

## 中国秦汉彩绘保护的微生物学研究

### 引言

此项研究课题的目的在于,用化学的、物理的、微观的以及微生物学的方法,对施有彩绘的考古出土文物的老化机制进行研究,以便改进临潼秦始皇兵马俑彩绘和类似出土文物的保护技术。

对于保护临潼陶俑彩绘层来说,纯有机底色层的分解起着特殊的作用。彩绘层对湿度变化异常敏感,会剧烈地干缩和变形,由此已经造成了彩绘层的损失。因此,保护工作首先在于减缓干缩和加固彩绘层,同时必须检查随着湿度提高而在残片上聚集的微生物。几乎在临潼所有出土的材料上(陶俑、木材、粘土),都生长了微生物。尤其对保护陶俑彩绘来说,这是一个严重问题。因此,有必要确定微生物的种类、传播及活度,找出促使其生长的外在条件,制定控制霉害的措施,包括有目的地调节气候和进行相应的防霉处理。与此相关,还要分析有待进行的保护工作对微生物的生长所起的作用,是促进还是阻碍,并通过有目的地选择防霉剂,来减少微生物对要保护文物的危害。

如上所述,多层彩绘对外界环境影响十分敏感,研究中就要求使用的方法尽可能对文物不造成损坏。而在社会科学领域投入新技术,亦是本项自然科学研究的目标。对于微生物分析来说,在这种情况下,就要通过相应的培养技术和代谢生理学的方法(如 Rodac-翻贴法、腺苷三磷酸/荧光素酶测试、呼吸测量),尽可能对发掘的、以及修复实验室中的受微生物侵害的文物进行无损的分析,同时对各种抗霉处理的效果进行评估。

在这里阐述的微生物研究的第一年里,主要是弄清临潼发掘现场和修复车间的气候条件;了解中国同行迄今在微生物研究方面的成果,并针对挖掘中及已出土的陶俑残片上产生的霉害,调整迄今为止采取的保护和防霉措施。除此之外,还要借助上面提到的尽可能无损害的技术方法,对未做保护的和经过保护处理的残片、以及挖掘现场进行微生物研究。另外,针对防霉措施,还在挖掘现场和实验室设置了不同防霉剂的实验区。

### 现场巡视及考查

1998年5月17至26日,托马斯·瓦塞特先生参观了临潼的发掘现场和修复车间。访问期间,他与当地的科学工作者,其中包括化学家周铁先生、生物化学家严苏梅女士,以及化学家张志军先生、容波先生和何帆先生进行了交流。这些会谈为我们迅速了解发掘现场和陶俑残片的温、湿度及微生物方面的现状,提供了机会。对那些陶俑残片,迄今使用了各种方法进行了保护。

### 气候现状

临潼俑坑区域的潮湿危害问题,在以前的报告和研究中均有详细的报导。所使用的测量仪主要是机械式温湿度记录器;这些仪器是如何校准的,这些报告则很少提及,令人遗憾。由此我们可以这样说:迄今为止所获得的测量数据只有参考价值,特别是若凭自己的室内气候研究结果来判断的话,对测量地的选择和下准确的定义便显得尤其重要(见下)。

根据张志军先生(1991年)的报告,一号坑的温度在年周期内波动于 $-3^{\circ}\text{C}$ 至 $+30^{\circ}\text{C}$ 之间(波动幅度为 $6^{\circ}\text{C}$ ),相对空气湿度处于24%至88%之间(波动幅度为26%)。五月至九月的气候特别不利,这几个月的温度和相对空气湿度常常对微生物的生长,提供了有利条件(温度大于 $18^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度大于65%)。由于房间缺乏隔热,室内气候基本上受外界气候的影响,受到参观者带入的潮气和地面湿度的影响(没有防潮层,当然也没有明显地带入盐)。张志军先生认为,陶俑的材料湿度与其说是取决于空气湿度,毋宁说是取决于上升的地面湿度。他所做的干燥陶俑残片的吸水试验得出了这一结果:将残片浸入水中,吸水率为16%;将残片放在坑底地面上,吸水率为2.6%;放在离地面40厘米高处,吸水率只有0.2%。整个二号坑包括大厅的湿度明显地比一号坑的湿度



## Mikrobiologische Untersuchungen zur Erhaltung chinesischer Polychromien der Qin- und Han-Zeit

### *Microbiological examinations for the preservation of Chinese polychromy from the Qin and Han Dynasty*

#### Einleitung

Es ist das Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes, die Mechanismen der Alterung der polychrom gefaßten archäologischen Funde mit chemischen, physikalischen, mikroskopischen und mikrobiologischen Methoden zu erforschen. Damit sollen die Konservierungstechnologien für die Erhaltung der Farbfassungen auf den Tonkriegern der Terrakottaarmee des Ersten Chinesischen Kaisers Qin Shihuang in Lintong sowie vergleichbarer archäologischer Objekte verbessert werden.

Bei der Konservierung der Farbfassungen der Terrakottafiguren aus Lintong spielt die Zersetzung der rein organischen Grundierungsschicht eine besondere Rolle. Die Farbschicht ist extrem empfindlich gegenüber der Änderung des Feuchtegehalts und zeigt starke Trockenschwindung und Verformung. Dies hat bereits zu Verlusten der Fassungen geführt. Die Konservierung setzt daher an der Reduzierung des Trockenschwindens und der Festigung der Farbfassung an, wobei gleichzeitig die mit der hohen Feuchtigkeit einhergehende mikrobielle Besiedlung der Fragmente kontrolliert werden muß. Das Wachstum von Mikroorganismen auf praktisch allen Materialien der Ausgrabung (Terrakotta, Holz, Lehmerde) stellt insbesondere für die Erhaltung der Fassung der Terrakottafiguren ein extremes Problem dar. Aus diesem Grunde ist es notwendig, den mikrobiellen Befall in seiner Art, Ausbreitung und Aktivität zu bestimmen, die wachstumsförderlichen Expositionsbedingungen herauszustellen und befallskontrollierende Maßnahmen über eine gezielte Klimaregulierung sowie begleitende biozide Behandlungen zu entwickeln. In diesem Zusammenhang gilt es auch, die förderlichen wie hemmenden Auswirkungen der anstehenden Konservierungsarbeiten auf das Wachstum der Mikroorganismen zu analysieren und die mikrobielle Gefährdung der zu konservierenden Fundstücke durch eine gezielte Schutzmittelauswahl zu reduzieren.

Die oben geschilderte Sensibilität der polychromen Farbfassung gegenüber mechanischen Einflüssen erfordert die Anwendung weitgehend zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden, deren Evaluation und Applikation in Hinblick auf den Einsatz neuer Technologien in den Geisteswissenschaften als naturwissenschaftliches Ziel dieses Forschungsprojektes festgeschrieben wurde. Für die mikrobiologische Analyse gilt es in diesem Zusammenhang, über entsprechende kulturtechnische wie auch stoffwechselphysiologische Verfahren (d.h. Rodac-Abklatschverfahren, ATP/Luciferase-Test, Respirationsmessung) den mikrobiellen Befall an originalen Fundstücken in den Ausgrabungen sowie im Restaurierungslabor weitestmöglich zer-

#### Introduction

The aim of the research project presented here is to investigate the ageing mechanisms of the polychrome archaeological objects with chemical, physical, microscopic and microbiological methods. These methods have been employed to improve the conservation technology for the preservation of the polychromy of the terracotta army of the First Chinese Emperor Qin Shihuang as well as other comparable archaeological objects.

The decaying, organic ground layer has played a special role during the conservation of the polychromy of the terracotta sculptures. The paint layer is extremely sensitive towards changes in moisture content and shows drying shrinkage and deformation when too dry. This process has already led to losses of polychromy. For this reason the conservation focuses on the reduction of drying shrinkage and the consolidation of the polychromy. Furthermore, the microbial contamination of the fragments caused by high humidity must be controlled. The growth of microorganisms on almost all materials of the excavation (terracotta, wood, clay containing soil) represents a very complex problem, especially for the preservation of the polychromy on the terracotta soldiers. Therefore it is necessary to determine the taxonomy, distribution and activity as well as exposure conditions, which promote their growth. Furthermore it is important to develop climate-regulating measures together with biocide treatments that will help to control contamination. In connection with this it is necessary to analyze the promoting and inhibiting effects of the conservation materials on the growth of microorganisms. It is also necessary to reduce the danger of microbial contamination of objects to be treated by choosing the most suitable protective agent.

The described sensitivity of the polychromy towards mechanical influences requires the use of non-destructive-analysis methods whose evaluation and application with regard to the use of new technology in the arts was established as a scientific goal of this research project. In connection with this it is important that cultural techniques as well as metabolic-physiological methods (e.g. Rodac-impression plates, ATP-Luciferase-test, respiration measurement) are at disposal for non-destructive analysis of the microbial contamination on original objects at the excavation sites as well as the restoration laboratory. Furthermore the evaluation of different conservation treatments have accompanied this analysis.

The first year of the microbiological research work was spent with the examination of the present climatic exposure conditions



大。为了挖掘遗址的干燥，这儿正有规律地进行通风。据称，二号坑的气温在 20°C 左右，相对空气湿度在 60% 至 80% 之间，呈周期性的波动。它的湿气储量还要大于一号坑。但归根结底，二号坑还要进一步干燥。尽管二号坑空气湿度大，但从土隔梁上可清楚地看到，一旦粘土表面变干，这儿就会产生裂缝。这里还要提到，据中方专家告之，在三年之内，一号坑的材料湿度先从 19% 降到 5-10%，最后降至 2-5%，土隔梁的牢度受到威胁。根据克里斯托夫·赫尔姆博士 (1996 年) 的报告，不时有人给土隔梁浇水，同时试着用石灰水来加固。1997 年新的气候监测说明，五月至九月间，气温升高，相对空气湿度加大，这几个月对二号坑也特别不利。此期在土隔梁区 (即高离坑底 2 米处) 测到的数值最高，其数值随高度的增加而递减。遗憾的是，在现有的监测报告中，缺少挖掘坑最低处的补充气候数据。但根据我们的测量来看，气温经常超过露点，以致于形成冷凝湿度 (表 1)。为了更好地把握二号坑的湿度变化，未来要争取进一步对室内气候做全面监测，同时还要测量地下水位。

1991 年，三号坑的相对空气湿度值还位于 90-98% 之间 (根据周铁先生和张志军先生的测试)，夏季开始通风后，相对湿度降至 80%。可以发现空气湿度恒定，这大概是建筑具有良好的隔温性所致。现在大厅里相对干燥。在发掘不久的 1987 年，曾经报导过霉害，而今天已看不见沾染的痕迹。在坑壁上，可相应地找到很多干燥裂缝。

总之可以确定，假定所有俑坑不断干燥，其中一号坑 (大厅建于 1977 年) 是所有坑中最干燥的，其次是三号坑 (1987 年-89 年) 和二号坑 (1989 年-92 年)。这里还必须注意到，各大厅的建筑结构各异，其空气调节状况亦不相同。地下水位在今天地表下大约 15 米，其地势从西 (一号厅) 向东 (二号厅) 倾斜。一号坑的地面大约高出二、三号坑的地面 2 米，其中二号坑的地面最深。

## 微生物学研究

对二号坑进行的微生物学研究，迄今为止是由周铁先生和严苏梅女士进行的，二号坑当时的现状也拍照做过记录。从二号坑待挖掘地域和已挖掘出的陶俑身上，总共分离出 23 种不同的霉菌群，并在西安西北大学作了其分类鉴定。其中包括：*构巢曲霉*、*杂色曲霉*、*黑曲霉*、*米曲霉*、*黄曲霉*、*假灰绿曲霉*、*产黄青霉*、*弯角镰刀菌*、*圆弧青霉*、*桔青霉*、*郝克青霉*、*黑葡萄穗霉*、*黄珠瘤孢菌*、*腊叶芽枝霉*、*串珠镰刀菌*、*葡枝根霉*、*华根霉*、*少根根霉*、*绿色木梅*、*康宁木霉*、*粉红枯帚霉*、*互隔交链孢霉*、*宛氏拟青霉*。

对这些在实验室里培养的菌群，先后使用溶解于不同溶剂的各种杀菌剂进行了试验。按其使用的范围，共对八种不同杀菌剂作了实验。

对挖掘遗址表面/粘土的处理：

**TBZ (噻苯达唑)**：1-(4-噻唑基)-苯并咪唑。杀真菌剂；使用于食品保鲜；毒性  $LD_{50} > 5000 \text{ ppm} = \text{mg/kg}$ ，也就是说实际无毒；TBZ 在乙醇中最大溶解度为 0.6%。

**霉敌 (5 环用硫，6 环用氮- 置换于 p 位-  $LD_{50} < 2400 \text{ ppm} = \text{mg/kg}$ )**，低毒。

**BCM (多菌灵)**：甲基苯并咪唑-2-yl-氨基甲酸酯。杀真菌剂， $LD_{50} > 15000 \text{ ppm} = \text{mg/kg}$  鼠重量，也就是说实际无毒；使用浓度为 0.5-1.5%。

**W 800 (福美双)**：锌-二甲基-二硫氨基甲酸酯。杀真菌剂-杀藻剂； $LD_{50} < 1800 \text{ ppm} = \text{mg/kg}$  鼠重量，即低毒；农业化学剂；不溶于水；使用浓度为 1-3%；因含硫，故带有重金属颜料如铜、水银、铅染色的危险！

对残片的处理 (1996 年)：

**Preventol CMK (对-氯-间-甲酚)**。杀真菌剂-杀细菌剂； $LD_{50} < 1800 - 5000 \text{ ppm} = \text{mg/kg}$  鼠重量；即低毒；使用浓度 1%。

**Preventol DN (2 苯基苯酚钠)**。杀真菌剂-杀细菌剂； $LD_{50} < 1720 \text{ ppm} = \text{mg/kg}$  鼠重量，即低毒；使用浓度 2%。

加上另外两种杀生物剂 (也许是有机锡类)，但未作详细说明。

根据杀生物剂-过滤实验结果的分量，二号坑目前正在轮流 (而不是同时) 使用杀生物剂 TBZ (300 ppm  $TBZ = 3 \text{ mg/kg}$ ，溶剂不详) 和霉敌 (5000 ppm 霉敌 = 5 mg/kg，溶剂为水或 70% 乙醇)。在 1995 年和 1996 年各用过五次；在 1997 年使用过三次。通过处理，霉菌的生长虽然得到控制，但问题并未解决，在二号坑所有较深区域仍出现大量的微生物危害，个别地方从潮湿地域甚至长出担子菌 (Basidiomycet)。

除了使用杀生物剂，1998 年还天天在二号坑进行了通风，所有窗子从 8:30 到 17:30 都给打开。但这种做法是否能使空气充分流通并让二号坑达到保存文物所需的干燥程度，尚不清楚。

赫尔姆在 1996 年也曾提到，中国专家在 1981 年曾经试过，在一号坑地面加铺聚乙酸乙烯酯 (PVA) 以阻止霉菌的生长。在这里确实几乎见不到霉菌的形成。这一状况看来要归功于上面提到的干燥状况，干燥的结果使土隔梁的稳固性大大减弱。



störungsfrei zu analysieren und in Hinblick auf verschiedene Konservierungsbehandlungen begleitend bewerten zu können.

Im ersten Jahr der mikrobiologischen Forschungsarbeiten ging es um die Erstellung einer Bestandsaufnahme zu den klimatischen Bedingungen in den Ausgrabungen und Restaurierungswerkstätten in Lintong, den bisherigen Ergebnissen mikrobiologischer Untersuchungen der chinesischen Kollegen und den bisher durchgeführten konservatorischen wie bioziden Maßnahmen in Hinblick auf die mikrobielle Belastung in den Ausgrabungen und an den geborgenen Terrakottafragmenten. Darüber hinaus galt es, eigene mikrobiologische Untersuchungen an unbehandelten wie konservatorisch behandelten Fragmenten sowie in den aktuellen Ausgrabungen mit Hilfe der oben genannten, weitgehend zerstörungsfreien Verfahrenstechniken durchzuführen. In Hinblick auf die Empfehlung befallskontrollierender Maßnahmen wurden außerdem auch Musterflächen für verschiedene biozide Behandlungen in den Ausgrabungen sowie im Labormaßstab angelegt.

### Ortsbegehung und Bestandsaufnahme

Die Besichtigung der Gruben und Restaurierungslabors in Lintong durch Thomas Warscheid fand zwischen dem 17. und 26. Mai 1998 statt. Im Rahmen dieses Besuchs fanden auch Austauschgespräche mit den dortigen Wissenschaftlern, u. a. Herrn Zhou Tie, Chemiker, Frau Yan Sumei, Biochemikerin, sowie die Herren Zhang Zhijun, Rong Bo und He Fan, Chemiker, statt. Diese Gespräche erleichterten eine aktuelle Bestandsaufnahme der klimatischen und mikrobiologischen Situation in den Ausgrabungen sowie an den bisher unterschiedlich konservatorisch behandelten Terrakottafragmenten.

### Klimasituation

Frühere Reiseberichte und Untersuchungen gehen ausführlich auf das Problem der Feuchtebelastung in den Grabungsarealen in Lintong ein. Als Meßgeräte wurden und werden dabei hauptsächlich mechanische Thermohygrographen eingesetzt, über deren Kalibrierung in den vorliegenden Berichten leider wenig ausgesagt wird. Es ist daher davon auszugehen, daß die bislang registrierten Meßdaten nur Orientierungswerte darstellen, zumal – nach den eigenen raumklimatischen Untersuchungsergebnissen zu urteilen – die Auswahl und genaue Definition des Meßstandortes außerordentlich wichtig erscheint.

Nach dem Bericht von Zhang Zhijun (1991) schwankte die Temperatur in Grube 1 im Jahreszyklus zwischen  $-3^{\circ}\text{C}$  und  $+30^{\circ}\text{C}$  (Schwankungsbreite  $6^{\circ}\text{C}$ ). Die relative Luftfeuchtigkeit reichte hierbei von 24 bis 88% (Schwankungsbreite 26%). Besonders ungünstig zeigte sich das Klima in den Monaten zwischen Mai und September, in denen die Temperatur und die relative Luftfeuchte besonders häufig gute Bedingungen für das Wachstum von Mikroorganismen bot ( $>18^{\circ}\text{C}$  und  $>65\%$  rF). Das Raumklima steht aufgrund einer fehlenden Isolierung im wesentlichen unter dem Einfluß des Außenklimas, dem Feuchteeintrag über Besucher und der aufsteigenden Bodenfeuchte (keine Dampfsperre, allerdings auch kein auffälliger Salzeintrag). Zhang Zhijun nimmt an, daß die Materialfeuchte der Terrakotta mehr von der aufsteigenden Grundfeuchte als von der Luftfeuchtigkeit bestimmt wird: Dies haben seine Wasseraufnahmeversuche an getrockneten Terrakottafragmenten ergeben, wonach beim Einlegen der Fragmente in Wasser eine Aufnahme

at the excavations and the restoration workshops in Lintong. This also included studying the results of the microbiological investigations of the Chinese colleagues. The conservation work and biocidal treatment previously done with regard to the microbial contamination in the excavation sites and on terracotta fragments stored in the laboratory were also examined. Furthermore it was necessary to carry out our microbiological examinations with the above mentioned, to a large degree non-destructive analytical techniques on untreated and treated fragments including the present excavation sites. With regard to contamination controlling measures a number of smaller test-surfaces were prepared at the excavation sites and in the laboratory.

### Site inspection and registering existing conditions

The inspection of the pits and the restoration laboratories in Lintong by Thomas Warscheid took place between 17 and 26 May 1998. During this visit there was the opportunity to exchange information with the scientists such as the chemist Zhou Tie, the biochemist Yan Sumei as well as the chemists Zhang Zhijun, Rong Bo and He Fan. These talks made it easier to register the present climatic and microbiological situation at the excavations. They were also useful for the examination of the terracotta fragments which until then had been treated in different ways.

### Climate situation

Reports of previous journeys and examinations give a detailed description of the moisture strain in the excavation areas of Lintong. The measuring instruments which mainly were and still are used, are mechanical hygrothermometers. Unfortunately there is little information on the calibration of these instruments in the reports at hand. That is why the data from measurements taken until now only give a general idea. Judging from our own interior climate investigation results the choice and exact definition of the measuring site seems to be very important.

According to the report from Zhang Zhijun (1991) the temperature in pit no. 1 fluctuated throughout the year between  $-3^{\circ}\text{C}$  and  $30^{\circ}\text{C}$  (variation  $6^{\circ}\text{C}$ ). The relative humidity reached levels of 24 to 88% (variation 26%). The climate was especially unfavorable from May to September during which the temperature and the relative humidity were ideal for the growth of microorganisms ( $>18^{\circ}\text{C}$  and 65% rh). Due to a missing climate isolation barrier this room is greatly influenced by the climate outside, the moisture brought in by visitors and the rising ground moisture (no vapour barrier and also no noticeable salt transfer). Zhang Zhijun assumes that the moisture content of the terracotta is more influenced by the rising ground moisture than the air humidity. This was proven by his water absorption tests on dried terracotta fragments. The fragments in water absorbed up to 16%, on the ground they absorbed 2,6% water and 40 cm above ground level only 0,2%.

The whole site of pit no. 2 including the climate inside the hall has a considerably higher moisture content than pit no. 1. Here an attempt is being made to dry out the excavation site through constant air circulation. According to verbal information the temperature in pit no. 2 is approximately  $20^{\circ}\text{C}$  and the relative humidity fluctuates periodically between 60% and 80% rh. The moisture reservoir is still larger than in pit no. 1, but a drying out similar to pit no. 1 is expected. Despite the high humid-



Standort <i>location</i> 地点	Temperatur <i>temperature</i> 温度 [°C]	Luftfeuchtigkeit (rF) <i>humidity (RH)</i> 湿度 [%]	Taupunkt <i>dew point</i> 露点 [°C]	Oberflächentemp. <i>surface temp.</i> 表面温度 [°C]
<b>Labor / Laboratory / 实验室</b>				
Raum <i>room</i> 室内	23.0	54.0	12.9	—
Schublade <sup>1</sup> <i>drawer<sup>1</sup></i> 抽屉 <sup>1</sup>	22.8	53.1	13.1	23.0
<b>Grube 2 / Pit No. 2 / 二号坑</b>				
T21 <sup>2</sup> , Nordost-Ecke, Bodennähe <i>north-eastern part, near ground</i> 东北角, 近地面	20.8 (Lampe / lamp / 灯) <sup>3</sup>	95.6	19.4	—
T21, Luft (1 m Höhe) <i>air (height: 1 m)</i> 空气 (1米高处)	21.0 (Lampe / lamp / 灯) <sup>3</sup>	87.6	18.4	—
T8, nördlicher Teil der Grube, Bodennähe <i>northern area of the pit, near ground</i> 坑的北面部分, 近地面	17.7	100.0	17.7	17.7
T8 nördlicher Teil der Grube, Luft (1 m Höhe) <i>northern area of the pit, air (height: 1 m)</i> 坑的北面部分, 空气 (1米高处)	20.9 (Lampe / lamp / 灯) <sup>3</sup>	81.2	17.4	—
T8 nördlicher Bereich, Höhe des Erdsteges (ca. 2 m) <i>northern part, height of partition wall (c. 2 m)</i> 土隔梁的高度 (约2米)	19.2	79.7	18.5	—
1. Umgang, nördlicher Bereich (Höhe ca. 5 m) <i>First viewing path, northern part (height c. 5 m)</i> 北部第一处参观者通道 (高度约5米)	20.7 (Lampe / lamp / 灯) <sup>3</sup>	73.9	15.4	—
2. Umgang, nördlicher Bereich (Höhe ca. 8 m) <i>Second viewing path, northern part (height c. 8 m)</i> 北部第二处参观者通道 (约8米)	21.2	57.0	14.0	—
<sup>1</sup> Schublade zur Aufbewahrung der konservierten Fragmente <i>drawer used to store the consolidated fragments</i> 抽屉, 用以存放保护后的残片 <sup>2</sup> T = Grabungssektoren (20 x 20 m, die Zählung beginnt in der südwestlichen Ecke der Grube) <i>T = excavation sectors (20 x 20 m; the numbers start at the south western corner of the pit)</i> T = 挖掘方 (20 x 20 m, 从坑的西南角开始数) <sup>3</sup> Lampe: Beleuchtung für die Archäologen bzw. Besucher, ca. 1 m über dem Boden <i>lamp: Lighting for the archaeologists and visitors, c. 1 m over the ground</i> 灯光: 为考古学家和参观者提供照明, 高于地面约一米				

Tab. I. Ergebnisse der Klimamessungen im Museum der Terrakottarmee, Lintong, Mai 1998

Tab. I. Results of climate measurements in the Museum of the Terracotta Warriors and Horses, Lintong, May 1998

表1. 临潼秦俑博物馆气候监测结果, 1998年5月



von 16%, beim Aufliegen auf den Grubenboden von 2,6% und 40 cm über dem Grubenboden von lediglich 0,2% festzustellen war.

Die gesamte Anlage der Grube 2 einschließlich des Raumklimas in der Halle ist wesentlich feuchter als in Grube 1. Es wird hier versucht, die Austrocknung der Ausgrabung über eine regelmäßige Lüftung zu unterstützen. Nach mündlichen Angaben liegen die Temperaturen in Grube 2 um 20° C, die Luftfeuchte schwankt periodisch zwischen 60 und 80% rF. Noch ist das Feuchtereservoir größer als in Grube 1, doch in letzter Konsequenz ist auch hier eine ähnliche Austrocknung zu erwarten. Trotz der hohen Luftfeuchte in Halle 2 war an den Laufstegen für die Archäologen deutlich zu sehen, daß Risse entstehen, sobald der Lehm oberflächlich getrocknet ist. Dazu sei angemerkt, daß in Grube 1 nach mündlichen Angaben die Materialfeuchte innerhalb von drei Jahren von 19% über zwischenzeitlich 5-10% bis hin zu 2-5% gesunken ist. Die Stabilität der Erdstege wird durch die Austrocknung bedroht. Nach Angaben von Dr. Christoph Herm (1996) werden die Erdstege von Zeit zu Zeit gewässert und dabei versuchsweise mit Hilfe von Kalkwasser gefestigt. Neuere Klimauntersuchungen aus dem Jahre 1997 unterstreichen, daß auch in Grube 2 die Monate zwischen Mai und September als besonders ungünstig in Hinblick auf erhöhte Temperaturen und eine erhöhte relative Luftfeuchtigkeit gelten müssen. Dabei liegen die höchsten Meßwerte im Bereich der Erdstege (d. h. bis ca. 2 m über dem Boden der Grube), während sie mit zunehmender Raumhöhe abnehmen. Leider fehlen in den vorliegenden Meßreihen ergänzende Klimadaten aus den tiefsten Bereichen der Ausgrabung. Hier scheint nach eigenen Messungen der Taupunkt wesentlich häufiger unterschritten zu werden, so daß Kondensationsfeuchtebildung auftritt (Tab. 1). Um den Feuchtigkeitshaushalt der Grube 2 besser verstehen zu können, werden weitere umfassende Klimamessungen sowie eine Bestimmung des Grundwasserspiegels für die Zukunft angestrebt.

Die Werte der relativen Luftfeuchte in Grube 3 lagen 1991 noch bei 90-98%. In den Sommermonaten sank dabei die rF mit Beginn der Lüftungszeiten auf 80% ab. Die dabei festzustellende Konstanz der Luftfeuchtigkeit erklärt sich vermutlich aus der guten Isolierung des Gebäudes. Heute wirkt die Halle relativ trocken. Während kurz nach der Ausgrabung 1987 von Schimmelbefall berichtet wurde, findet sich heute keine sichtbare Kontamination mehr. Entsprechend sind zahlreiche Trockenrisse an den Wänden der Grube zu finden.

Insgesamt läßt sich festhalten, daß unter der Annahme einer fortschreitenden Austrocknung in allen Gruben Grube 1 (Errichtung der Halle 1977) die trockenste ist, gefolgt von Grube 3 (1987-89) und Grube 2 (1989-92). Hierbei müssen die unterschiedlichen Konstruktionen der Hallen und deren Klimatisierung in Betracht gezogen werden. Der Grundwasserspiegel liegt etwa 15 m unter dem heutigen Geländeniveau, das von Westen (Halle 1) nach Osten (Halle 2) abfällt. Die Grube 1 liegt im Bodenniveau ca. 2 m höher als die Gruben 2 und 3, der Boden der Grube 2 liegt insgesamt am tiefsten.

#### Mikrobiologische Untersuchungen

Die bisherigen mikrobiologischen Untersuchungen in Grube 2 wurden von Herrn Zhou Tie und Frau Yan Sumei durchgeführt. Dabei wurde der Zustand der Grube auch photographisch dokumentiert. Aus dem anstehenden Erdreich und von den freigelegten Tonkriegeren der Grube 2 wurden insgesamt 23 verschiedene

ity in pit no. 2 distinct cracks occurred on the catwalks for the archaeologists as soon as the clay surface had dried. Furthermore it must be noted that in pit no. 1 the material moisture content sank from 19% to 2-5% in three years. Through the moisture reduction the soil partition walls had become increasingly instable. According to Christoph Herm (1996) the partition walls are sprinkled with water from time to time. At the same time they have been stabilized with lime water as an experimental measure. Recent climate measurements from 1997 also showed that from May to September the temperature and relative humidity increased in pit no. 2. According to this information the highest measurements were recorded at the level of the partition walls (this means up to 2 meters above the ground of the pit) whereas the values dropped the higher the measurements were taken. Unfortunately there is no data on these measurements from the lowest areas of the excavation sites. Here the temperature and relative humidity often seem to be below the dew point so that condensation occurs (tab. 1). In order to understand the moisture conditions in pit no. 2 further extensive climate measurements as well as the determination of the ground-water level are planned for the future.

In 1991 the values of relative humidity in pit no. 3 still had been about 90-98%. In the summer months the relative humidity dropped to 80%. The determined constancy of the relative humidity can be explained by the good isolation of the building. Today the hall appears to be relatively dry. Although fungal contamination was reported shortly after the excavations in 1987 there seems to be no visible contamination today. At the same time there are a number of visible cracks on the walls of the pit.

Assuming that the drying out of all pits is taking place it has been noted that pit no. 1 (construction of hall in 1977) is the driest followed by pit no. 3 (1987-89) and pit no. 2 (1989-92). Here the different hall constructions and their climate conditions have to be taken into consideration. The ground-water level is located c. 15 meters under the present level of the site that slopes from the west (hall 1) to the east (hall 2). The ground level of pit no. 1 is approximately 2 m higher than pits 2 and 3 whereas the ground of pit no. 2 is the deepest.

#### Microbiological examinations

The microbiological examinations that were carried out until now in pit no. 2 were done by Zhou Tie and Yan Sumei. The condition of the pit was also documented photographically. A total of 23 different fungi species were isolated from the surrounding soil and the excavated terracotta soldiers of pit no. 2. Their taxonomical determination was carried out at the Northwest University in Xian. They are: *Aspergillus nidulans*, *Aspergillus versicolor*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryza*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus pseudoglaucus*, *Penicillium chrysogenum*, *Fusarium camptoceras*, *Penicillium cyclopium*, *Penicillium citricum*, *Penicillium herguei*, *Stachybotrys atra*, *Sepedonium chrysospermum*, *Cladosporium herbarum*, *Fusarium moniliforme*, *Rhizopus stolonifer*, *Rhizopus arrhizus*, *Rhizopus chinensis*, *Trichoderma viride*, *Trichoderma koningii*, *Gliocladium roseum*, *Alternaria alternata*, *Paecilomyces varioti*.

Tests with various fungicides in different solvents were carried out on the cultivated cultures in the laboratory. According to the field of application a total of eight different fungicides were tested.

For the treatment of the excavation surfaces / clay soil:



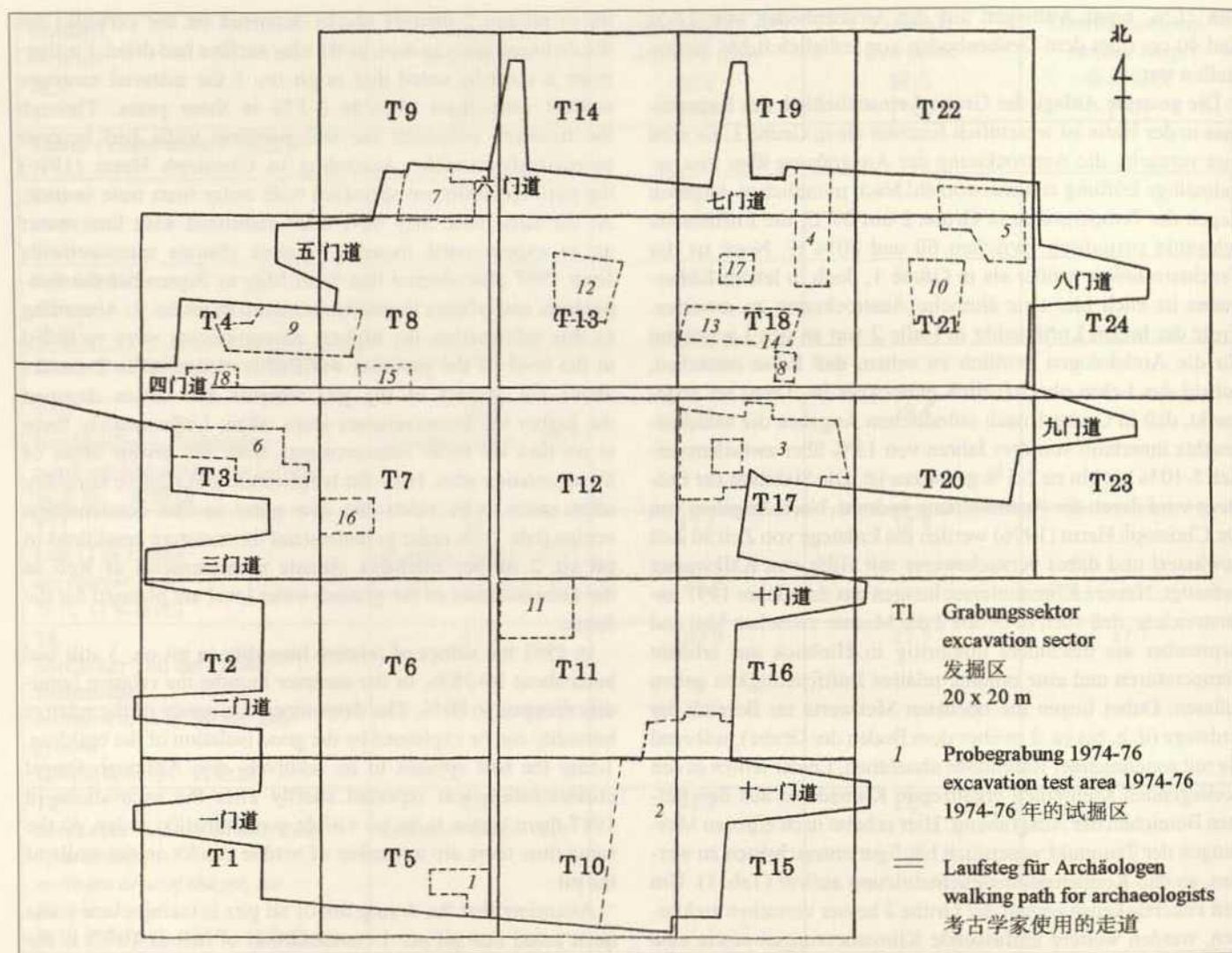


Abb. 1. Grundriß der Grube 2 mit Einteilung in Grabungssektoren (T1 - T24) und Probegrabungen bis 1998

Fig. 1. Layout of pit no. 2, with grid of the excavation sectors (T1 - T24) and test areas of excavation before 1998

图 1. 二号坑 T1-T24 探方和截至 1998 年试掘方的平面分布图

## 取样和设置试验区

微生物研究的对象既包括近年来保护过的带彩绘的陶俑残片, 也包括二号坑北部 8 号挖掘方的土隔梁和陶体表面 (陶俑、铺地砖)。在这儿设置了杀生物剂试验区 (彩图 XXI, 5), 并在实验室蛭石碗里, 以缩小的比例对这一试验区作了模拟 (彩图 XXI, 6)。

## 对保护过的彩绘残片的研究

在临潼进行的微生物研究中, 曾对保护彩绘的各种保护措施的效果、以及后来存放中发生微生物侵袭的情况作了示范分析。共对下列陶俑残片进行了微生物研究: F 002-1996, F 003-1996, F 004-1996, F 006-1996 以及 F 008-1996 (彩图 XXI, 1-4)。

## 对二号坑挖掘方的微生物研究

在本文作者访问期间, 二号坑的挖掘工作主要集中在东北角的 18 号和 21 号方 (图 1)。在东部 21 号方, 直接在坑壁挖出较大一块面积, 直通坑底, 以前在这个方也设置了试验区, 但面积较小。一部分陶俑在这儿还处于发现时的状态。尽管能感觉到气候潮湿, 但在东北区只发现了少量霉害。在二号坑西北部以前发掘的 17 号和 20 号方里, 地上大面积、残破的陶俑上以及土隔梁上长满了霉菌, 尤其严重的是在棚木层以下的挖掘区 (图 2)。大面积霉菌散发出潮湿的霉味。根据周铁先生的照片记录, 霉菌在一定时期内甚至爬到较高位置的走道壁。这里所报道的微生物研究和试验区试验, 就是在这些区域中进行的。据何帆先生报道, 就连大厅墙壁的上部及展厅的顶部也出现了大量



Schimmelpilzstämme isoliert, deren taxonomische Bestimmung an der Nordwest-Universität in Xian erfolgte. Festgestellt wurden: *Aspergillus nidulans*, *Aspergillus versicolor*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryza*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus pseudoglaucus*, *Penicillium chrysogenum*, *Fusarium camptoceras*, *Penicillium cyclopium*, *Penicillium citricum*, *Penicillium hergei*, *Stachybotrys atra*, *Sepedonium chrysospermum*, *Cladosporium herbarum*, *Fusarium moniliforme*, *Rhizopus stolonifer*, *Rhizopus arrhizus*, *Rhizopus chinensis*, *Trichoderma viride*, *Trichoderma koningii*, *Gliocladium roseum*, *Alternaria alternata*, *Paecilomyces varioti*.

An den im Labor gezüchteten Kulturen wurden Versuche mit verschiedenen Fungiziden in unterschiedlichen Lösemitteln durchgeführt. Insgesamt wurden dabei acht verschiedene Fungizide je nach Einsatzgebiet getestet.

Für die Behandlung der Ausgrabungsflächen/Lehmerde: TBZ (Thiabendazol): 1-(4-Thiazolyl-)benzimidazol. Fungizid; wird in der Lebensmittelkonservierung eingesetzt; LD<sub>50</sub> > 5 000 ppm = mg/kg, d. h. praktisch nicht toxisch; in Ethanol lösen sich maximal 0,6 % TBZ;

Meidi (chin. „Schimmelfeind“): 5-Ring mit Schwefel und 6-Ring mit Stickstoff – substituiert in para-Stellung. LD<sub>50</sub> < 2 400 ppm = mg/kg, d. h. leicht toxisch;

BCM (Carbendazim): Methylbenzimidazol-2-yl-carbamate. Fungizid, LD<sub>50</sub> > 15 000 ppm = mg/kg Ratte, d. h. praktisch nicht toxisch; Einsatzkonzentration 0,5-1,5 %;

W 800 (Thiram): Zn-Dimethyl-Dithiocarbamat. Fungizid-Algizid; LD<sub>50</sub> < 1 800 ppm = mg/kg Ratte, d. h. leicht toxisch; Agrochemikalie; wasserunlöslich; Einsatzkonzentration 1-3 %; Verfärbungsgefahr mit Schwermetallen aus Pigmenten wie Kupfer, Quecksilber und Blei, da schwefelhaltig.

Für die Behandlung der Fragmente (1996):

Preventol CMK (p-Chlor-m-Kresol). Fungizid-Bakterizid; LD<sub>50</sub> < 1 800-5 000 ppm = mg/kg Ratte, d. h. leicht toxisch; Einsatzkonzentration 1 %;

Preventol ON (Natrium-2-phenylphenolat). Fungizid-Bakterizid; LD<sub>50</sub> < 1 720 ppm = mg/kg Ratte, d. h. leicht toxisch; Einsatzkonzentration 2 %;

sowie zwei weitere, nicht näher beschriebene Biozide (evtl. auf zinnorganischer Basis).

Nach Maßgabe der Ergebnisse des Biozid-Filtertests befinden sich aktuell in der praktischen Anwendung in Grube 2 abwechselnd (nicht gleichzeitig) die Biozide TBZ (3 000 ppm TBZ = 3 mg/kg, Lösungsmittel nicht bekannt) und Meidi (5000 ppm Meidi = 5 mg/kg Lösungsmittel Wasser bzw. 70 % Ethanol). In den Jahren 1995 und 1996 wurden je fünf Anwendungen durchgeführt; im Jahr 1997 fanden drei Anwendungen statt. Durch die Behandlung wird das Schimmelpilzwachstum zwar kontrolliert, das Problem jedoch nicht gelöst, d. h. massiver mikrobieller Befall tritt weiterhin an allen tiefergelegenen Bereichen der Grube 2 auf. Stellenweise wachsen sogar Ständerpilze (Basidiomyceten) aus dem feuchten Erdreich.

Neben dem Einsatz von Bioziden erfolgte 1998 täglich eine Belüftung der Grube 2 in der Form, daß alle Fenster im Zeitraum von 8.30 Uhr bis 17.30 Uhr geöffnet wurden. Ob dieses Vorgehen allerdings zu einem ausreichenden Luftaustausch und damit zu einer konservatorisch vertretbaren Austrocknung der Grube 2 führt, ist noch unklar.

Von Christoph Herm werden 1996 auch Versuche der chinesischen Experten aus dem Jahre 1981 erwähnt, das Schimmelpilzwachstum durch eine Beschichtung des Erdreichs in Grube 1 mit Polyvinylacetat (PVA) zu unterbinden. Schimmelpilzbil-

TBZ (thiabendazol): 1-(4-thiazolyl-)benzimidazol. Fungicide; is applied in food preservation; LD<sub>50</sub> > 5 000 ppm = mg/kg, i.e. practically not toxic; maximum solubility in ethanol 0,6 % TBZ;

Meidi (Chinese for “enemy of mould”): 5-ring with sulphur and 6-ring with nitrogen, which is substituted in para-position: LD<sub>50</sub> < 2 400 ppm = mg/kg, i.e. slightly toxic;

BCM (carbendazim): methylbenzimidazol-2-yl-carbamate. Fungicide, LD<sub>50</sub> > 15 000 ppm = mg/kg rat i. e. practically not toxic; concentration for application 0,5-1,5 %;

W 800 (thiram): Zn-dimethyl-dithiocarbamate; fungicide-algicide; LD<sub>50</sub> < 1 800 ppm = mg/kg rat, i.e. slightly toxic; agricultural chemical; insoluble in water; concentration for application 1-3 %; danger of discoloration with heavy metals from pigments such as copper, mercury and lead due to sulphur content.

For the treatment of the fragments (1996):

Preventol CMK: p-chloride-m-kresol; fungicide-bactericide; LD<sub>50</sub> < 1 800-5 000 ppm = mg/kg rat, i.e. slightly toxic; concentration for application 1 %;

Preventol ON: sodium-2-phenolate; fungicide-bactericide; LD<sub>50</sub> < 1 720 ppm = mg/kg rat, i.e. slightly toxic; concentration for application 2 %;

as well as two further biocides, which have not been described (possibly on tin-organic base).

According to the results of the biocide filter tests the biocides TBZ (3 000 ppm TBZ = 3 mg/kg solvent unknown) and Meidi (5 000 ppm Meidi = 5 mg/kg solvent water or 70 % ethanol) are being applied at the moment. Five applications of each biocide were carried out in 1995 and 1996 and three in 1997. Through the treatment the fungi growth could be controlled but the problem could not be solved completely. Massive fungi growth is still occurring on all lower situated areas of pit no. 2. In some places there are even basidiomycetes growing out of the moist ground.

Besides the application of biocides a ventilation of pit no. 2 was also carried out in 1998. This means that all the windows were opened between 8:30 am and 5:30 pm. It is doubtful whether this action will lead to a sufficient air exchange and drying-out of pit no. 2 which is justifiable from a conservation point of view. The reasons for this are the small size of the windows and their unfavourable positions as well as the depth of the excavations.

In 1996 Christoph Herm also mentioned that Chinese colleagues had performed tests in 1981 where they tried to stop the fungal growth in pit no. 1 by coating the ground with polyvinyl acetate (PVAC). The growth of fungi here has indeed almost completely stopped. The inhibition of the growth seems to be caused by the drying out of the pit, in which the partition walls have become dramatically unstable.

### Sampling and test surface arrangements

The microbiological examinations were carried out on fragments and their polychromy, which had been consolidated during the past few years, as well as on partition walls and terracotta surfaces (terracotta soldiers, floor bricks) in the northern excavation sector T 8 of pit no. 2. There, a biocide test surface sample area (col. pl. XXI, 5) was arranged. A test on a smaller scale was simulated in vermiculite trays in the laboratory (col. pl. XXI, 6).



的霉害，这种霉害会对挖掘产生何种污染，对此通过研究空气菌落进行了分析。

对微生物的调查，集中在二号坑西北角 8 号方的一块试验区，这个试验区在几年前已经发掘建立。这里整个面直至棚木的高度都长满了成片厚厚的霉斑。地面的相对空气湿度接近 100 %rF，周围环境的温度为 19°C，而露点大约低于环境温度 0.2°C (见表 1)。在参观区下面探照灯照射的区域里，陶俑表面上长满了绿色斑点。尽管这里光线微弱，但明显生长着光合微生物 (推测是蓝细菌 Cyanobakterien)；据报道，为加固一号坑的土隔梁曾喷洒了含量为 20 % 的硅酸钾溶剂，在此之后，那儿也长过绿藻。显而易见，表面变色是生霉所致。

## 研究

### 气候监测

在进行微生物研究的同时，用电子测量仪“Testo 635”对所有采样地点的气候条件 (室内温度、空气湿度、露点及表层温度) 进行了测试。

### 微生物研究

对二号坑的陶俑残块、土隔梁和陶俑表面 (M) 的霉菌培养是通过 Rodac-复压法，依靠专门对异位的 (即使用有机养料的) 微生物如菌类、细菌、放线菌的培

Abb. 2. Weißlicher Schimmelbefall in einer der Probegrabungen in Grube 2, Situation im Juni 1998

Fig. 2. Whitish fungal contamination in one of the excavation areas of pit no. 2, situation in June 1998

图 2. 二号坑的一个试掘方所生的白霉，1998 年 6 月的情景





dung ist hier in der Tat kaum mehr zu beobachten. Dieser Umstand scheint sich jedoch eher der oben erwähnten Austrocknung zu verdanken, in deren Folge auch die Instabilität der Erdstege dramatisch zugenommen hat.

### Probenahme und Musterflächenanlage

Die mikrobiologischen Untersuchungen erfolgten sowohl an Fragmenten, deren Farbfassung in den vergangenen Jahren konserviert wurde, als auch an Erdstegen und Terrakottaoberflächen (Tonkrieger, Bodenziegel) in Grube 2 im nördlichen Ausgrabungssektor T 8. Dort erfolgte auch die Anlage einer bioziden Musterfläche (Farbtaf. XXI, 5), die zudem in kleinerem Maßstab im Labor in Vermikulit-Schalen simuliert wurde (Farbtaf. XXI, 6).

### Untersuchung der Fragmente mit konservierter Farbfassung

Die Wirkung verschiedener Konservierungsmaßnahmen zur Erhaltung der Farbfassung und der späteren Lagerung auf den mikrobiellen Befall wurde im Rahmen der mikrobiologischen Arbeiten in Lintong exemplarisch analysiert. Folgende Terrakottafragmente wurden dieser mikrobiologischen Untersuchung unterzogen: F 002–1996, F 003–1996, F 004–1996, F 006–1996 und F 008–1996 (Farbtaf. XXI, 1-4).

### Mikrobiologische Untersuchungen in der Ausgrabung in Grube 2

Zum Zeitpunkt des Besuchs konzentrierten sich die Ausgrabungsaktivitäten in Grube 2 vorwiegend auf die nordöstliche Ecke in den Sektoren T 18 und 21 (Position der Grabungssektoren: siehe Abb. 1). Im östlichen Bereich von Sektor T 21 war direkt an der Grubenwand ein größeres Feld bis auf den Boden der Grube freigelegt; kleinere Testfelder waren in diesem Sektor schon früher freigelegt worden. Die Tonkrieger liegen hier z. T. noch in Fundsituation. Obwohl man die feuchte Atmosphäre fühlt, war hier noch wenig Schimmelbildung zu beobachten. In den bereits früher ausgegrabenen Probegrabungen im nordwestlichen Teil der Grube 2 in den Sektoren T 17 und 20 überziehen massive Schimmelpilzkulturen große Bodenflächen, zerbrochene Figuren und die Erdstege, insbesondere dort, wo unter das Niveau der Deckenbalken ausgegraben wurde (Abb. 2). Ein feucht muffiger Geruch begleitet den flächendeckenden Schimmelbefall, der sich nach der photographischen Dokumentation von Herrn Zhou Tie zeitweise sogar an den Wänden der höher gelegenen Laufstege hochzieht; an einem der Erdstege wurden die hier dokumentierten mikrobiologischen Untersuchungen und Musterflächenanlagen durchgeführt. Herr He Fan berichtet, daß auch im oberen Teil der Hallenwände und an der Decke der Ausstellungshalle ein erheblicher Schimmelbefall aufgetreten sei; die Auswirkungen dieses Befalls für die Kontamination der Ausgrabung wurde im Rahmen einer Luftkeimuntersuchung analysiert.

Die mikrobiologischen Untersuchungen konzentrierten sich auf ein schon seit einigen Jahren ausgegrabenes Testfeld im Sektor 8 in der nordwestlichen Ecke der Grube 2. Sämtliche Oberflächen sind hier bis auf die Höhe der Deckenbalken deutlich mit Schimmel überzogen. Die Luftfeuchte beträgt am Boden annähernd 100% rF wobei der Taupunkt ca. 0,2° C unter der Umgebungstemperatur von 19° C liegt (Tab. 1). In den von den Scheinwerfern unterhalb des Besucherumgangs beleuchteten Bereichen sind die Oberflächen der Terrakottafiguren mit

### Examination of fragments with preserved polychromy

The effect of various conservation methods for the preservation of the polychromy and the effect of the following storage on the microbial contamination was analysed in an exemplary way during the microbiological work in Lintong. The following terracotta fragments were examined for this purpose: F 002–1996, F 003–1996, F 004–1996, F 006–1996 and F 008–1996 (col. pl. XXI, 1-4).

### Microbiological examinations at the excavation site of pit no. 2

During the visit the excavation activities in pit no. 2 were mainly concentrated in the north-eastern corner of sector T 18 and 21 (see fig. 1). In the eastern section of sector T 21 a larger area situated directly on the pit wall was uncovered all the way down to the ground. Smaller test areas had already been excavated at an earlier time. In these areas the terracotta figures are still in the exact position where they had been found. Although the moist atmosphere is very noticeable there was almost no fungal contamination in that area. In earlier excavated test areas in the north-western part of pit no. 2 (sector T 17 and 20) there is a large contamination covering the ground, the broken sculptures and the partition walls. The contamination is especially serious in the areas where excavations have been carried out below the level of the ceiling beams (fig. 2). A damp musty odour accompanies the mould infested areas, which, according to the photographic documentation of Zhou Tie, temporarily spreads up the walls of the catwalks. On one of these contaminated partition walls the microbiological examinations and test surface area arrangements described in this article were carried out. He Fan reports that a severe contamination in the upper section of the hall walls and on the ceiling of the exhibition hall has occurred. The effect of this contamination on the fungi-infested excavation sites was analysed within measurements of air-borne microorganisms.

The microbiological examinations concentrated on one test area in sector 8 in the north-western corner of pit 2, which had been excavated a few years earlier. All surfaces are thickly covered with fungi to the level of the ceiling beams. The humidity on the ground reaches almost 100% rh whereas the dew point temperature was approximately 0.2° C below the surrounding temperature of 19° C (table 1). In the areas under the visitor's viewing paths, which are illuminated with spot lights, the surfaces of the terracotta figures are covered with green spots as well as larger green areas. In spite of the minimal light incidence there are photosynthetic microorganisms (possibly cyanobacteria) growing here. The growth of green algae was also reported in pit no. 1 after the unstable soil partition walls had been consolidated with a 20% potassium water glass solution. The surface discoloration is clearly caused by microbial contamination.

### Investigations

#### Climate measurements

The microbiological investigations were accompanied by climate measurements (room temperature, humidity, saturation temperature and surface temperature) carried out with the electronic measuring instrument 'Testo 635'.



培养基来进行的 (图 3)。在实验室用螺旋喷仪 (spiral plater), 可了解取自挖掘区的两块黄土样的微生物的富集数目。另外, 对二号坑空气菌落也作了初步测定 (LK)。为研究材料而在当地使用的培养基有如下各种: Czapek-Dox (CzD), 针对寡营养(即能适应养料贫瘠地区)的菌; Bunt & Rovira (BR), 针对寡营养的细菌; 甘油-硝酸-酪蛋白(GNC), 针对放线菌; BG11, 针对光合的藻类和氰细菌(仅在二号坑)。另外, 在二号坑使用了专门的媒介, 以证实微生物酸的形成 (碳酸盐-琼脂), 黑素-色素形成 (PIA), 金属氧化作用 (BF-Mn 和 BF-Fe)。

在黄土样的菌量培养中还扩大了培养基谱, 以便证实硝化作用的细菌(BNM/BNB), 旱生(即喜欢干燥的)菌 (DG18), 富营养(即能适应养料丰富地区的)菌 (芽琼脂), 酵母菌(Sabouraud-琼脂; SAB), 以及富营养

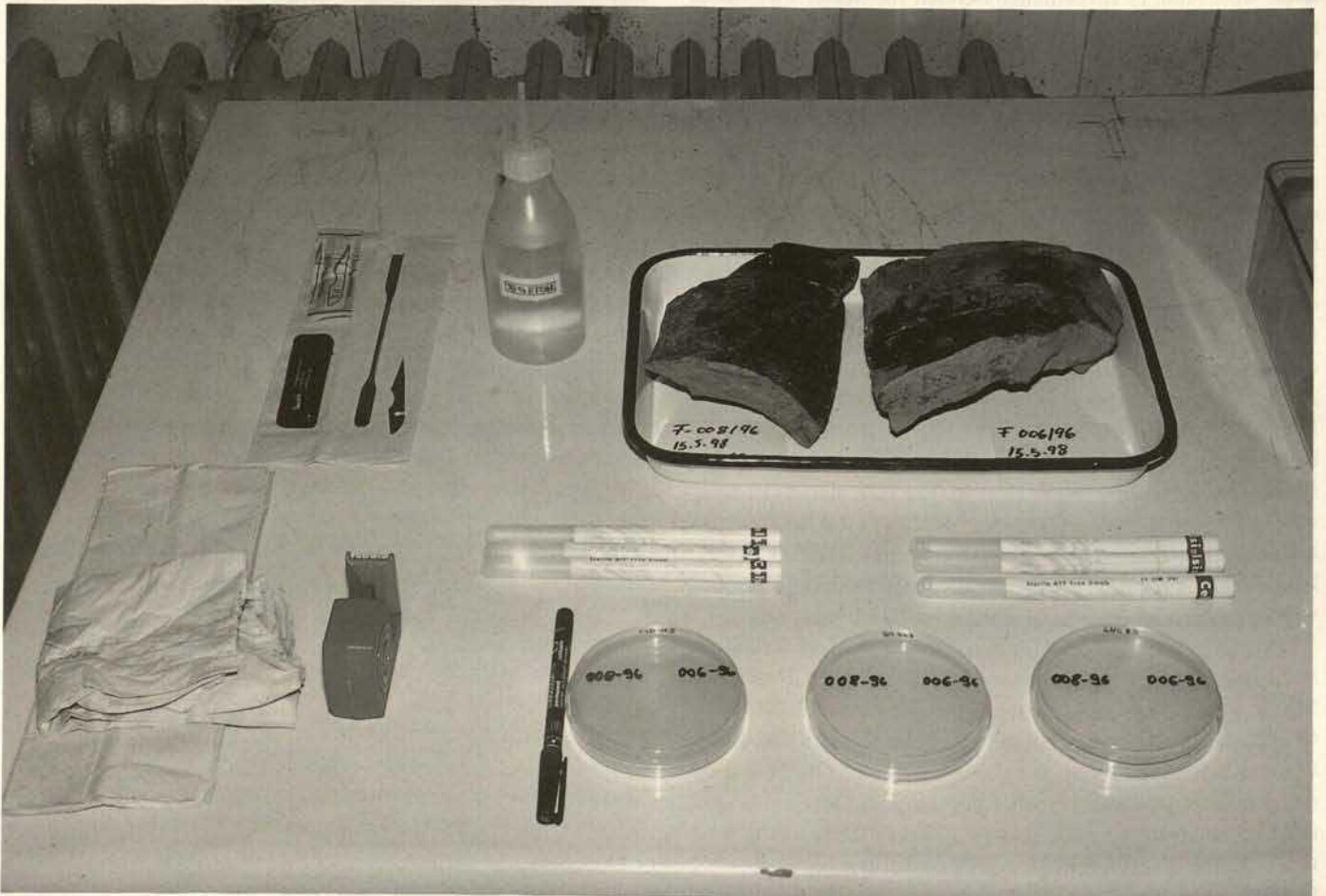
的细菌(Plate Count [PC9 和德国单位法[DEV])。作二号坑的空气菌落实验时, 在(8号方)挖掘区的地上、14号方的测台上 (高于走道 1.2 米)以及 (9号方上)高处的通道上, 将装有培养基的培养皿打开放置一小时。针对寡营养的菌用 Czapek-Dox (CzD)培养基, 针对寡营养的细菌用 Bunt & Rovira (BR)培养基, 针对放线菌使用甘油-硝酸-酪蛋白(GNC)培养基, 针对光合的藻类和氰细菌则使用 BG11 培养基。按照每  $10 \text{ cm}^2$  (Rodac-复压试样)尤其是每克黄土(在螺旋喷仪上加工)中的细菌单位的测定(KBE), 从不同位置的培养基样中选出最常出现的菌, 并加以分类 (图 4)。

对黄土中生物量的定量分析是按照 Lowry 测定蛋白含量法来进行的。对文物残块表面和土地表层生物污染的、生理新陈代谢活动的测定, 乃是用棉棒

Abb. 3. Analytische Werkzeuge (u. a. Nährmedien wie Kontaktager, ATP-Stäbchen) zur zerstörungsfreien Erfassung des mikrobiellen Befalls und seiner Stoffwechselaktivitäten auf den Terrakottafragmenten

Fig. 3. Analytical tools (e. g. nutrient agar, ATP-stick) for non-destructive assessment of the microbial contamination and its metabolic activity on the terracotta fragments

图 3. 无损探查陶片上微生物侵害和微生物新陈代谢活动的分析仪器 (包括培养基如营养琼脂、ATP 棉签)





grünen Inseln und Flächen überzogen. Trotz des geringen Licht-einfalls wachsen hier offensichtlich photosynthetische Mikroorganismen (vermutlich Cyanobakterien); ein Wachstum von Grünalgen wurde auch aus Grube 1 berichtet, nachdem zur Festigung der instabilen Erdstege eine 20%ige Kaliwasser-glas-Lösung aufgesprüht worden war. Verfärbungen der Oberfläche sind hier eindeutig auf mikrobiellen Befall zurückzuführen.

## Untersuchungen

### Klimamessungen

Die mikrobiologischen Untersuchungen begleitend wurden an allen Probestandorten die jeweiligen Klimabedingungen (Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit, Taupunkt und Oberflächentemperatur) mit dem elektronischen Messgerät „Testo 635“ gemessen.

### Mikrobiologische Untersuchungen

Die kulturtechnischen Untersuchungen an den Terrakottafragmenten, den Erdstegen und Terrakottaoberflächen (M) in Grube 2 erfolgten nach dem Rodac-Abklatschverfahren auf spezifischen Anreicherungsmedien für heterotrophe (d. h. organische Nährstoffe nutzende) Mikroorganismen, wie Pilze, Bakterien und Aktinomyzeten (Abb. 3). Eine quantitative Anreicherung und Zählung von Mikroorganismen konnte im Labor an zwei Lößbodenproben aus dem Ausgrabungsbereich über den Spiralplater ermittelt werden. Darüber hinaus wurde eine grobe Bestimmung der mikrobiellen Luftkeimbelastung in Halle 2 durchgeführt (LK).

Die zu den Materialuntersuchungen vor Ort eingesetzten Anreicherungsmedien umfaßten im einzelnen: Czapek-Dox (CzD) für oligotrophe (d. h. an nährstoffarme Standorte angepaßte) Pilze, Bunt & Rovira (BR) für oligotrophe Bakterien, Glycerin-Nitrat-Casein (GNC) für Actinomyzeten und BG 11 für phototrophe Algen und Cyanobakterien (nur in Grube 2).

Darüber hinaus wurden in Grube 2 spezielle Medien zum Nachweis der mikrobiellen Säurebildung (Carbonat-Agar), Melanin-Pigmentbildung (PIA), Metalloxidation (BF-Mn und BF-Fe) eingesetzt.

Bei den quantitativen Keimanreicherungen der Lößbodenproben wurde das Medienspektrum noch für den Nachweis nitrifizierender Bakterien (BNM/BNB), xerophiler (d. h. trockenheitsliebende) Pilze (DG 18), copiotropher (d. h. an nährstoffreiche Standorte angepaßte) Pilze (Malzagar), von Hefepilzen (Sabouraud-Agar; SAB) sowie copiotropher (d. h. an nährstoffreiche Standorte angepaßte) Bakterien (Plate Count [PC] und Deutsches Einheitsverfahren [DEV]) erweitert.

Für die Luftkeimuntersuchungen in Halle 2 wurden Petrischalen mit den Anreicherungsmedien Czapek-Dox (CzD) für oligotrophe (d. h. an nährstoffarme Standorte angepaßte) Pilze, Bunt & Rovira (BR) für oligotrophe Bakterien, Glycerin-Nitrat-Casein (GNC) für Actinomyzeten und BG 11 für phototrophe Algen und Cyanobakterien für eine Stunde geöffnet am Boden der Ausgrabung (Sektor T 8), auf einem Meßtisch in Sektor T 14 (1,20 m über dem Laufsteg) sowie auf dem oberen Umlauf der Halle 2 (über Sektor T 9) aufgestellt (Abb. 4).

Nach Bestimmung der koloniebildenden Einheiten (KBE) pro 10 cm<sup>2</sup> (Rodac-Abklatschproben) bzw. pro Gramm Lößboden (Aufarbeitung am Spiralplater) wurden von allen Standorten

## Microbiological investigations

The culturo-microbiological examinations on the terracotta fragments, the partition walls and the terracotta surfaces (M) in pit no. 2 were carried out with the Rodac Impression Plate technique in which specific enrichment mediums for heterotrophic microorganisms (i. e. using organic nutrients) such as fungi, bacteria and actinomycetes were used (fig. 3). A quantitative enriching and counting of microorganisms was also done on two loess soil samples from the excavation site in the laboratory with a spiral plater. In addition a determination of air-borne microbes in pit no. 2 was carried out (LK).

The applied enrichment media used for the material investigations in situ included Czapek-Dox (CzD) for oligotrophic fungi (e.g. conform with nutrient poor sites); Bunt & Rovira (BR) for oligotrophic bacteria; Glycerol-nitrate-casein (GNC) for actinomycetes; BG 11 for phototrophic algae and cyanobacteria (just in pit no. 2). Beyond this special test media for the identification of microbial acid development (carbonate-agar), the melanin pigment development (PIA) and metal oxidation (BF-Mn and Bf-Fe) were applied.

The medium spectrum of the quantitative microbe enrichment of the loess soil samples was extended for the identification of nitrifying bacteria (BNM/BNB), xerophilic (i. e. accustomed to a dry climate) fungi (DG 18), copiotrophic (i. e. conforming with nutrient rich sites) fungi (malzagar), yeast (sabouraud-agar; SAB) as well as copiotrophic (i.e. conforming with nutrient rich sites) bacteria (Plate Count [PC] and Deutsches Einheitsverfahren [DEV]).

For measurements of air-borne microorganisms, Petri dishes were set up in hall 2 with the enrichment medium Czapek-Dox (CzD) for oligotrophic (i. e. conforming with nutrient poor sites) fungi, Bunt and Rovira (BR) for oligotrophic bacteria, glycerin-nitrate-casein (GNC) for actinomycetes and BG 11 for phototrophic algae as well as cyano bacteria. For one hour the dishes were placed open on the ground of the excavation site (sector T 8), on a measurement table in sector T 14 (c. 1.20 m above the catwalks) as well as on the upper viewing path of hall 2 (above sector T 9) for investigation of airborne microbes (fig. 4).

After determining the colony forming units (CFU) per 10 cm<sup>2</sup> (Rodac Impression Plates) or per gram loess soil (reconditioning of the spiral plater) the fungi that occurred most frequently at all locations and object samples were chosen and differentiated taxonomically.

The quantitative analysis of the microbial biomass in the loess soil was made possible by the determination of the protein content according to Lowry. The measurement of the metabolic-physiological activity of the microbial contamination on the fragment and ground surface was done through quantifying of the respective ATP concentration on the materials after removal with a cotton swab (smear sample according to the directions of the Stratec-Celsis Company).

### Arrangement of the test surfaces for biocide treatment

The moisture in the pits represents the biggest problem for the control and reduction of the microbial contamination. In addition to this, one can assume that the loess soil containing roots is rich in nutrients (e. g. ammonium sulphate). Beyond this the loess soil with its cation exchange capacity has the capability to inactivate biocide substances by binding them in the clay mineral layers. Under these conditions the organic biocides used



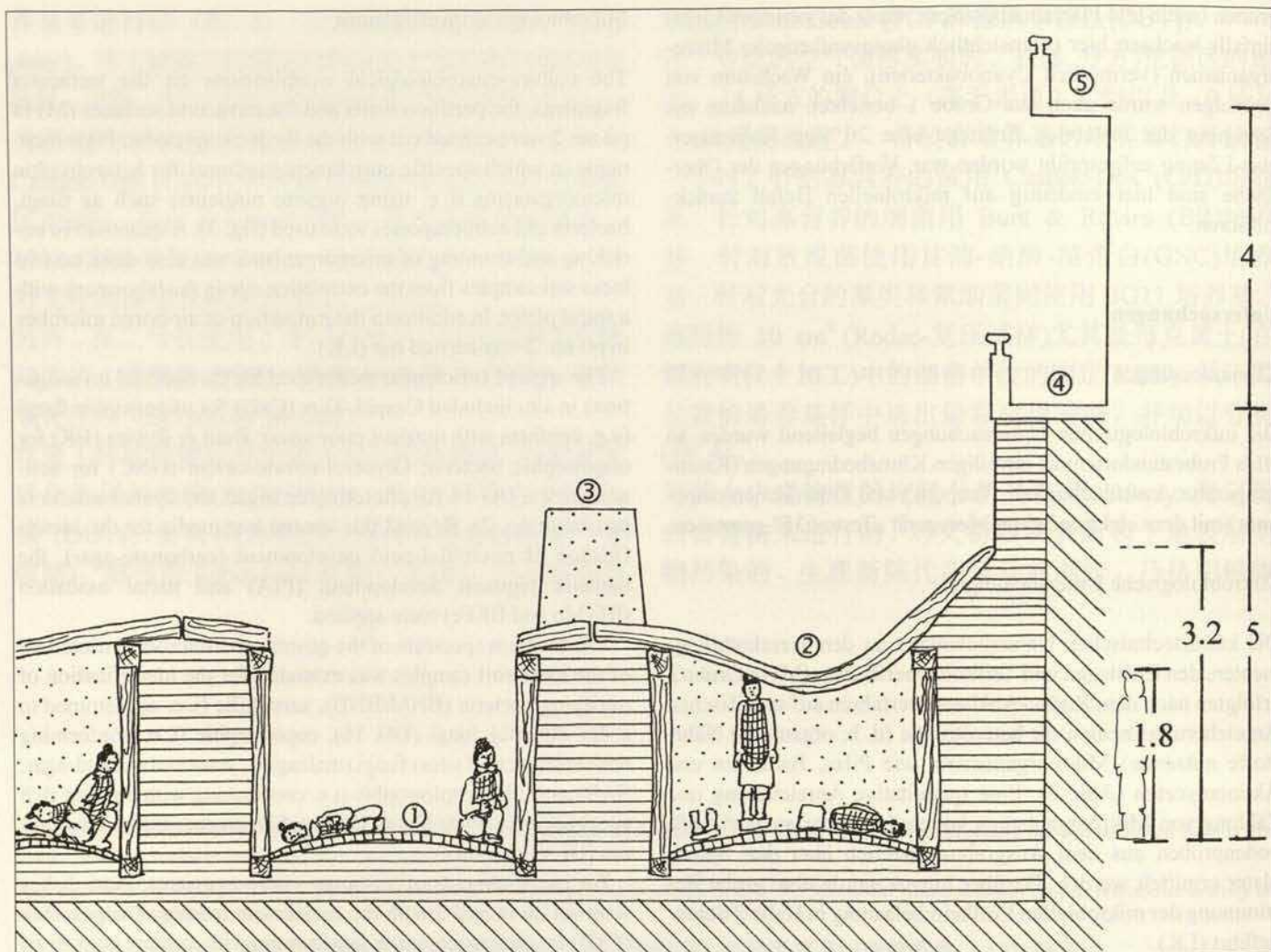


Abb. 4. Schnitt durch Grube 2, Ausgrabungssektor T 21, mit Position der Meßpunkte der Klimamessung und der Luftkeimuntersuchung  
 ① Ziegelboden der Grube ② durchgebogene Deckenbalken ③ Laufsteg für die Archäologen ④ 1. Umgang für Besucher ⑤ 2. Umgang für Besucher

Fig. 4. Vertical section of pit no. 2, area of excavation sector T 21, with position of the points of climatic measurements and investigation on air-borne bacteria

① brick tile floor of the pit ② sagged roof beams ③ walking path, access for the archaeologists ④ 1<sup>st</sup> viewing path for visitors ⑤ 2<sup>nd</sup> viewing path for visitors

图 4. 二号坑 T21 挖掘方的剖视图，附气候监测点和空气细菌检测点

① 铺地砖 ② 弯曲的顶棚 ③ 考古学家使用的走道 ④ 参观者的 1 号通道 ⑤ 参观者的 2 号通道

取样后，通过测定材料上不同的腺苷三磷酸-浓缩量得出的（根据 Stratec-Celsis 公司的说明所做的涂片实验）。

#### 设置防治霉害的试验区

坑内潮湿是治理生物污染的最大问题。此外还有迹象表明，黄土里根系密布，养料丰富（如硫酸铵），另外，基于它的交换容量，黄土还能通过化合反应使杀生物剂的成分在现存的粘土矿层里失去作用。迄今为止所使用的是有机杀生物剂，随着时间的推移，它会在化学性和酶催作用上减弱，这恰好为存活下来的微生物起到了肥料的作用。因此提出了作其它选择的问题。

按照布莱梅材料检验所的准备工作的准备工作，双方达成了协议，建立一块试验区，对无机的杀生物剂（尤其是硼酸盐）进行检验，并与有机的品种作对比。在一个土隔梁发霉的墙壁的中区，使用了下列杀生物剂：Preventol CMK（0.5% 于异丙醇中），Solbrol M + P（PHB-甲基-和丙基酯；按物质定，1.5% 于异丙醇中），硼砂（ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot x \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ；10% 于水中），Solbrol M + A + P（PHB-甲基-，乙酯-和丙基酯；2/1, 5/1% 于异丙醇中），Mergal S 90（三嗪-氨基甲酸酯-Isotiaolin；杀真菌剂-杀藻剂；1.5% 于水中），Barrycidal（四元的铵化合物；成品）。试验区涂抹的宽度为 40 厘米，各自间隔 10 厘米；涂抹面的高度各不相同，视杀生物剂的所需量而定。



und Objektproben die zahlenmäßig am häufigsten auftretenden Pilze ausgewählt und taxonomisch differenziert.

Die quantitative Analyse der mikrobiellen Biomasse im Lößboden erfolgte über die Bestimmung des Proteingehaltes nach Lowry. Die Messung der stoffwechselphysiologischen Aktivität der mikrobiellen Kontamination auf den Fragment- und Bodenoberflächen erfolgte über die Quantifizierung der jeweiligen ATP-Konzentration auf den Materialien nach Abnahme mit einem Wattestab (Abstrichprobe nach Angaben der Firma Stratec-Celsis).

#### Anlage der Musterfläche für biozide Behandlungen

Die Feuchtigkeit in den Gruben stellt das größte Problem bei der Bekämpfung der mikrobiellen Kontamination dar. Darüber hinaus kann man davon ausgehen, daß der von Wurzeln durchzogene Lößboden reich an Nährstoffen (z. B. Ammoniumsulfat) ist und aufgrund seiner Austauschkapazität in der Lage ist, biozide Substanzen durch Bindung in den vorhandenen Tonmineralschichten zu inaktivieren. Da unter diesen Umständen auch noch die bislang angewandten organischen Biozide im Laufe der Zeit chemisch und enzymatisch abgebaut werden und somit für die überlebenden Mikroorganismen geradezu als Dünger wirken können, stellte sich die Frage nach einer möglichen Alternative. Den Vorbereitungen der Materialprüfungsanstalt Bremen gemäß wurde vereinbart, anorganische Biozide (insbesondere Borate) im Vergleich zu organischen Vertretern in einer Musterfläche zu prüfen.

Folgende Biozide wurden im Mittelbereich einer verschimmelten Wand eines Erdsteges appliziert: Preventol CMK (0,5 % in Isopropanol), Solbrol M + P (PHB-Methyl- und Propylester; 1,5 % je Substanz in Isopropanol), Borax ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \times 10 \text{ H}_2\text{O}$ ; 10 % in Wasser), Solbrol M+A+P (PHB-Methyl-, Ethyl- und Propylester; 2/1,5/1 % in Isopropanol), Mergal S 90 (Triazin-Carbamat-Isothiazolin; fungizid-algizid; 1,5 % in Wasser) und Barrycidal (Quaternäre Ammoniumverbindung; gebrauchsfertig). Der Auftrag erfolgte in Musterflächen mit einer Breite von 40 cm in jeweils 10 cm Abstand; die Höhe der Flächen variierte abhängig von dem Biozidverbrauch pro Fläche.

Parallel zur Anlage der Musterfläche in Lintong wurde eine Miniatur-Musterfläche im Labor in der Materialprüfungsanstalt in Bremen angelegt. Dazu wurde sichtbar unterschiedlich stark schimmelbefallener Lößboden auf eine Glasscheibe aufgeschwemmt und nach dem Eintrocknen an der Luft in einer feuchten Vermikulit-Wanne bei Zimmertemperatur inkubiert. Nach Aufwachsen der Schimmelpilze erfolgte eine Behandlung mit bioziden Lösungen (1 ml pro Fläche): Trdes (Wasserstoffperoxid mit Silberionen; 1 bzw. 5 % in Wasser), Solbrol M + P (1,5 % in Isopropanol), Thymol (1 % in Isopropanol), Borax (5 bzw. 10 % in Wasser), Mergal S 88 (Carbamat, fungizid; 2,5 % in Wasser), Mergal S 90 (1,5 % in Wasser) und Preventol CMK (0,5 % in Isopropanol).

## Ergebnisse

### Klimamessungen

Die Ergebnisse der Klimamessungen im Labor und in den Ausgrabungen in Lintong sind in Tabelle 1 wiedergegeben. Die Daten machen deutlich, daß die im Labor gelagerten Fragmente einer sehr geringen Feuchtigkeitsbelastung unterliegen, die ein

until now can be degraded chemically and enzymatically during the course of time and virtually become a fertilizer for the surviving microorganisms. Consequently possible alternatives should be discussed. In accordance with the preparations of the material testing laboratory (Materialprüfungsanstalt) Bremen the decision was made to test and to compare inorganic biocides (especially borates) with commercial biocides on a test surface.

The following biocides were applied in the middle section of one of the contaminated partition walls: Preventol CMK (0,5 % in propan-2-ol); Solbrol M + P (PHB-methyl and propyl ester, 1,5 % of either substance in propan-2-ol); Borax ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \times 10 \text{ H}_2\text{O}$ ; 10 % in water); Solbrol M+A+P (PHB-methyl, ethyl and propyl ester, 2/1,5/1 % in propan-2-ol); Mergal S 90 (Triazin-carbamate-isothiazoline, fungicide-alcicide; 1,5 % in water) and Barrycidal (quaternary ammonium compound, ready for use). Each application was carried out on a 40 cm wide test area with 10 cm distance on each side. The height of the test surface varied according to the biocide consumption.

A comparable miniature test surface was set up in the laboratory of the material testing laboratory (Materialprüfungsanstalt) Bremen parallel to the test surface arrangement in Lintong. In the course of these experiments visually altered strongly contaminated loess soil was dispersed on a glass sheet and dried by the surrounding air. After the fungi sample was dried it was incubated in a moist vermiculite pan at room temperature. After the fungi had grown the panel was treated with biocide solutions (1 ml per surface): Trdes (Hydrogen peroxide with silver ions; 1 to 5 % in water); Solbrol M+P (1,5 % in propan-2-ol); Thymol: (1 % in propan-2-ol); Borax (5 to 10 % in water); Mergal S 88 (Carbamate; fungicide; 2,5 % in water); Mergal S 90 (1,5 % in water) and Preventol CMK (0,5 % in propan-2-ol).

## Results

### Climate measurements

The results of the climate measurements in the laboratory and at the excavations in Lintong are presented in table 1. The data clearly indicate that the fragments in the laboratory are stored in a relatively stable climate with rather low strain by changes of humidity moisture values. This almost prevents microbes to grow. At the same time these storage conditions demand higher standards on the stability of the preserved polychromy of the terracotta sculptures.

The moisture distribution throughout the hall of pit no. 2 differs. The air is saturated near the ground of the excavation site in sector T 8, which is kept dark. In sector T 21 where excavation work has been continuing since January 1998 the relative humidity has decreased slightly due to the warmth caused by lamps. The moisture content in the hall decreases with the surrounding room height starting by the partition walls and continuing to the first and second visitor viewing paths. The positioned hygrothermographs always showed lower measurements with deviations reaching up to 10% rh. From these results one can see that the influence of the condensation seems to play an important role on the fungi growth in pit no. 2, especially in the dark and only slightly ventilated areas of the excavation. Together with the ground water level, the condensation levels also have to be controlled with suitable measures. This means that further detailed climate measurements and ground water investigations have to be carried out.



Probe sample 试样编号	Pilze [KBE/10 cm <sup>2</sup> ] fungi [CFU/10 cm <sup>2</sup> ] 霉菌 [菌落单位/10 cm <sup>2</sup> ]  + Taxonomie / species / 分类	Bakterien [KBE/10 cm <sup>2</sup> ] bacteria [CFU/10 cm <sup>2</sup> ] 细菌 [菌落单位/10 cm <sup>2</sup> ]	Aktinomyceten [KBE/10 cm <sup>2</sup> ] actinomycetes [CFU/10 cm <sup>2</sup> ] 放线菌 [菌落单位/10 cm <sup>2</sup> ]	Bereich (Material) Area (material) 部位 (材料)	ATP-Gehalt ATP-content 腺苷三 磷酸-含量 [RLU/25 cm <sup>2</sup> ]
Fragment 002-1996 残片	8	6	0	Bänder (Zinnober) straps (cinnabar) 联甲带 (朱砂层)  Panzerplatte (Lack) armour plate (lacquer) 甲片 (漆层)  PEG-Überschuß PEG-surplus PEG-过量	9 146   3 405  2 774
Fragment 003-1996 残片	-	-	-	Bänder (Zinnober) straps (cinnabar) 联甲带 (朱砂层)  Panzerplatte (Lack) armour plate (lacquer) 甲片 (漆层)	1 978   3 414
Fragment 004-1996 残片	16 <i>Alternaria alternata,</i> <i>Blastomyces dermatitidis,</i> <i>Cladosporium</i> <i>sphaerospermum,</i> <i>Myriodontium keratinophilum</i>	8	0	Bänder (Zinnober) straps (cinnabar) 联甲带 (朱砂层)  Panzerplatte (Lack) armour plate (lacquer) 甲片 (漆层)	12 669   17 371
Fragment 006-1996 残片	27 <i>Alternaria alternata,</i> <i>Aspergillus niger,</i> <i>Blastomyces dermatitidis,</i> <i>Penicillium chrysogenum,</i> <i>Rhizopus stolonifer</i>	4	0	Bänder (Zinnober) straps (cinnabar) 联甲带 (朱砂层)  Panzerplatte (Lack) armour plate (lacquer) 甲片 (漆层)	1 865   1 554
Fragment 008-1996 残片	18 <i>Alternaria alternata,</i> <i>Blastomyces dermatitidis,</i> <i>Myriodontium keratinophilum,</i> <i>Stachybotrys atra</i>	3	6	Panzerplatte (Lack) armour plate (lacquer) 甲片 (漆层)	4 345

Tab. 2. Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen (Rodac-Abklatschproben, ATP-Luciferase-Test) an konservierten Fragmenten im Restaurierungslabor in Lintong

Tab. 2. Results of the microchemical investigations (Rodac spread-proof method, ATP-luciferase-test) on consolidated fragments at the restoration laboratories in Lintong

表2. 对临潼修复实验室内保护后的残片所进行的微生物研究的结果 (Rodac - 复压试样, 腺苷三磷酸 - 荧光素酶 - 试验)

在临潼设置试验区的同时,也在布莱梅材料检验所的实验室里设置了一块微型试验区。在这里将明显不同程度发霉的黄土浸泡到一块玻璃片上,在空气中风干,然后放在一个潮湿的蛭石盆里在室温下培育。生霉之后,用杀生物剂溶液(每块涂抹面 1 ml)进行处理: Trdes (过氧化氢与银离子; 1 或 5% 于水中), Solbrol M + P (1.5% 于异丙醇中), Thymol (1% 于异丙醇中), 硼砂 (5 或 10% 于水中), Mergal S 88 (氨基甲酸酯, 杀真菌剂; 2.5% 于水中), Mergal S 90 (1.5% 于水中)和 Preventol CMK (0.5% 于异丙醇中)。

## 结果

### 气候监测

表1列出了实验室和临潼挖掘现场的气候监测结果。数据清楚地表明,放在实验室的文物残片受潮甚微,几乎可以排除微生物生长的可能。当然,这种存放条件对保持陶俑的彩绘层的稳固性也提出了更高的要求。二号坑大厅里的湿度分布不均匀。在保持黑暗的8号方接近挖掘地面处,空气达到了绝对的饱和湿度,而在1998



Wachstum mikrobieller Keime nahezu ausschließen. Allerdings stellen diese Lagerungsbedingungen auch erhöhte Anforderungen an die Stabilität der konservierten Farbfassungen der Terrakottafragmente.

Die Feuchteverteilung in der Halle der Grube 2 ist unterschiedlich. Während in Bodennähe der Ausgrabung des dunkel gehaltenen Sektors 8 eine absolute Feuchtesättigung der Luft erreicht wird, sinken die Werte der relativen Luftfeuchtigkeit im gleichen Tiefenbereich im Ausgrabungssektor T 21, in dem seit Januar 1998 gegraben wird, unter dem Wärmeeinfluß der dort eingeschalteten Lampen etwas ab. Eine weitere Abnahme der Feuchtebelastung in der Halle ist mit zunehmender Raumhöhe, beginnend bei den Erdstegen, über den ersten bis zum zweiten Besucherumlauf festzustellen; die aufgestellten Thermohygrographen zeigten stets geringere Werte, mit Abweichungen von bis zu 10% rF an. Aus diesen Ergebnissen ist zu schließen, daß der Einfluß von Kondensationsfeuchte auf den Schimmelbewuchs in der Grube 2, insbesondere in den dunkel und wenig belüfteten Bereichen der Ausgrabung, eine wichtige Rolle zu spielen scheint. Sie muß neben dem anstehenden Grundwasserspiegel durch geeignete Maßnahmen kontrolliert werden. Dies setzt allerdings weitere detaillierte Raumklimamessungen und Grundwasseruntersuchungen voraus.

#### Mikrobiologische Untersuchungen an den Terrakottafragmenten

Die Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen an den Terrakottafragmenten sind in Tabelle 2 dargelegt. Sie zeigen, daß die behandelten Fragmente allgemein nur einem geringen mikrobiellen Befall unterliegen und nur noch einige der in den Ausgrabungen vorzufindenden Pilzspezies aufweisen (vgl. Tab. 3). Entsprechend finden sich auch kaum Aktinomyzeten als Anzeiger einer bodenverwandten Mikroflora im untersuchten Probenmaterial. Die Stoffwechselaktivität (als ATP-Gehalt) fällt daher auch entsprechend gering aus. Allerdings macht die mikrobiologische Analyse von Fragment 004-96 deutlich, daß ein Überschuß von PEG 200 (verwendet zur Stabilisierung ohne zusätzliches Festigungsmittel) eine leichte Aktivierung des Pilzbefalls zur Folge haben kann, der sich auch bei der lichtmikroskopischen Analyse andeutete. Ferner kann gezeigt werden, daß der mikrobielle Befall nicht an spezifischen Bereichen (z. B. Pigmente, Lackschicht) der Fragmente ansetzt, sondern nahezu gleichmäßig über die Oberflächen verteilt ist.

An den sich in Behandlung befindlichen Fragmenten, die weiterhin bei hoher Luftfeuchtigkeit gehalten werden müssen, zeigen sich jedoch immer wieder Kontaminationsprobleme, die nur bedingt mit Desinfektionsbehandlungen (z. B. 70%iges Ethanol) kontrolliert werden können. Dabei ist festzustellen, daß der mikrobielle Befall flächendeckend vonstatten geht und nicht lokal auf bestimmte Bereiche der Terrakotta bzw. der Fassungsschichten begrenzt bleibt. Für diese Fälle wird es jedoch notwendig sein, eine Alternative zu den bisherigen phenolhaltigen und damit stark riechenden Bioziden (u. a. Preventol CMK oder ON) zu finden.

#### Mikrobiologische Untersuchungen in Grube 2

Die Ergebnisse der Luftkeimuntersuchungen in Halle 2 sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Ergebnisse, wenn auch mit der Einschränkung einer begrenzt aussagekräftigen Sedimentationsanreicherung behaftet, zeigen deutlich die Konzentration aller un-

#### Microbiological investigations on the terracotta fragments

The results of the microbiological examinations on the terracotta fragments are presented in table 2. The examination has proven that the treated fragments are only slightly contaminated. Only a small number of the fungi species found in the excavations were identified (compare table 3). Corresponding to these results was the fact that almost no actinomycetes, an indicator of related micro-flora, was found in the examined sample material. Therefore the metabolic activity (as ATP content) is at a very low level. The microbiological analysis of fragment 004-96 points out that a surplus of PEG 200, used for stabilisation without addition of an adhesive, could lead to a slight reactivation of the microbial contamination. The microbial growth could also be detected by light microscopy. Furthermore, it can be shown that the microbial contamination is not only found on specific areas (e. g. pigments, lacquer layers) of the fragments, but is evenly spread over all surfaces.

During the conservation treatment the fragments have to be stored at a high humidity level. They always show contamination problems, which can be controlled only partially by disinfection applications (e. g. 70 % ethanol). Yet at the same time the microbial contamination tends to cover the whole surface and is locally not restricted to certain areas of the terracotta and the polychromy layers. For these cases it is going to be necessary to find an alternative to the previously applied, strong smelling phenol containing biocides (e. g. Preventol CMK or ON).

#### Microbiological investigations in pit no. 2

The investigation results concerning the air-borne microbes in pit no. 2 are presented in table 3. Even though the sedimentation enrichment, which has been carried out, is only partially representative, the results of this investigation clearly show the concentration of all examined microbes in the immediate area of the ground. The number of microbes decreases with the height of the room. At the same time the great number of visitors at the excavation sites are probably also responsible for the increase of the bacterial microbes around the second viewing path. The airborne types of microbes match with the species identified on the ground surface of the excavations and the terracotta sculptures.

The results of the microbiological investigations on the loess ground (table 4) point out the serious infestation of the visually contaminated areas. Especially important is the high amount of xerophilic (i. e. resistant to drying) microbes which can exist very well in fluctuating moisture conditions. Furthermore the actinomycetes, which are typically found in the soil, are obviously more abundant and are accompanied by oligotrophic microbes that can survive on a low nutrient level. In areas that visually seem to be less contaminated, the photo-synthetically active algae and cyano-bacteria (lyngbya-phormidium-plectonema-group) are especially noticeable even in almost totally dark excavation areas. They still seem to be getting enough light for photosynthesis. Whether these microorganisms are able to contribute to the nutrient household, even through nitrogen fixation in the ground is currently being examined. A sign that this is possible taking place is the fact that nitrifying bacteria, which clearly rely on such nitrogen containing substrates for their metabolism, have been identified in these areas.

The physiological investigations the present of ground microflora as well as microorganisms on the surface of the examined terracotta sculptures (table 5) resulted in the clear identification



Beprobungsbereich Area of sampling 试验区	Pilze/ Fungi / 霉菌 [KBE/Platte]* Taxonomie / taxonomy / 分类	Bakterien bacteria 细菌 [KBE/Platte]*	Aktinomyceten actinomycetes 放线菌 [KBE/Platte]*	Algen algae 藻类 [KBE/Platte]*
Luftkeim I Ziegelboden der Grube Airborne microbe I Brick floor of pit 空气菌落 I 坑内砖地	140 <i>Aspergillus versicolor</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium citrinum</i> , <i>Penicillium cyclopium</i> , <i>Penicillium regulosum</i> , <i>Myriodontium keratinophilum</i>	189	60	175
Luftkeim II 1. Umgang Airborne microbe II 1. Viewing path 空气菌落 II 第一处通道	116 <i>Alternaria alternata</i> , <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Myriodontium keratinophilum</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium cyclopium</i> , <i>Penicillium regulosum</i> , <i>Trichoderma viride</i>	n. g.	11	0
Luftkeim III 2. Umgang Airborne microbe III 2. Viewing path 空气菌落 III 第二处通道	70 <i>Aspergillus flavus</i> , <i>Fusarium spec.</i> , <i>Myriodontium keratinophilum</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i> , <i>Penicillium citrinum</i> , <i>Penicillium cyclopium</i>	294	6	0
* Platte: Sedimentationsplatten; Auslegezeit 1 Std.; KBE: Kolonienbildene Einheiten Sedimentation plate; exposition time: 1 hour; KBE: colony forming units (CFU) 沉积盘; 放置时间1小时; KBE: 菌落单位				

Tab. 3. Ergebnisse der Luftkeimuntersuchungen in der Halle der Grube 2  
Tab. 3. Investigation results of airborne microbes in the hall of pit no. 2  
表3. 二号坑大厅空气菌落调查结果

tersuchten, mikrobiellen Keime im unmittelbaren Bodenbereich der Ausgrabung. Die Keimzahlen gehen mit zunehmender Raumhöhe zurück. Ein Anstieg der bakteriellen Keime im zweiten (oberen) Umlauf ist wahrscheinlich auf den Einfluß der zahlreichen Besucher der Ausgrabung zurückzuführen. Die Art der Luftkeime deckt sich sehr deutlich mit den Spezies, die auf den Bodenoberflächen und den Terrakottafiguren am Boden der Ausgrabung nachgewiesen werden konnten.

Die Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchung des Lößbodens (Tab. 4) macht die massive mikrobielle Belastung der bereits visuell sichtbar kontaminierten Bereiche deutlich. Besonders bedeutsam sind die hohen Anteile xerophiler (d. h. trockenresistenter) Keime, die gerade unter wechselfeuchten Bedingungen sehr gut bestehen können. Darüber hinaus sind die bodentypischen Aktinomyceten hier ebenfalls deutlicher vertreten und werden von oligotrophen, d. h. an geringe Nährstoffkonzentrationen angepaßten Keimen begleitet. Bei den visuell weniger belasteten Bodenbereichen fallen besonders die photosynthetisch wirksamen Algen und Cyanobakterien (Lyngbya-Phormidium-Plectonema-Gruppe) auf, die anscheinend selbst in den nahezu dunklen Ausgrabungsbereichen genügend Licht finden, um Energie zu gewinnen. Ob diese Mikroorganismen durch Stickstoff-Fixierung auch zum Nährstoffhaushalt des Bodens beitragen, wird derzeit untersucht: Ein möglicher Hinweis auf etwaige Zusammenhänge bietet hierzu der Nachweis nitrifizierender Bakterien in diesen Bereichen, die für ihren Stoffwechsel auf derartige stickstoffhaltige Substrate angewiesen wären.

Die physiologischen Untersuchungen an der vorliegenden Bodenmikroflora sowie den Mikroorganismen auf den Oberflächen der untersuchten Terrakotta-Figuren (Tab. 5), ergaben den deutlichen Nachweis auf eine ausgeprägte Biokorrosivität der angereicherten Keime (Carbonat-Agar) und den Nachweis einer beträchtlichen Anzahl manganoxidierender Mikroorganismen (BF+Mn). Dagegen fanden sich keine Kulturen, die zur Bildung von Pigmenten (z. B. Melanin PIA) in der Lage gewesen wären.

Die Art der nachgewiesenen Schimmelpilze an den untersuchten Standorten decken sich teilweise mit den in den chinesischen Untersuchungen nachgewiesenen Keimen; zwölf Stämme konnten bestätigt werden, drei weitere Spezies konnten ergänzend festgestellt werden (*Penicillium regulosum*, *Penicillium expansum* und *Myriodontium keratinophilum*). Aufgrund des geringen Untersuchungsumfangs ist verständlich, daß die festgestellten Spezies nur einen Teil der in China nachgewiesenen Bandbreite abdecken. In beiden Aufstellungen finden sich die Pilzarten, die einen mikrobiellen Angriff der Farbschichten und der Terrakotta verursachen können. Mit welcher Stoffwechselaktivität diese Mikroorganismen zu Werke gehen, wird aus den ATP-Daten in Tabelle 5 ersichtlich. Die dort für die Terrakottafiguren aufgeführten Werte machen auf eine dramatische Situation aufmerksam. Mikrobielle Schadensprozesse in Form von Biokorrosion, nachgewiesen in den stoffwechselphysiologischen Untersuchungen und Biofouling in Form des Unterwanderns und Ablösen der Fassungsschichten, setzen den Ausgrabungsgegenständen zu; dabei scheint der Befall durch das umliegende Erdreich unterstützt zu werden.



Anreicherung <i>Enrichment</i> 富集	Bodenprobe I (visuell geringer Befall) <i>Soil sample I (visually small contamination)</i> 土样 I (看上去霉害较轻)	Bodenprobe II (visuell starker Befall) <i>Soil sample II (visually strong contamination)</i> 土样 II (看上去霉害较重)
pH-Wert <i>pH-value</i> pH-值 [H <sub>2</sub> O/KCL]	8.8 / 8.3	8.6 / 8.4
Proteingehalt <i>Protein content</i> 蛋白含量 [µg/g]	878	897
Oligotrophe Pilze <i>Oligotrophic fungi</i> 寡营养霉菌 [KBE/g]	7 150	365 000
Copiotrophe Pilze <i>Copiotrophic fungi</i> 富营养霉菌 [KBE/g]	14 000	275 000
Xerophile Pilze <i>Xerophilic fungi</i> 旱生霉菌 [KBE/g]	9 400	615 000
Hefen <i>Yeast</i> 酵母菌 [KBE /g]	8 100	175 000
Oligotrophe Bakterien <i>Oligotrophic bacteria</i> 寡营养细菌 [KBE/g]	52 000	1 895 000
Copiotrophe Bakterien <i>Copiotrophic bacteria</i> 富营养细菌 [KBE/g]	Bakterienschleim (nicht auszählbar) <i>bacteria slime (not countable)</i> 细菌粘质 (不可数)	Bakterienschleim (nicht auszählbar) <i>bacteria slime (not countable)</i> 细菌粘质 (不可数)
Xerophile Bakterien <i>Xerophilic bacteria</i> 旱生细菌 [KBE/g]	16 000	130 000
Nitrifizierende Bakterien <i>Nitrification bacteria</i> 硝化细菌 [MPN/g]	2 300	400
Manganoxidierer <i>Manganese oxidizers</i> 锰氧化剂 [KBE/g]	66 000	79 500
Aktinomyceten <i>Actinomycetes</i> 放线菌 [KBE/g]	47 000	150 000
Algen <i>Algae</i> 藻类 [MPN/g]	7 500	0

Tab. 4. Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen in Grabungssektor T 8 der Grube 2, Teil 1: Kulturtechnische Untersuchungen des Lößbodens, Anreicherung pro g Probenmenge

Tab. 4. Microbiological investigation results from the excavation sector T 8 of pit no. 2, part 1: Culturo-technical investigations of the loess soil; enrichment per g of sample

表4. 对二号坑大厅 T8 挖掘方中微生物研究的结果, 第1部分: 对黄土的培养基的技术研究, 每克取样量的富集



Beprobungsbereich <i>Area of sampling</i> 试验	Taxonomie <i>Taxonomy</i> 分类	Stoffwechselaktivität als ATP-Gehalt <i>Metabolic activity as ATP-content</i> 代谢活动作为腺苷三磷酸-含量 [RLU / 25 cm <sup>2</sup> ]
Bodenprobe I, Seitenwand eines Erdsteges (visuell geringer Befall) <i>Soil sample I, side of a partition wall (visually small contamination)</i> 土样 I, 一处土隔梁的侧壁 (看上去霉害较轻)	<i>Myriodontium keratinophilum, Penicillium chrysogenum, Penicillium citrinum, Penicillium cyclopium, Cladosporium herbarum</i>	oben (2 m über Grubenboden) 279 504 <i>upper area (2 m above pit ground)</i> 上部 (高于坑底2米)
		Mitte (1 m über Grubenboden) 488 052 <i>middle area (1 m above pit ground)</i> 中部 (高于坑底1米)
		unten (10 cm über Grubenboden) 84 267 <i>lower area (10 cm above pit ground)</i> 下部 (高于坑底10厘米)
Bodenprobe II, Seitenwand eines Erdsteges (visuell starker Befall) <i>Soil sample II, side of a partition wall (visually strong contamination)</i> 土样 II, 一处土隔梁的侧壁 (看上去霉害较重)	<i>Aspergillus flavus, Myriodontium keratinophilum, Paecilomyces variotii, Penicillium chrysogenum, Penicillium citrinum, Penicillium cyclopium</i>	oben (2 m über Grubenboden) 496 100 <i>upper area (2 m above pit ground)</i> 上部 (高于坑底2米)
		Mitte (1m über Grubenboden) 1 856 768 <i>middle area (1 m above pit ground)</i> 中部 (高于坑底1米)
		unten (10 cm über Grubenboden) 227 342 <i>lower area (10 cm above pit ground)</i> 下部 (高于坑底10厘米)
Terrakottafigur 1 (visuell starker Befall) <i>Terracotta figure 1 (visually strong contamination)</i> 陶俑 1 (看上去霉害较重)	<i>Alternaria alternata, Cladosporium herbarum, Myriodontium keratinophilum, Paecilomyces variotii, Penicillium citrinum</i>	Gewand / garment / 俑衣 1 197 023
		Schuppenpanzer / plated armour / 鳞甲 595 280
		Bruchfläche / surface of break / 断面 780 025
		Ziegelboden / brick floor / 砖地 695 426
Terrakottafigur 2 (visuell starker Befall) <i>Terracotta figure 2 (visually strong contamination)</i> 陶俑 2 (看上去霉害较重)	<i>Aspergillus flavus, Aspergillus versicolor, Myriodontium keratinophilum, Penicillium chrysogenum, Penicillium expansum</i>	Gewand / garment / 俑衣 1 538 690
		Schuppenpanzer / plated armour / 鳞甲 1 054 222
		Bruchfläche / surface of break / 断面 1 355 245
		Ziegelboden / brick floor / 砖地 864 336

Tab. 5. Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen in Grabungssektor T8 der Grube 2, Teil 2: Taxonomische und stoffwechsel-physiologische Untersuchungen des Lößbodens und der Terrakottafiguren

Tab. 5 Microbiological investigation results from the excavation sector T8 of pit no. 2, Part 2: Taxonomic and metabolic-physical investigations of the loess soil and terracotta figures

表5. 对2号坑大厅 8 号挖掘方中微生物的研究结果, 第2部分: 黄土和陶俑的分类学及代谢生理学的研究

年1月开始挖掘的21号方, 虽处于同一深度, 但受那儿开灯的热源影响, 相对空气湿度则有些下降。可以确定, 随坑内空间高度的上升, 从土隔梁到一层直至二层参观者通道, 湿度会不断下降, 装置的电热温度计经常显示出较低值, 相对湿度偏差直至10%。从这些结果可得出结论: 在影响二号坑, 尤其是黑暗、很少通风的挖掘区的霉菌生长方面, 冷凝湿度看来起着重要作用。应采取相应措施, 对此和即至的地

下水位加以控制。当然, 前提条件是对室内气候进行进一步精密的测量, 对地下水进行研究。

#### 对陶俑残块的微生物研究

表2列出了对陶俑残片进行的微生物研究的结果。研究清楚地表明了一点, 即处理过的残片一般只受到较少的微生物侵害, 仅找出几种在挖掘现场出现的菌种



Zur Wirkung der Biozide in der angelegten Musterfläche in Lintong sowie in der Simulationsanlage in der Materialprüfungsanstalt Bremen können beim gegenwärtigen Stand der Untersuchungen noch keine abschließenden Aussagen getroffen werden. Es läßt sich allerdings feststellen, daß der oberflächliche Pilzrasen eine extreme hydrophobe Barriere darstellt, die eine unmittelbare biozide Behandlung der Oberfläche erschwert; darüber hinaus behindert die Austauschkapazität des Lößbodens die Wirkung biozider Applikationen. Es wird daher zu prüfen sein, wie durch eine eventuell zweistufige Behandlung (1. Vornässen, 2. biozide Applikation) der massive Befall an der weiteren Ausbreitung gehindert bzw. zurückgedrängt werden kann. Dabei erscheint der Einsatz anorganischer Wirksubstanzen dringend geboten, um eine weitere Nährstoffzufuhr zum Boden durch die Applikation organischer synthetischer Biozide zu beenden.

### Vorläufige Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der hier dargestellten mikrobiologischen Untersuchungen an Fragmenten mit konservierter Farbfassung sowie an den Erdstrukturen und Fundstücken in Grube 2 geben ein sehr differenziertes Bild von der mikrobiellen Gefährdung der Ausgrabungsgegenstände und ihrer Fassungsschichten. In diesem Zusammenhang konnte gezeigt werden, daß die Anwendung der zerstörungsfreien Bestimmung mikrobieller Stoffwechselaktivität über den ATP-Luciferase-Test repräsentative und differenzierte Ergebnisse liefert. Diese macht eine begleitende Bewertung des Erfolgs der restauratorischen Arbeiten in Hinblick auf die Behandlung des mikrobiellen Befalls möglich.

Während die Fragmente mit konservierter Farbfassung nur noch vergleichsweise geringe Spuren mikrobiellen Befalls zeigen, unterliegen Erdstrukturen und Fundstücke in Grube 2 einem massiven mikrobiellen Schadenseinfluß. Die mikrobielle Schädigung reicht von Biokorrosion, d. h. Ausscheidung organischer Säuren, bis hin zu Biofouling, d. h. die mechanische Einflußnahme der mikrobiellen Biofilme beim Unterwandern und Ablösen der Fassungsschichten auf den Terrakottaoberflächen. Die Anpassungsfähigkeit der nachgewiesenen Mikroorganismen (Trockenresistenz, geringer Nährstoffbedarf) bei gleichzeitig zeitweise idealen Wachstumsbedingungen im Hinblick auf Feuchte, Temperatur und Oberflächenangebot (d. h. austauschfähiger, tonmineralhaltiger Lößboden) machen eine Kontrolle der Mikroorganismen sehr schwierig. Die einseitige Applikation organischer synthetischer Biozide dürfte allerdings kaum zu einem dauerhaften Erfolg führen, wie bereits die bisherigen Erfahrungen gezeigt haben. Die regelmäßige Zuführung dieser stickstoff- und kohlenstoffhaltigen Substrate wird bei der vorliegenden Bodenstruktur vielmehr das Wachstum der jeweils überlebenden Keime von neuem anregen und damit das vorliegende Problem eher verschlimmern.

Darüber hinaus bleibt festzustellen, daß die im Lößboden, auf den Terrakottaoberflächen und in der Raumluft nachweisbaren Keime eine gesundheitliche Gefährdung zumindest für die unmittelbar mit der Ausgrabung betrauten Archäologen darstellen. Einige der nachgewiesenen Pilze stellen gelegentliche Erreger von Mykosen, d. h. Pilzinfektionen (z. B. Aspergillen: Aspergillose) dar. Andere gehören weitverbreiteten Verunreinigern von Wohn- und Arbeitsbereichen an, die selten pathogen in Erscheinung treten (z. B. *Fusarium spec.*, *Rhizopus spec.*). Die gesundheitliche Reaktion auf Pilzsporen fällt individuell verschieden

of a pronounced bio-corrosiveness of the enriched germs (carbonate agar) and the identification of a large number of manganese oxidizing microorganisms (BF + Mn). In contrast there are no cultures that have the capability of producing pigments (e.g. melanin PIA).

The species of identified fungi at the examined locations matched the results of the Chinese investigation. Twelve species could be confirmed and three additional species were identified (*Penicillium regulosum*, *Penicillium expansum* and *Myriodontium keratinophilum*). Due to the low investigation scope it is understandable that the species determined can cover just a part of the even more extensive spectrum of identification in China. In both lists these fungi species, which are responsible for the microbial contamination of polychromy and terracotta, can be found. The metabolic activity of the microorganisms is clearly indicated by the results in the ATP-data in table 5. The data for the terracotta sculptures indicate a dramatic situation. Microbial damage processes such as bio-corrosion, which was identified in the metabolic-physiological investigations, bio-fouling seen in the infiltration and peeling of the polychromy layers are causing problems for the excavation objects. Furthermore, the contamination seems to be supported by the surrounding soil.

At the present stage of investigation no final comments can be made on the effect of the biocides in the prepared sample surfaces in Lintong as well as the simulation installation in the material testing laboratory (Materialprüfungsanstalt) Bremen. On the other hand it has been determined that the microbial film represents an extreme hydrophobic barrier making it difficult for an immediate biocidal treatment of the surface. Beyond this the exchange capacity of the loess soil hinders the effect of biocidal treatments. Therefore it is necessary to test if a two-step treatment (first step: premoisturizing, second step: biocidal application) can hinder the severe contamination and its further spreading. At the same time the application of inorganic active substances seems to be urgently necessary in order to stop further nutrient supply to the ground through the application of organic synthetic biocides.

### Preliminary evaluation of the results

The results of the here described microbiological investigations on fragments with preserved polychromy, as well as on soil structures and excavated objects portray a very differentiated picture of the microbial threat to the excavated objects and their polychromy. In this context we have seen that the application of the non-destructive ATP-luciferase-test, which determines the microbial metabolic activity achieved representative and differentiated results. This makes an accompanying evaluation of the success of the restoration work possible with regard to the treatment of the microbial contamination.

While the fragments with consolidated polychromy only show comparatively small traces of microbial contamination, the soil structures and excavated objects in pit no. 2 are suffering from a massive microbial attack. The microbial damages range from bio-corrosion (excretion of organic acids) to biofouling (mechanical influences of the microbial films by the infiltration and peeling of the paint layers on the terracotta surfaces). The adaptability of the determined microorganisms (drying resistance, low nutrient demand) together with simultaneous, at times ideal growth conditions with regard to humidity, temperature and sur-



(参见表 3)。与此相应,在检验过的样品材料中,几乎找不到表明近土壤的微植物区系的放线菌,因此,也几乎没有新陈代谢活动(作为腺苷三磷酸-值)。不过对 004-96 号残片的微生物分析则清楚地表明,使用加固剂 PEG200 (不含其它的加固剂)过量,可以导致霉害的轻微活动,光显分析也显示出这一点。结果另外表明,微生物并不是侵害残块的特定部位(如颜料,漆层),而是几乎均匀地分布于表层,而且多数可在不同方法处理过的残块上加以区别。

反复出现污染问题的是那些必须存放在高空气湿度中的、正在处理的残块。这个问题只能在一定范围内,通过杀菌处理(如含量 70% 的酒精)得到控制。情况表明,微生物的侵害发生在整个面积之上,而不是局限在陶俑或彩绘层的某一部位。对此急需找到替代品,以取代目前使用的因含酚而气味浓烈的杀生物剂(包括 Preventol CMK 或 ON)。

#### 对二号坑的微生物研究

表 3 列出了对二号坑空气菌落研究的结果。尽管这些结果具有说服力不足的沉淀类集的局限,但它们还是清楚地表明,所用检查过的微生物菌都集中在紧靠挖掘现场的区域。细菌数量随着空间高度的上升而递减。二层通道的细菌有所增加,这可能归因于参观挖掘现场的大量游客的影响。空气菌落的类别明显地与地表及挖掘现场的陶俑上证实出来的菌类相符。

对黄土土壤的微生物研究的结果(表 4)清楚地表明,在肉眼已能看出污染的区域里,微生物侵害很重。特别严重的是耐旱菌的比例很大,这种菌恰恰能在潮湿变化的条件下很好地生存。此外较明显的还有土壤典型的放线菌,伴以寡营养的细菌。在看上去受侵害较小的区域,特别明显的是光合作用产生的藻类和靛细菌(Lyngbya-Phormidium-Plectonema-群)。它们看来在几乎黑暗的挖掘区内也能找到足够的光线,以获取能源。这种菌类是否通过氮-固定增加土壤的养料成分,目前正在研究。这些区域里证实的硝化菌也许提示了这一联系,因硝化菌进行新陈代谢有赖于这一类含氮的基质。

对现存土壤微植物区系及受检的陶俑表面的微生物的生理研究(表 5),清楚地证实富集细菌(碳酸盐-琼脂)的明显的微腐蚀作用和存在数量显著的氧化锰微生物(BF+Mn)。相反,并不存在能形成色素(如黑色素 PIA)的培养基。

在调查地点经证实的霉菌种类有一部分与中国同事在研究中证实的细菌相符,12 种可加证实,其它三种可补充证实(*Penicillium regulosum*, *Penicillium ex-*

*pansum* 及 *Myriodontium keratinophilum*)。由于调查范围较小,可以理解,这里确认的种类只是在中国证实的带宽中的一部分。双方调查都发现了可对彩绘层和陶俑产生微生物侵害作用的霉菌种类。通过表 5 的腺苷三磷酸-数据,可以看出这些微生物具有何等的新陈代谢的活力。表中有关陶俑的数据让人注意到一种严重情况:在代谢生理的研究中,生物腐蚀形式的微生物侵害过程得到了证实,这种侵害和分化形式的生物污垢以及彩绘层的瓦解使出土文物遭到破坏,同时周围的土壤环境看来有利于这一侵蚀。

鉴于目前的研究现状,还不可能对分别于临潼试验区和布莱梅材料检验所模拟试验区投入的杀生物剂的作用下定论。但是可以确定,处于表面的霉菌层是一个严重的疏水障栏,这给表层作直接的杀菌处理带来了困难;另外黄土的交换能量也阻碍了杀生物剂的使用效果。因此,有必要检验,能否通过比如两级处理(1. 先浸湿, 2. 使用杀生物剂)来阻止大量霉害的继续扩散,并除掉霉害。与此同时,投入无机的药剂也显得十分迫切,以结束通过使用有机合成杀生物剂向地面继续输入养料的状况。

#### 对结果的暂时性评估

上面描述了对带有加固过的彩绘残块以及二号坑的土壤结构和出土文物的微生物研究的结果,这些结果表明,出土文物和其彩绘层受到了不同程度的微生物侵害。在这种情况下,通过腺苷三磷酸-荧光素酶-试验进行无损测定微生物新陈代谢活动,能够提供有代表性的和更细的结果。这使边治理微生物侵害,边评估修复工作成果成为了可能。

相比之下,在其彩绘已经加固的残片上,只留下很少的微生物侵害的痕迹,而二号坑的土壤结构和出土文物却受到了微生物的严重侵蚀。微生物侵害的范围从生物腐蚀开始,即有机酸的排放,直到生物污垢,即微生物生物膜在分化和分解陶表面彩绘层时产生的力的影响。我们分析出来的微生物具备较强的适应能力(耐旱、需要养料甚微),遇到湿度、温度和表面适当(即有交换能力、含粘土矿物的黄土)的理想生长条件,微生物的控制会变得十分棘手。单方面使用有机合成的杀生物剂,收效无论如何不会长久,这一点已由今日的经验所证实。在现有的土壤结构下,定期施用这种含氮和含碳的基质,反而会重新诱发幸存下来的细菌的生长,使现存的问题变得更加严重。

此外有待证实的是,在黄土里,陶俑表面以及在室内空气能证实的细菌,至少会损坏直接从事挖掘的考



aus, wobei jedoch insbesondere immungeschwächte oder ältere Personen, aber auch Kinder empfindlich auf die nachgewiesenen Pilze und ihre freigesetzten Gifte reagieren können. Pilzsporen gelten darüber hinaus als Inhalationsallergene und mögliche Urheber einer allergischen Alveolitis, d. h. Entzündung der Lungenbläschen (z. B. von *Aspergillus spec.*, *Penicillium spec.*).

### Empfehlungen und zukünftige Forschungsaktivitäten

Beim gegenwärtigen Stand der Erkenntnisse der mikrobiologischen Untersuchungen an den Farbfassungen der Tonkrieger der Terrakottaarmee im Mausoleum des Ersten Chinesischen Kaisers Qin Shihuang in Lintong lassen sich folgende vorläufige Empfehlungen formulieren:

1. Vorsichtige Klimatisierung und Ventilation in den Ausgrabungsbereichen unter Kontrolle der Austrocknungsgeschwindigkeit (Farbfassung).
2. Für die biozide Behandlung der Ausgrabungen wird empfohlen, die Erdstege mit einer desinfizierenden Lösung vorzubehandeln und auf die somit hydrophil gewandelte Bodenoberfläche eine 5-10%ige Boraxlösung aufzubringen.
3. Bei der Reinigung der zu konservierenden Fragmente ist auf eine weitgehende Entfernung der Bodenreste zu achten, da hier ein wichtiger Kontaminationsherd besteht.

Um eine gezieltere und dauerhaftere Konservierung der Lackschichten gewährleisten zu können, sollten folgende Fragen im Rahmen des Forschungsprojektes weiter verfolgt werden:

1. Besitzen die gealterten Lackschichten der Terrakottafiguren nach über zweitausendjähriger Lagerung noch Nährstofffunktion für die nachgewiesenen Mikroorganismen?
2. Welche Rolle spielt der Lößboden beim mikrobiellen Befall der Terrakottafragmente, d. h. ist er Quelle der Kontamination, Nährstofflieferant oder Biozidpuffer?
3. Wird die Wasseraufnahme bzw. Kondensationswirkung der Terrakottaoberfläche durch die hydrophilen, mikrobiellen Biofilme erhöht?
4. Ist die mechanische Schädigung der polychromen Farbschichten durch die Schimmelpilze mittels Videohographie darstellbar?
5. Stellen die zur Konservierung der Farbfassung verwendeten Materialien (z. B. PEG 200, PU, HEMA) neue Nährstoffquellen für die aus den Ausgrabungen angereicherten Mikroorganismen dar?

face supply (this means substitutable, clay-mineral-containing loess soil) make a control of the microorganisms very difficult. The one-sided application of organic synthetic biocides will probably not be successful considering the previous experience made. The regular supply of these nitrogen and carbon containing substrates by the existing ground structure will support a new growth of the surviving microbes, causing the existing problem to become even worse.

Over and above that, it is still necessary to determine if the microbes in the loess soil, on the terracotta surfaces and in the room air represent a danger to the health of the archaeologists working at the excavation sites. Some of the identified fungi are occasionally activators of mycoses, meaning fungal infections (e. g. *aspergillus: aspergillose*). Others belong to the wide-spread polluters of living areas and work areas, which seldom have a pathogenic effect (e. g. *Fusarium spec.*, *Rhizopus spec.*). The individual reactions to fungal spores vary, but immunodeficient or elderly persons as well as children can react sensitively towards the identified fungi and their released poisons. Moreover, fungal spores are also inhalation allergens and possible sources of an allergic Alveolitis which is the infection of the pulmonary alveolus (e. g. caused by *Aspergillus spec.*, *Penicillium spec.*).

### Recommendations and future research activities

The following recommendations apply to the microbiological examinations of the polychromy of the terracotta soldiers in the mausoleum of the First Chinese Emperor Qin Shihuang in Lintong:

1. Careful conditioning and ventilation in the excavation areas while controlling the drying speed with respect to the sensible polychromy.
2. For the biocidal treatment of the excavations it is recommended that the partition walls should be pretreated with a disinfective in order to apply thereafter a 5-10% borax solution on the ground surface, which has become hydrophilic.
3. During the cleaning of the fragments it is absolutely necessary to remove the remaining soil as far as possible due to the high contamination risks.

In order to guarantee a more specific and lasting conservation of the lacquer layers the following questions have to be investigated for this research project:

1. Do the aged lacquer layers of the terracotta sculptures still provide a nutrient function for the identified microorganisms after 2000 years of storage?
2. What influence does the loess soil have during the microbial contamination of the excavated terracotta objects (source of contamination, nutrient supplier or biocidal buffer)?
3. Does the water absorption or condensation effect of the terracotta surface increase due to the hydrophilic, microbial biofilm?
4. Can the mechanical damage of the polychromy layers by contamination be shown with videohography?
5. Do the materials (e. g. PEG 200, PU, HEMA) used for the conservation of the polychromy represent new nutrient rich sources for the microorganisms from the excavations?

(Translated into English by Mark Richter)



古工作者的健康。几种证实的霉菌有时能引起霉菌病，即霉菌感染(如曲霉病)，另外一些分布广泛，会污染居住和工作环境，而很少显示为病原体(如 *Fusarium spec.*, *Rhizopus spec.*)。对霉孢的反应因人而异，特别是抵抗力弱的人和老人以及儿童，对已证实的霉菌及其施放的毒素可能会反应敏感。此外菌孢作为呼吸过敏源，可能引起过敏性肺泡，即肺泡发炎(如 *Aspergillus spec.*, *Penicillium spec.*)。

### 建议及未来的研究工作

在对秦始皇陵兵马俑彩绘层进行的微生物研究中，我们取得了新的认识，鉴于目前的认识水平，暂可提出下列建议：

1. 在挖掘现场应谨慎调节气温和通风，以便控制干燥过程的速度(彩绘层)。
2. 在挖掘现场进行的防霉治理时，建议对土隔梁用消毒液进行预处理，再对吸水性的土地表面喷洒含量为 5-10% 的硼砂液。

3. 在清理要保护的残片时，要注意尽量清除上面的残土，因为残土是主要污染病灶。

为了目标更加明确、更加持久地保护漆层，应在研究项目的范围内继续探讨下列问题：

1. 陶俑的老化漆层在地下埋藏两千多年之后，对发现的霉菌还具有营养作用吗？
2. 在陶俑残片遭到微生物侵害时，黄土起了什么作用，也就是说，它是污染源，养料提供者或是杀生物剂的缓冲剂？
3. 陶体表面的吸水性和冷凝作用会通过亲水的微生物的生物膜得到提高吗？
4. 可以用视频全息摄影来表现霉菌对多层彩绘造成的机械损坏吗？
5. 为保护彩绘层而使用的保护剂(如 PEG200, PU, HEMA)是否构成在挖掘地富集的微生物的新的养料来源？

(德译中：李理；校对：陈钢林)