 吨, 分布于洞窟中如下五个部位:

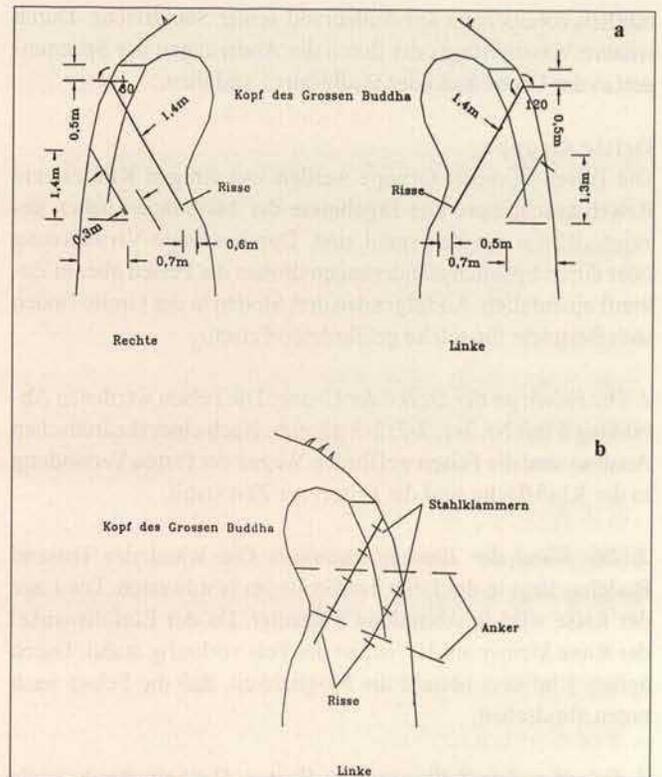
1. 大佛的颈部与头部: 该危岩在窟内的位置见图 2.1 号。如图 3a 所示, 两条平行裂缝由大佛的头部切割至颈部。测试结果表明该裂缝发展较深, 这两条裂缝可能由东到西已经贯通。由裂缝发展的新痕迹判断, 大佛雕琢之后, 该裂缝一直在扩展延伸。目前只有大佛头部顶端及颈部下端与稳定岩体部分连接。测试结果还表明: 由该两条裂缝所切割的中间岩块已较松动; 裂缝倾角约 60 度; 被切割的岩块 — 大佛头部约重 70 吨。

2. 东面大势至菩萨头部至颈部: 该危岩东窟内的位置则图 2.2 号给出。大势至菩萨的头部也由两条裂缝所切割 (图 4), 现场可以清楚地看到由两条裂缝所切割的楔形岩块已向下产生了明显的错动。测试结果证明: 该两条裂缝已在岩体内部相交, 只有颈部下端与稳定岩体尚存连接; 楔形岩块的上部嵌于稳定岩体内, 仅仅由此维持着该岩块的临时稳定。

3. 东面大势至菩萨左边窟顶: 其部位可见图 2 中 3 号。几年前该处曾有岩石自动脱落, 其危岩产状如图 5a 所示。这些岩板约重 5 吨, 四面临空。顶面由层面节理所切割, 仅一面与较稳定岩板相连 (类似一悬臂标)。若经进一步风化或遇振动 (如地震作用) 则有随时脱落的可能。

4. 东面窟顶: 该部危岩在窟中所处位置见图 6 中 2-1, 2-2, 2-3 号, 及图 2 中 4 号。动力测试结果表明, 这些岩板已松动, 仅存顶面与稳定岩板的微弱层间连接而悬挂于窟顶。如若继续风化或受振动即可能下落。值得注意的是, 这些岩板的下部刚好是大佛上举的右手臂。

5. 东面大势至菩萨底部: 东面大势至菩萨底部已严重风化, 其部位见图 2 中 5 号; 其风化状况见图 7。测量后分析结果表明: 该菩萨 (岩体) 的重心已接近底



3

Abb. 3. Kopf des Großen Buddha; 3a: rechte und linke Ansicht mit Lage der Risse; 3b: Sicherungsvorschlag mit Stahlklammern

Abb. 4. Bodhisattva Mahasthamaprapta; Seitenansichten und Horizontalschnitt mit Angabe der Risse

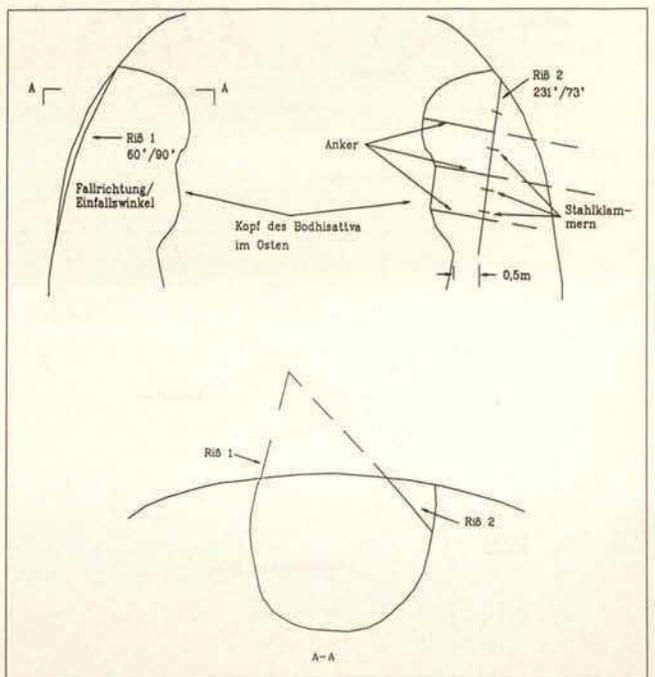
Fig. 3. Head of the Great Buddha; 3a: right and left views showing position of the cracks; 3b: stabilization proposal using steel clamps

Fig. 4. Bodhisattva Mahasthamaprapta; side view and horizontal section showing the cracks

图 3. 大佛头部; 3a: 头部左右正视图及裂缝位置; 3b: 以骑马钉做危岩加固

图 4. 大势至菩萨侧视图及横切面以及其上裂缝位置

4



mutlich bereits nahe am Außenrand seiner Standfläche. Durch weitere Verwitterung oder durch die Änderungen der Spannungen in der Grotte kann der Bodhisattva umfallen.

Dritte Gruppe

Die Felsen in dieser Gruppe werden von einigen Klüften und Rissen geschnitten. Die Ergebnisse der Messungen haben gezeigt, daß sie zur Zeit stabil sind. Durch weitere Verwitterung oder durch Spannungsänderungen drohen die Felsen aber in Zukunft einzufallen. An folgenden drei Stellen in der Grotte finden sich Beispiele für solche gefährdeten Felsen:

1. *Die Felsen an der Decke der Grotte:* Die Felsen werden in Abbildung 6 mit Nr. 3-1, 3-2, 3-3 gezeigt. Nach einer theoretischen Analyse sind die Felsen gefährdet. Wegen der festen Verbindung in der Kluffläche sind die Felsen zur Zeit stabil.

2. *Die Wand der Tausend Buddhas:* Die Wand der Tausend Buddhas liegt in der Ecke der Grotte im Nordwesten. Die Lage der Risse wird in Abbildung 8 gezeigt. Da der Einfallswinkel der Risse kleiner als 30° ist, ist der Fels vorläufig stabil. Durch äußere Einflüsse besteht die Möglichkeit, daß die Felsen nach unten abrutschen.

3. *Fels über dem Bodhisattva im Westen:* Die betreffende Stelle wird in Abbildung 2 mit Nr.6 gezeigt, und die Lage der Risse ist in Abbildung 9 zu sehen. Beim Klopfen ist der Fels stabil, aber nach einer theoretischen Analyse ist der Fels gefährdet.

gravity is presumably already near the outer edge of its base, so that any further weathering or variation of tension in the grotto could lead to its collapse.

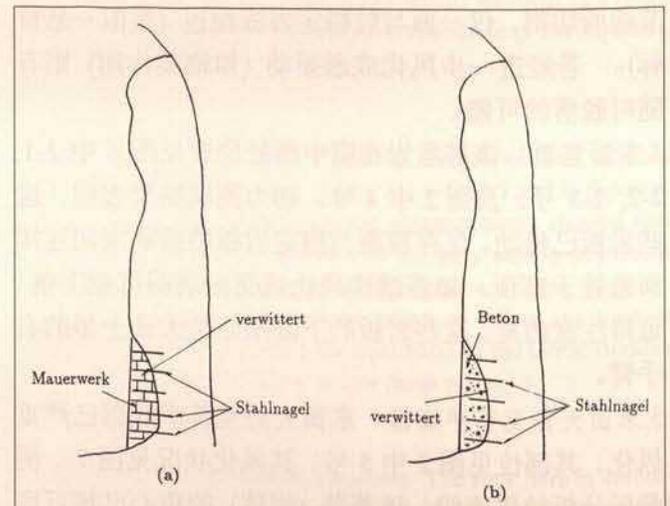
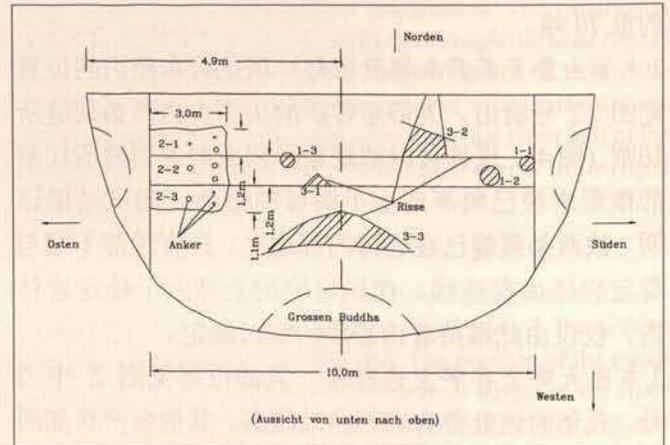
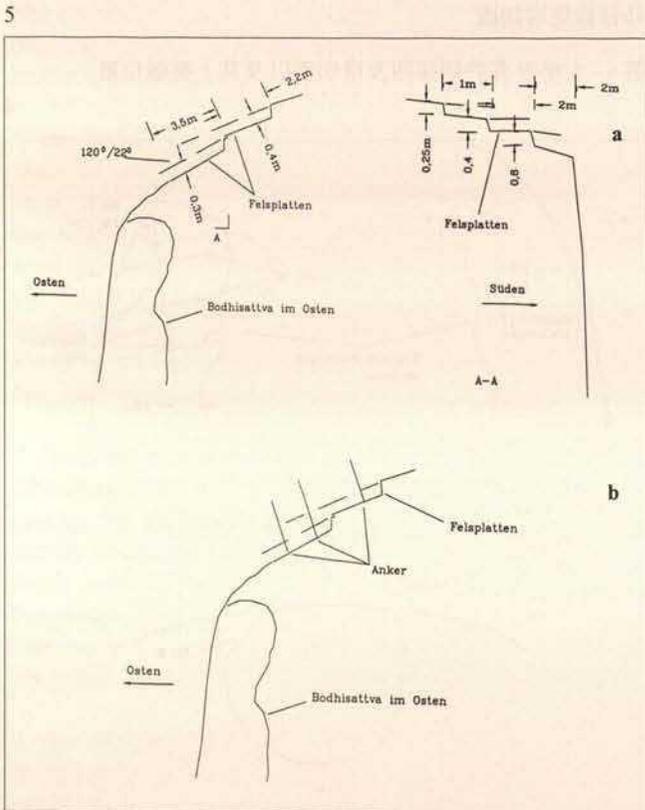
Third group

These rocks contain some crevices and cracks. Measurements have shown that they are at present stabile. There is a risk, however, that further weathering or changes in pressure could cause them to break off. Examples of the rocks concerned can be found in the following three areas of the grotto:

1. *The rocks on the ceiling of the grotto:* These rocks are displayed in figure 6, no. 3-1, 3-2, 3-3. A theoretical analysis shows them to be in danger, although they are at present firmly fixed to the creviced surface and are therefore stabile.

2. *The Wall of the Thousand Buddhas:* The Wall of the Thousand Buddhas is in the north-west corner of the grotto. The positioning of the cracks are shown in figure 8. Since the angle of incidence of the cracks is less than 30° the rocks are stabile for the time being. There is, however, the possibility that external forces could cause the rocks to slide down.

3. *The rock above the western Bodhisattva:* The areas affected are shown in figure 2, no. 6, and the positions of the cracks in figure 9. The rocks are stabile on being tapped, but according to a theoretical analysis they are in danger.



部风化面。若风化作用进一步发展或由于窟内应力的不利变化，这一菩萨（岩体）即可能倒塌。

三. 第三类危岩多由裂缝或节理所切割。测试和分析结果证明，这类岩块目前尚属稳定。如若进一步风化或窟内应力变化，这些岩块将来可能变得较为危险甚至脱落。这类危岩分布于洞窟中如下三处：

1. 石窟顶板：其部位见图 6 中 3-1, 3-2, 3-3 号，这些岩块多由 3 至 4 条裂缝或节理所切割，理论分析已属危岩，但由于裂缝或节理间尚存较强连接，则目前尚处于较稳定状态。

2. 千佛壁：千佛壁位于窟内西北角，壁上有裂缝发育，其状况见图 8，裂缝倾角小于 30 度，即小于岩体间的内摩擦面，则属静力稳定的；若遇外界动力影响也可能产生滑动。

3. 西面观世音菩萨顶部岩块：其在窟内的位置见图 2 中 6 号，其裂缝产状见图 9：据现场测试结果估价，该部岩块尚属稳定，而理论分析则属危岩。

◁ Abb. 5. Bodhisattva Mahasthamaprapta; 5a: Lage der gefährdeten Felsen; 5b: Stabilisierungsvorschlag

Abb. 6. Ansicht der Grottoendecke von unten

Abb. 7. Verwitterter Fels und Stabilisierungsvorschlag

Abb. 8. Die 1000-Buddha Wand; Stabilisierungsvorschläge

Abb. 9. Bodhisattva Avalokiteshvara; Verteilung der Klüfte

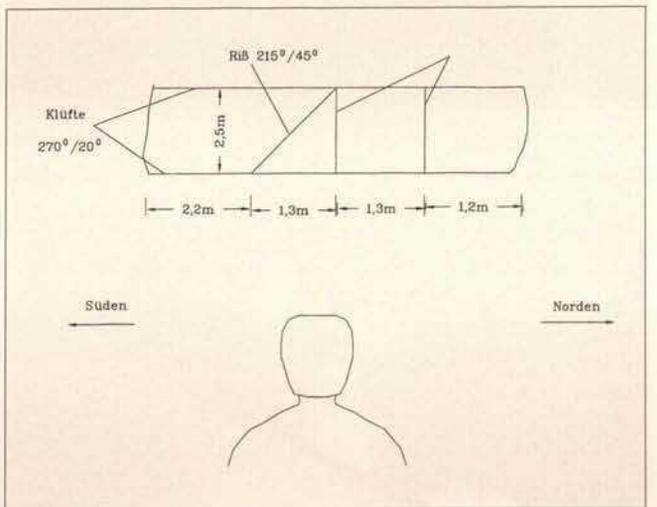
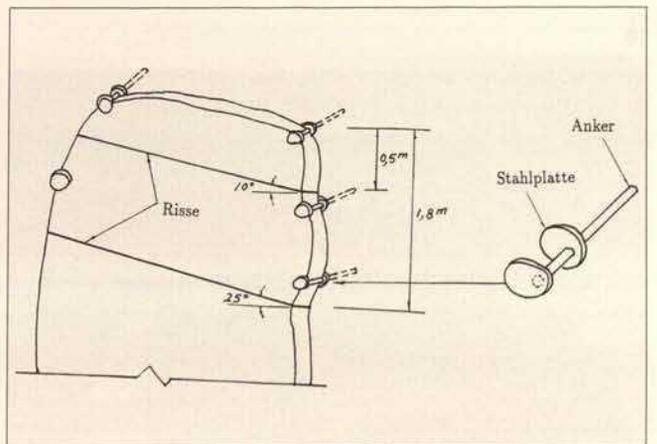
◁ Fig. 5. Bodhisattva Mahasthamaprapta; 5a: location of the endangered rock; 5b: stabilization proposal

Fig. 6. View of the grotto ceiling from below

Fig. 7. Eroded rock and stabilization proposal

Fig. 8. Wall of the Thousand Buddhas; stabilization proposal

Fig. 9. Bodhisattva Avalokiteshvara; distribution of the crevices



◁ 图 5. 大势至菩萨侧视图; 5a: 危岩位置; 5b: 岩板加固

图 6. 石窟顶仰视图

图 7. 岩石的风化及其加固

图 8. 千佛壁及其加固

图 9. 观世音菩萨头顶危岩分布

Vorschläge zur Stabilisierung

Die gefährdeten Felsen der ersten Gruppe sind so stark verwittert, daß sie zu jeder Zeit herabfallen können. Sie sind so klein, daß sie nicht stabilisiert werden können. Man sollte diese Felsen vor der Abtragung der Auffüllung entfernen.

Die gefährdeten Felsen der zweiten Gruppe sind groß oder gehören zum Teil zu den Figuren. Sie müssen vor der Konservierung stabilisiert werden, um Risiken für die Arbeiter zu vermeiden. Zur vorläufigen Stabilisierung der Köpfe des Großen Buddha und des Bodhisattvas im Osten können Stahlklammern (Abb. 3.a und Abb. 4) benutzt werden. Zur dauerhaften Stabilisierung sollten Felsanker benutzt werden. Zur Stabilisierung der Felsplatten an der Decke sollte man zuerst die Felsen abstützen, dann die kleinen gefährdeten Felsen entfernen und anschließend die Felsplatten mit Felsankern (Abb. 5.b und Abb. 6) stabilisieren. Zur Stabilisierung des Fußes des Bodhisattvas im Osten werden zwei Methoden in Abbildung 7 gezeigt.

Die gefährdeten Felsen der dritten Gruppe können an der Decke der Grotte und über dem Bodhisattva im Westen mit Felsankern stabilisiert werden. Die Wand der Tausend Buddhas kann mit der in Abbildung 8 gezeigten Maßnahme stabilisiert werden.

Bei der Stabilisierung und bei der Abtragung der Auffüllung müssen die gefährdeten Felsen überwacht werden. Ein besonderer Felsanker ohne chemische Erosion zur Stabilisierung ist zu bevorzugen (Abb. 10-12).

Suggestions on How to Stabilize the Grotto

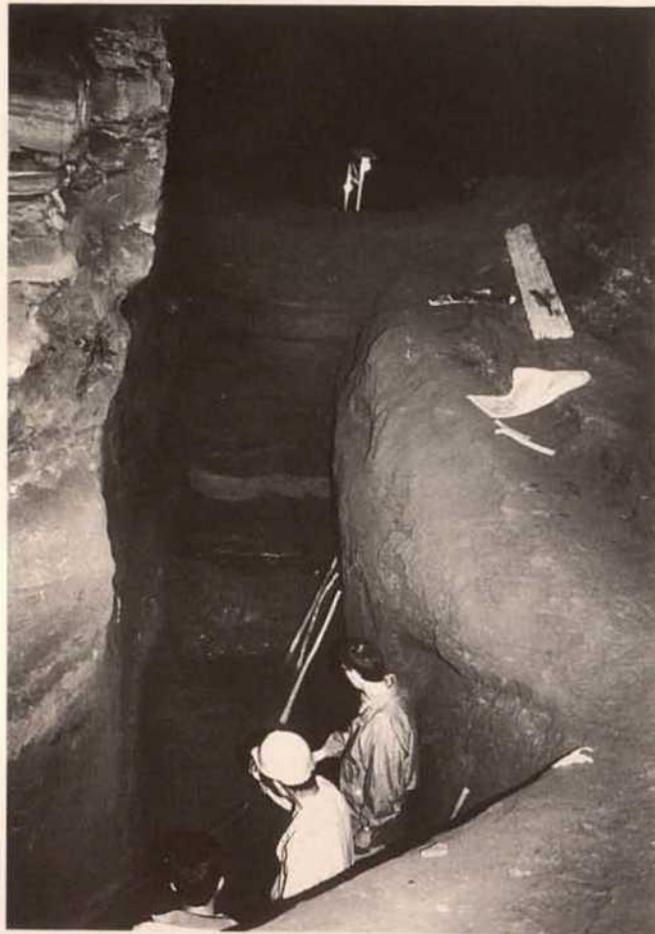
The endangered rocks in the first group are so badly weathered that they could collapse at any moment. They are so small that they cannot be stabilized. These rocks should be removed before the removal of the sediments.

The endangered rocks of the second group are large or belong partly to the statues. They must be stabilized before the conservation begins, so that the workers are not put at any risk. Steel clamps can be used as an initial stabilization for the heads of the Great Buddha and the eastern Bodhisattva (fig. 3, a and 4). A rock anchor should be used for a long-term stabilization. To stabilize the rock plates on the ceiling it is necessary to first of all support the rocks, remove the small rocks at risk and then finally fix the plates with rock anchors (Fig. 5. b and 6). Two methods can be used to stabilize the eastern Bodhisattva's foot (fig. 7).

The rocks at risk in the third group can be fixed with rock anchors to the ceiling of the grotto and above the western Bodhisattva. Figure 8 shows how the Wall of the Thousand Buddhas can be stabilized.

During the stabilization and the removal of the sediments the rocks at risk must be kept under surveillance. A stainless steel rock anchor must be used for the stabilization (fig. 10-12).

10



11



加固建议

第一类危岩已强裂风化，且处于十分危险状态，它们可能随时脱落。这部分危岩体积较小，不便加固，为此建议在洞窟加固之前先将其撬除。

第二类危岩体积较大，且多属佛像的一部分，则不能撬除，必须在洞窟维修之前进行加固。作为临时性加固，大佛的头部及东面大势至菩萨的头部建议采用骑马钉加固（图 3a, 图 4）；作为长期加固可采用岩石锚杆。加固窟顶岩板时，建议首先用支撑托住岩板，然

后撬除小块危岩，最后用岩石锚杆加固（图 5b, 图 6）图 7 中给了加固东面大势至菩萨底部的两种可供选择的方法。

位于窟顶及位于西面观世音菩萨顶部的第三类危岩，建议采用岩石锚杆加固；千佛壁的加固措施示于图 8。

在加固以及清淤的过程中建议对各部危岩进行监测。加固所用锚杆建议采用无化学作用的特种新型锚杆（见图 10 至 12）。

12

◁ Abb. 10, 11. Höhlentempel Dafosi während der Abtragung der Aufschüttung im Frühjahr 1996

Abb. 12. Fassade der Tempelanlage im Frühjahr 1996; das alte Bodenniveau am Eingangstunnel ist wieder freigelegt

◁ Fig. 10, 11. The Dafosi cave temple during removal of sediments in spring 1996

Fig. 12. Façade of the temple complex in spring 1996; the old ground level at the entrance tunnel is exposed again

◁ 图 10, 11. 大佛寺石窟窟内清淤工作, 1996 年春

图 12. 大佛寺石窟外视图, 1996 年春; 入口处已清理至原有之地表高度

