

Museum of the Terracotta Army

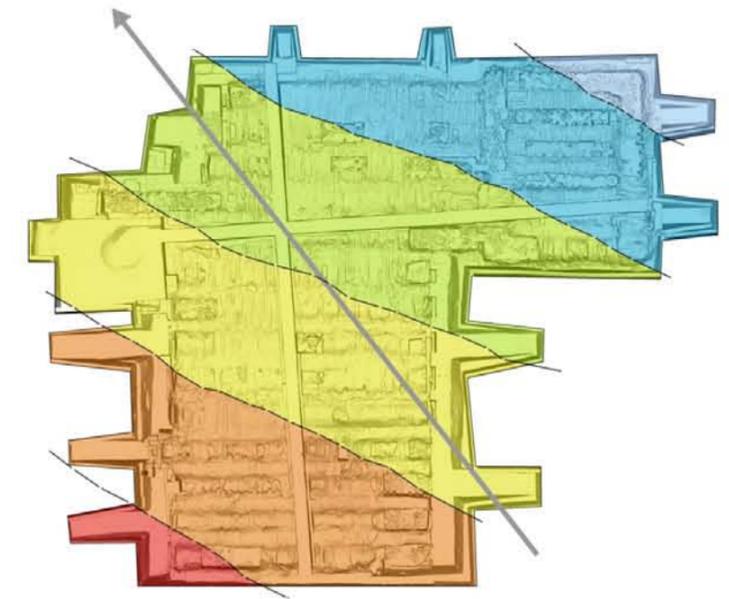
Final Report 2010-2013

BMBF 01UG1001

Klebung der Terrakottafiguren

Investigations and protection measures for the polychrome terracotta fragments, embedded in the drying earth of pit II

Final Report 2010-2013



Museum of the Terracotta Army

Museum of the Terracotta Army

Final report 2010 - 2013

**BMBF Forschungsprojekt / *Research project*
01UG1001**

Technische Universität München,
Lehrstuhl für Restaurierung,
Kunsttechnologie und
Konservierungswissenschaft

Museum of the Terracotta Warriors &
Horses of Qin Shihuang,
Lintong, China

Research Project 01UG1001
„German-Chinese co-operation in the preservation of Cultural Heritage: Researches for the
conservation of selected monuments in the PR China”

Financed by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF)



© Technische Universität München 2014,
Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft
Emperor Qinshihuang's Mausoleum Site Museum

Editor: Technische Universität München
Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft
Oettingenstr. 15, 80538 München, www.rkk.arch.tu-muenchen.de

Head of project: Prof. Erwin Emmerling

Information compiled and texts written by: Linda Zachmann, Rupert Utz in Cooperation
with the German-Chinese Workteam

Photographs: if not mentioned otherwise, taken by the team of TUM

Contents

Abschlussbericht: Klebung der Terrakottafiguren 3 (Linda Zachmann)	3
Reisebericht Lintong 2011-03-21 bis 2011-04-01.....	111
Reisebericht Lintong 2012-08-28 bis 2012-09-12.....	117
Reisebericht Lintong 2013-04-1 bis 2013-04-26.....	125
Final report 2010-2013: Investigations and protection measures for the polychrome terracotta fragments, embedded in the drying earth of pit II: Continuation of the investigations on the drying kinetics and the possibilities for remoistening - investigations for the development of an integral risk mapping (Rupert Utz)	
Part I.....	129
Part II.....	147

Museum der Terrakottakrieger und Pferde des Qin Shihuang



Abschlussbericht 2010 – 2013
Klebung der Terrakottafiguren

Linda Zachmann

Inhaltsverzeichnis

Zur Situation der zerbrochenen Terrakottafiguren	6
Überblick: Maßnahmen in den einzelnen Jahresberichten des Projektes	6
Bisherige und aktuelle Klebungsschwerpunkte	7
Mit der Klebung zusammenhängende Fragestellungen	8
Reinigung der Bruchkanten der Terrakottafragmente	8
Hilfsmittel beim Zusammenfügen der Fragmente	9
Klimasituation vor Ort	13
Die Eigenschaften der Terrakotta als Voraussetzung für eine Verklebung	14
Terrakottamaterial/Gefüge	15
Porosität/Wasseraufnahme	15
Zur Festigkeit der Klebung und des Klebverbindung	17
Zugfestigkeitsmessungen	20
Ergebnisse der Zugfestigkeitsmessungen	23
Die Möglichkeiten zum Fügen der Terrakottafragmente	24
Verklebung mit mechanischen Hilfsmitteln	24
Problemstellungen und Voraussetzungen für Verklebungen	25
Reine Verklebung	26
Verklebung mit in der Restaurierung bewährten Klebstoffen	28
Verklebung mit Primersystemen	32
Reversibilität der Maßnahmen	33
Die modellhafte Klebung einer Terrakottafigur	35
Maßnahmen für die Klebung	35
Der Arbeitsplan	37
Bereits ausgewählte Klebstoffe	38
Vorversuche	39
Überlegungen, Vorgehensweise und Restaurierung einer Terrakottafigur	41
Einrichten des Arbeitsplatzes	42
Dokumentation der Figur TG23G10-26	42
Beschreibung der Figur TG23G10-26	45
Maße und Gewichte	45
Farbfassung	45
Verfärbungen, Arbeitsspuren und Techniken	48
Das Vorgehen beim Zusammenbau	51
Das Vorgehen bei der Klebung	54
Die Dokumentation der Klebstoffsysteme und Fragmente	58
Problemfälle Beine, Bodenplatte und Hand	67
Der Umgang mit fehlenden Fragmenten	70
Aufbewahrung und Lagerung	72
Bewertung und Ausblick	74
Literatur	78
Anhang	80
Tabelle: Klebemiteinsatz und -techniken für großformatige Keramik-/Steinfiguren	
WeltweitAnforderungskatalog (Bucher 2010, Kurzfassung Zachmann)	
Überblick Zugfestigkeitsmessungen (Auswertung und Abbildungen)	
Tabelle: Klebemittelliste Überblick	
Tabelle: Fragmentgewichte	
Dokumentation der Farbfassung	
Information: Use of MowitalB30H	
Übersetzung: Informationsblatt chinesisches Epoxidharz	
Tabelle: Brenntemperaturen von Prüfkörpern aus Sektor T23G9 (Grube 1)	
Informationen zum Chinesischen Epoxidharz	
Überblick: Festigkeitsmessungen chinesischer Klebstoffe	
Grube 1: Lageplan: Fundsituation Terrakottafigur im Sektor 23	

Zur Situation der zerbrochenen Terrakottafiguren

Von den ca. 7300 zerbrochenen, lebensgroßen Terrakottafiguren aus der Grabanlage des ersten chinesischen Kaisers sind bereits in den ersten zwei Jahren nach ihrer Entdeckung im Jahre 1974 tausend Figuren geklebt und in der ursprünglichen Grube (pit no. 1) wiederaufgestellt worden.¹

Seit 1990 wird im Rahmen des vom BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF) geförderten Projektes mit dem Museum der Terrakottakrieger und Pferde des Qin Shihuang über eine verbesserte Klebung der Figuren nachgedacht und geforscht.² Seit 1998 bis heute ist die Verklebung der Terrakottabuchstücke mit Unterbrechungen ein Schwerpunkt im Kooperationsvertrag. Untersuchungen zu den Eigenschaften der Terrakotta und den Herstellungstechniken der Figuren wurden als Voraussetzung für eine optimierte Klebtechnik ausführlich bearbeitet. Workshops und Untersuchungen zu Reinigungsmaßnahmen, Verklebungstechniken und zur Auswahl von geeigneten Klebmitteln wurden mit Hilfe einer Kopie eines Kriegers, deren Bruchstücken, nachgebrannter Terrakottaprüfkörper und originaler Fragmente durchgeführt.

Aufgrund der vielfältigen Ansprüche an ein geeignetes Klebmittel, der Voraussetzungen für eine Anwendung vor Ort und insgesamt der Singularität der Problemstellung konnte bis heute kein Klebmittel empfohlen werden.

Eine Zusammenstellung der bisher unternommenen Arbeiten und Probleme sollen einen Überblick geben. Darauf aufbauende Untersuchungen und Maßnahmen seit 2011 und die Arbeitsaufenthalte vor Ort bis 2013 zeigen mögliche Lösungen auf.

Überblick: Bisherige Maßnahmen anhand der einzelnen Jahresberichte des Projektes

Jahresbericht 1998

S. 50: Herstellung einer ersten Reihe Terrakottaprüfkörper zum Vergleich der Bruchfestigkeit von mit und ohne PEG behandelten Prüfkörpern. Erste Tests zur Verklebung mit Archäocoll und Fynebound.³

Jahresbericht 1999-2000

S. 100: Ausführlicher Bericht zur Beschreibung der Terrakottafiguren, über deren Produktions- und Herstellungstechniken und die grundsätzlichen Probleme des Terrakottamaterials, ihres Zustandes und restauratorischer Lösungsmöglichkeiten.⁴

S. 124: Untersuchungen zur Textur und den mechanischen Eigenschaften der Terrakotta und der Kopie eines Kriegers mit Dokumentation der Fragmente (u. a. Zugfestigkeit).⁵

¹ BLÄNSDORF, CATHARINA/UTZ, RUPERT: *Untersuchungen zur Terrakotta und zum Kleben der zerbrochenen Figuren aus der Grabanlage des Qin Shihuangdi*, in: *Der Vergangenheit eine Zukunft geben, 15 Jahre deutsch-chinesische Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur Erhaltung von Kulturgut*, Berlin 2006, S. 86-97, S. 90.

² BLÄNSDORF/UTZ 2006, S. 90.

³ UTZ, RUPERT; RONG, BO; ZHANG, ZHIJUN; ZHOU, TIE: "Tests concerning the gluing of terracotta fragments"

⁴ BLÄNSDORF, CATHARINA "Assembling of the broken terracotta figures from the burial complex of Qin Shihuang".

S. 172: Bericht über den Workshop in München 1999 bei dem verschiedene Möglichkeiten zum Verkleben in Verbindung mit mechanischen Verbindungen getestet und bewertet wurden, sowie einem Überblick über Klebmittel zur Restaurierung von Terrakotta.⁶

Jahresbericht 2001-2002

S. 94: Herstellung geeigneter Terrakottaprüfkörper im Hinblick auf Porosität, Wasseraufnahme, Komponentenzusammensetzung und Brenntemperatur.⁷

S. 97: Zusammenfassung und vervollständigte Ergebnisse zu den mechanischen Eigenschaften der Terrakotta des Jahresberichtes 1999-2000.⁸

Jahresbericht 2003

S. 57: Workshop zur Erprobung verschiedener Reinigungs- und Klebungsmaßnahmen an der Terrakottakopie zusammen mit chinesischen Restauratoren.⁹

S. 65: Workshop zu Versuchen mit Air-brush Reinigung: Kantenreinigung und Reinigung von farbig gefasster Terrakotta.¹⁰

Jahresbericht 2004, 2005 und 2006 enthalten keine Aufsätze zur Terrakottaklebung

Jahresbericht 2007-2009

S.9 Unter der ausführlichen Behandlung „Klebung der Terrakotta“ finden sich 7 Aufsätze zu: Zusammenfassung zur Geschichte und Restaurierung der Terrakottaarmee, Klebmitteln in der Keramikrestaurierung allgemein, Testreihen zur Klebung der Terrakottafiguren und ein Anforderungskatalog für einen „idealen“ Klebstoff.¹¹

Bisherige und aktuelle Klebungsschwerpunkte

Für die Lösung des Problems der Wiederzusammenfügung der Terrakottabuchstücke finden sich zu verschiedenen Zeiten verschiedene Schwerpunkte. Im Folgenden sollen diese mit den bis heute erreichten Lösungen zusammenfassend dargestellt und bewertet werden.

⁵ UTZ, RUPERT: „Investigation on the texture and on the mechanical properties of terracotta fragments from the museum of the terracotta warriors and horses in Lintong“

⁶ WALLNER, STEPHANIE: „Test series for the assembling of terracotta figures carried out on a replica of a warrior“

⁷ BATHOLT, DANIELA: „Reproduction of the ancient terracotta used for the terracotta army“.

⁸ UTZ, RUPERT: „The hygric and mechanic properties of Qin terracotta 2002 – Complementary investigations to the results presented in the annual report 1999-2000“.

⁹ BLÄNSDORF, CATHARIN; BATHOLT, DANIELA: „Workshop on assembling and gluing broken terracotta statues, Munich, Oct. 6-16, 2003“.

¹⁰ BLÄNSDORF, CATHARIN; STEINEGGER, STEPHANIE: „Workshop on air-brush cleaning of fracture edges and polychrome surface of terracotta fragments from the Terracotta Army“.

¹¹ BUCHER, SANDRA: „Optimierung der Klebung von gefassten und ungefassten Terrakottafiguren“; „Versuche zur Verklebung von Terrakottabuchstücken vom Projektbeginn bis heute“; „Klebstoffe in der Keramikrestaurierung“; „Praktische Klebeversuche“; „Sandwichmethode, Klebetest und Zusammenfügen der Fragmente“; „Zur Klebetechnik der zerbrochenen Figuren der Terrakottaarmee“; „Auswertung des Anforderungskatalogs“ .

Mit der Klebung zusammenhängende Fragestellungen

Durch die vor Ort gegebenen Bedingungen (wie die relativ hohen Klimaschwankungen der unklimatisierten Ausgrabungshalle, das Wiederzusammenfügen der Figuren im Arbeitsbereich der Gruben und die große Anzahl an unterschiedlich schweren und großen Fragmenten) beschäftigte man sich von Anfang an nicht nur mit der Suche nach einem geeigneten Klebstoff, sondern auch mit der Vorbereitung der Scherben (Reinigung) auf die Klebung, sowie passenden Hilfsmitteln, die bis zum Aushärten des Klebstoffes die Scherben in der richtigen Position halten sollen.

Reinigung der Bruchkanten der Terrakottafragmente

Die Entfernung von Erde, Verkrustungen und Pflanzenresten und der gleichzeitige Erhalt sauberer Bruchkanten stellt eine zeitintensive Arbeit dar und bedeutet den ersten Schritt für einen perfekten Wiederzusammenbau. Bereits 0,2 mm sind genug, um für eine merkliche Verschiebung bei dem kompletten Zusammenbau einer Figur zu führen (Bsp. Marmorskulptur: JORJANI 2009, p. 24), mit 0,1 bis 0,3 mm ist bei so einer Figur in jedem Fall zu rechnen¹², in Lintong liegen die Maße weit darüber. Bisher wird mit 75%iger Ethanollösung dreimal¹³, oft auch mit Wasser, Bürsten und Skalpell in mehreren Gängen gereinigt.

Bei dem Workshop 2003 stellte sich heraus, dass mit der Air-brush-Methode¹⁴ eine gute und effektivere Reinigung der mit Erde verkrusteten Bruchflächen möglich ist, ohne die gefassten Oberflächen zu beschädigen oder durch Feuchte zu beeinträchtigen. Allerdings muss zusätzlich an manchen Stellen mechanisch mit dem Skalpell oder Pinsel nachgearbeitet werden, wie es auch bis heute in den Gruben des Museums üblich ist.¹⁵ Diese Werkzeuge haben den Nachteil, solange die Scherben noch erdfeucht sind, die niedrig gebrannte Terrakottaoberfläche zu verkratzen bzw. abzurunden, so dass danach eine schlechtere Passgenauigkeit der Bruchstücke vorliegt. Auch die Versuche, die farbigen Oberflächen zu reinigen, können bei einer intakten Fassung besser geeignet sein als die herkömmliche mechanische Reinigung.

Eine weitere Möglichkeit kann das Feinstrahlen der Bruchkanten sein. Ein Versuch an einer der originalen Scherben wurde 2011 in Wien am NATURHISTORISCHEN MUSEUM von der Keramikrestauratorin Gergana Kleinecke mit gutem Erfolg durchgeführt (Abb. 1; 2).¹⁶ Die Bruchkanten ließen sich mit Korund (Aluminiumoxid, 125 µm) bei niedrigem Druck sehr gut reinigen. Die Oberflächen wurden mit Glasperlen (Durchmesser: 40 bis 80 µm) behandelt. Bei frisch ausgegrabenen Bruchstücken müssten eventuell weniger abrasive Materialien verwendet werden, bei eventuell erhaltener Farbfassung schließt sich diese Methode aus. Farbfassungsreste sind allerdings auf allen bereits getrockneten Figurfragmenten kaum noch zu finden. Viele der zum Zusammenbau an die Restauratoren übergebenen Figuren, gerade einfachere Krieger, sind allerdings bereits in einem solchen Zustand.

¹² siehe PODANY 2009.

¹³ ARCHÄOLOGISCHES INSTITUT DER PROVINZ SHAANXI: *Kaogu Yu Wenwu/Archaeology and Cultural Relics*, 5, 2005, ISSN: 1000-7830, p. 86 -92, S. 91.

¹⁴ Anwendung mit warmem Wasser, Einweichzeiten erleichtern die Entfernung härter Krusten, der Druck kann 6-8 bar betragen. (BLÄNSDORF, CATHARINA; BATHOLT, DANIELA: „Workshop on assembling and gluing broken terracotta statues, Munich, Oct. 6-16, 2003“ in: BMBF-Forschungsbericht 2003, S. 68 f.)

¹⁵ Vor dem Einsatz mechanischer Hilfsmittel werden die Scherben momentan mit einer Alkoholwassermischung und Wattestäbchen gereinigt (seit Besuch Februar 2011).

¹⁶ Der Besuch diente dem Erfahrungsaustausch zu Klebtechnik und Reinigung. Das Scherbenbruchstück war wahrscheinlich schon einmal mit einer Stahlbürste behandelt worden, besaß aber trotzdem noch anhaftende Erde.

Grundsätzlich verfügen die chinesischen Restauratoren über eine Strahlkammer in ihren Werkstätten, allerdings fehlt eine passende Abdeckhaube, so dass das Gerät bis heute nicht zum Einsatz kommt und weiterhin nass gereinigt wird.



Abb. 1: Bisher nur mechanisch gereinigtes originales Terrakottabruchstück



Abb. 2: Originales Terrakottabruchstück nach der Behandlung mit dem Feinstrahlgerät

Hilfsmittel beim Zusammenfügen der Fragmente

Zusammengehörige und markierte¹⁷ Fragmente (Abb. 3) einer Figur werden vor dem endgültigen Zusammenkleben trocken zusammengesetzt, um die Passgenauigkeit zu prüfen. Bereits hier sind Hilfsmittel zur Fixierung notwendig, die auch später zum Aushärten während des Klebens eingesetzt werden.

Oft werden zuerst einzelne Abschnitte wie Rumpf, Kopf, Arme, manchmal auch Beine partiell zusammengeklebt. In Sandbetten oder in Metallgestellen positioniert, helfen Schnüre, Bänder und dazwischen geklemmte Unterstüztungen, die frisch geklebten Abschnitte einzuspannen. Bei den Pferden wird der Körper ohne die Beine im Sandbett bearbeitet und die Beine separat geklebt. Im Anschluss werden sie an den auf einem höhenverstellbaren Metallgestell gelagerten Körper, der somit keinen Druck auf die Beine ausübt, geklebt. Mit Hilfe von verdrehten Stöcken an den (Zug-)Bändern kann die Spannung beim Zusammenhalten der Fragmente, besonders der in Ringen geklebten Körper und Schultern erhöht bzw. eingestellt werden. Sie wirken wie Spanngurte (z.B. Abb. 4).¹⁸ Zusätzlich sind auch Klettverschlussbänder verschiedener Größen geeignet. Gepolsterte und von unten eingeklemmte Holz-T-Träger unterstützen abstehende Arme oder Schultern während des Aushärtens. Nützlich sind auch passend zugeschnittenen Polyethylenschäume („Ethafoam“, „Plastazote“), wie sie seit dem Workshop 2003 eingesetzt werden.¹⁹

Für die Klebung einer Terrakottafigur 2012 in den Werkstätten des Museums wurde zusätzlich geplant, als Hilfsmittel vakuumierbare Verpackungskissen der Firma Poly-pad®²⁰ auszuprobieren (Abb. 51, 96). Diese wurden speziell für den Transport von Kunstwerken entwickelt. Es handelt sich um EPS-Kügelchen in einer Polyurethanhülle. Die Vaccumpads lassen sich nach einfacher Vakkumierung mit einer Pumpe stabilisieren und an komplexe Strukturen von Fragmentoberflächen formschlüssig anpassen. Während des Zusammenbaus können die Kissen temporär stützend wirken, während des Aushärtens perfekt die jeweilige

¹⁷ Frühere Markierungen mit schwarzer Farbe oder auch Gips (BLÄNSDORF in: BMBF-Forschungsbericht 1999/2000, S. 110), heute verschiedenfarbige Kreiden.

¹⁸ BLÄNSDORF in: BMBF-Forschungsbericht 1999/2000, S. 100; Besuch der Gruben 26.6.-5.8.2010.

¹⁹ BLÄNSDORF/STEINIGER in: BMBF-Forschungsbericht 2003, S. 60.

²⁰ Entwicklung durch die Restauratorin Regina Fröhlich, erhältlich unter: www.poly-pad.com.

Scherbenformation unterstützen und als flexibel anpassbare Transportunterlage bei bereits fertig geklebten Figuren oder Teilen davon dienen. Vorteile sind die individuelle Anpassung an verschiedene Figurentypen und ihre Wiederverwendbarkeit. Die Vakuumpads sind nicht für die dauerhafte Verwendung geeignet, die Vakuumierung unter Belastung sollte am nächsten Tag überprüft werden. Meist reichen bereits 24 Stunden zum Aushärten der Klebstoffe aus.

In großem Maßstab können die Vakuumpads für den Transport von Figuren zwischen Deopot und Werkstätten oder Grube dienen. Dies gilt nur, wenn es durch fehlende Teile nicht möglich ist, die Figuren im belastungstechnisch günstigeren Stehen zu transportieren. Vorsicht ist bei scharfen Kanten geboten, welche die Polyurethanhülle beschädigen können, weshalb beim Arbeiten mit Druck zwischen Hülle und Fragment eine Zwischenschicht aus Schaumstoff oder zumindest Seidenpapier untergelegt werden sollte.



Abb. 3: Noch im Ausgrabungsbereich der Archäologen: sortierte, markierte, mit Folie geschützte, gefasste Fragmente



Abb. 4: Mit Bändern und Stock eingespannte Teilfigur im Ausgrabungsbereich

Zusätzlich sollten die bereits in Lintong verwendeten Metallgestelle zum Kleben der Figuren weiterentwickelt werden. Als Vorbild könnten²¹ aber auch die im Laborbereich in kleinerem Maßstab eingesetzten Stativmaterialien mit unterschiedlich verstellbaren Stäben und (Dreifinger-) Klemmen dienen. Die Firma HAVARD APPERATUS²² bietet solche Systeme, bei denen auch Befestigungsstäbe mit Kugelabschluss bezogen werden können, die einen fast uneingeschränkten Einstellwinkel ermöglichen. Diese könnten an den vorhandenen Gestellen befestigt werden oder es wird eine Grundplatte mit zwei bis vier Metallrohren in den Ecken entworfen, an denen solche Stäbe mit entsprechenden Endstücken beliebig verschiebbar befestigt werden können. Zusätzlich sollten stabile, verstellbare Querverbindungen zwischen den vier Eckmetallen für die Stabilität der Figuren sorgen. Im Falle der vorhandenen Gestelle sind zwei Holzquerbalken mit Flügel und Mutterverbindungen so einzustellen, dass eine Figur mit dünnerem oder dickerem Querschnitt eingespannt werden kann (z.B. Abb. 7,8)

Die Bodenmetallplatten sollten nach dem Zusammenbau einer Figur direkt als Transportplatte benutzt werden, ohne die Figur umstellen zu müssen. Vor Ort ist es häufig nötig Figuren zu versetzen und um zu positionieren. Ist die Figur vollständig mit ihren Beinen geklebt, ist ein aufrechter Transport die mechanisch günstigste Variante, in der die meisten Figuren in der Grube auch wiederaufgestellt werden. Trotzdem sollten Stöße durch Abstellen vermieden oder Belastungen durch erneutes Umsetzen so wenig wie möglich durchgeführt werden.

Unterschiedlich große und hohe Gestelle für verschieden große und breite Figuren könnten sinnvoll sein. Eine zu starke Spezialisierung eines Gestells für eine bestimmte Figur, wie sie für

²¹ Die Idee wurde in der Archäologischen Staatssammlung München besprochen.

²² Beispiel unter: http://www.harvardapparatus.com/webapp/wcs/stores/servlet/haicat3_10001_11051_37588_-1_HAI_Categories_N_37582_37583.

Einzelkunstwerke in Europa oftmals hergestellt werden, scheint für die chinesischen Werkstätten weniger sinnvoll zu sein, da mit zu vielen Arbeitskräften an mehreren Figuren gleichzeitig gearbeitet werden kann. Längere Trocknungszeiten kleinerer Bereiche sind somit kein Problem. Ebenso kann eine individuelle und handgefertigte Stützkonstruktion für eine spezielle Problemstellung schneller von den Mitarbeitern angefertigt werden, als eine bereits im Vorfeld geplante²³, normierte Konstruktion.²⁴

Anders stellt sich das für immer wieder gebrauchte kleinere Hilfsmittel dar. Bei der Verklebung von Fragmenten des Torso, deren Scherben drohen in den Innenraum gedrückt zu werden, sobald Druck auf den geklebten Ring von außen ausgeübt wird, hilft nicht nur das Ausstopfen mit z.B. dem Vakuumpad (das zudem angepasst werden kann) sondern auch eine einfache Gewindestange mit größeren, gepolsterten Auflageflächen am Ende, die im entsprechenden Abstand eingespannt werden können (Abb. 52).

Bei dem Zusammenbau der Figur haben sich die KLEMSIA Zwingen verschiedener Tiefen aus Holz mit Auflagen aus Filz als sehr geeignet herausgestellt, da sie bei hoher Leichtigkeit noch genügend Druck auf die meist runden Flächen ausüben können.



Abb. 5: Ergebnisse geklebter Terrakottafiguren des letzten Jahres, Grube 1, März 2011

²³ Evtl. müssen diese Zwingen in Deutschland bestellt werden.

²⁴ So arbeiten an den Figuren aus Grube 1 im Durchschnitt zwei bis drei Restauratoren und dauerhaft weitere acht bis zehn Mitarbeiter.



Abb. 6: Arbeitsbereich mit Sandbett (v.l.) zum Kleben in Grube 1, März 2011



Abb. 7, 8: Beispiele von weiter modifizierbaren Metallgestellen als Einspannhilfen mit zwei verschiebbaren, arretierbaren Querhölzern (rechts: im Sandbett), Grube 1, April 2013

Klimasituation vor Ort

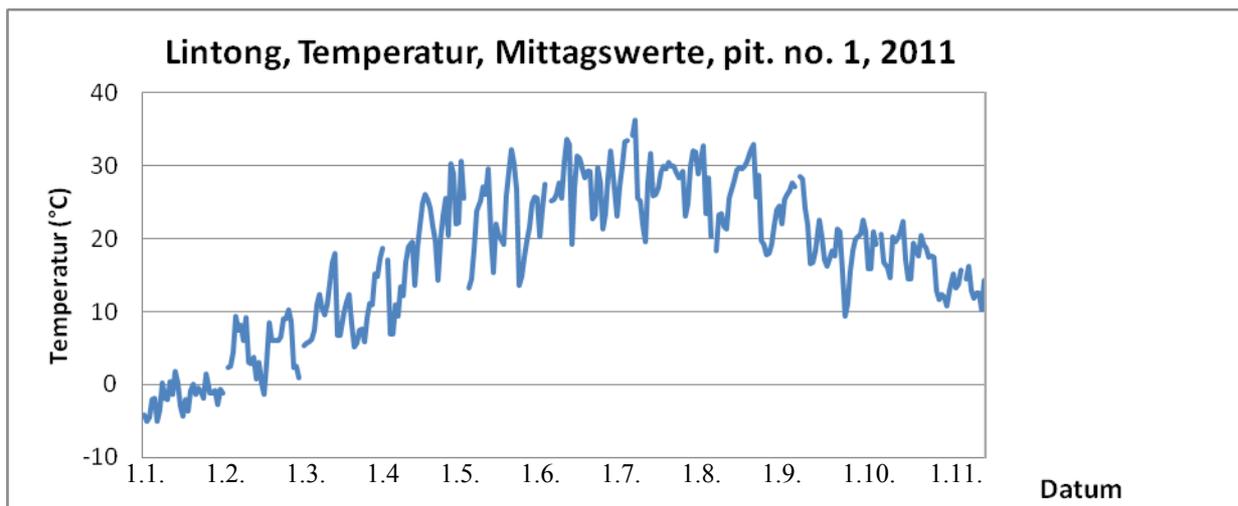


Abb. 9: Akrobatengrube K9901 mit gläsernem Werkstattbereich, August 2012



Abb.10: Beamtengrube K0006 mit großen Klimaproblemen, Fertigstellung des Museumbaus 2012

Die Restaurierung der Figuren findet teilweise in der Werkstatt des Museums statt. Obwohl es keine Klimaanlage gibt und im Winter nur wenig geheizt wird, herrschen dort im Gegensatz zu den Restaurierungsarbeiten in den Gruben die besten klimatischen Bedingungen²⁵. Die über der Grube 1 errichtete Halle schützt die archäologischen Ausgrabungen nur vor Regen, die Museumsbauten über Grube 2 und 3 auch vor Sonne. In der seit 2011 mit einem Museumsbau versehenen Akrobatengrube K9901 ist zusätzlich ein verglaster Arbeitsbereich mit einem Nebenraum zum Lagern der Figurenfragmente integriert, der weniger vom Außenklima abhängig ist, allerdings zeigte die Decke bereits 2012 starke Wasserschäden an Regentagen. Auch in den neu errichteten Beamtengrube K0006 zeigen sich bereits starke Risse in den Erdschichten von den Klimaanlage, die auf die Besucher eingestellt sind. In Grube 1 schwankt das Klima innerhalb eines Jahres am stärksten, nicht einmal Frost ist auszuschließen.²⁶ Maximaltemperaturen erreichten in Grube 1 im Jahr 2011 bis ca. 36°C, rel. Luftfeuchtigkeiten lagen zwischen 40% bis 95%. Minimaltemperaturen konnten zwischen 0°C bis - 4°C liegen.²⁷ Auch wenn im Winter nicht durchgehend gearbeitet wird, sollten die in den Gruben eingesetzten Materialien nicht nur unter Laborbedingungen einsetzbar sein.

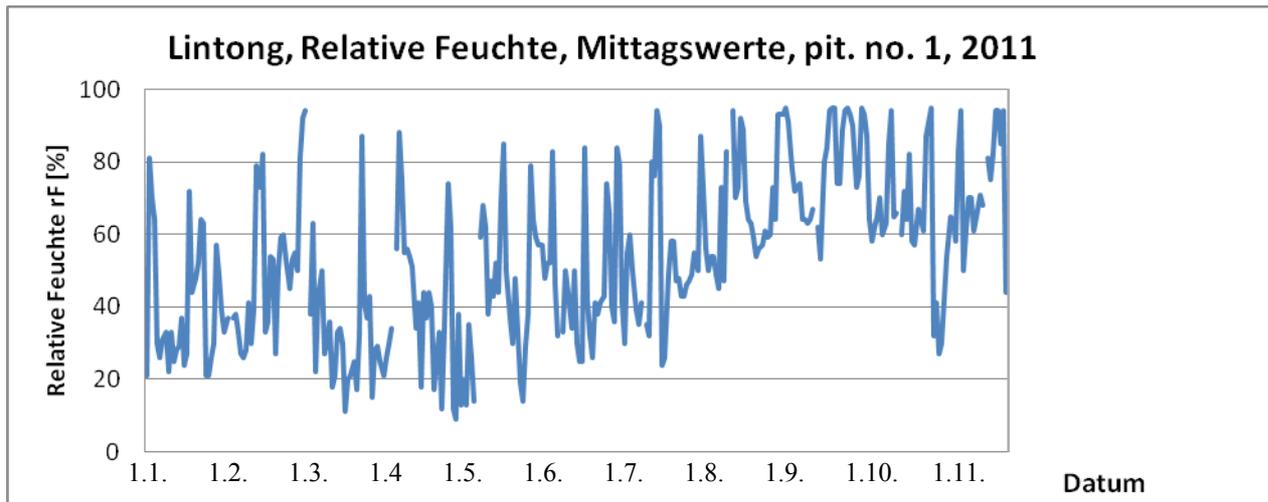


Tab.1 : Mittagsmesswerte der Temperatur um 12.00 jeden Tages 2011 in Grube Nr. 1

²⁵ Die Werkstattfenster sind nach Norden gerichtet.

²⁶ Spitzenwerte der Außentemperaturen liegen bei 45°C und -10°C (UTZ, RUPERT: Stabilisierung von Lösslehmoberflächen in Archäologischen Grabungen am Beispiel der Terrakottaarmee des *Qin Shihuangdi*, Dissertation, LMU München, 2004., S. 11).

²⁷ Die unausgewerteten Excel-Klimatabellen stammen von Rong Bo (Museum der Terrakottaarmee).



Tab.2 : Mittagmesswerte der relativen Feuchte um 12.00 Uhr jeden Tages im Jahr 2011 in Grube Nr. 1

Die Eigenschaften der Terrakotta als Voraussetzung für eine Verklebung

Bereits zu Beginn der Kooperation wurden gezielte Fragestellungen an das Terrakottamaterial gestellt.²⁸ Neben der Qualität des Scherbens und seines Erhaltungszustands spielen die Eigenschaften für eine Wiederverklebung bzw. auch für das Einbringen von Dübeln oder anderen mechanischen Verstärkungen eine Rolle.

Gefüge/Terrakottamaterial

Alle Figuren bestehen aus hellgrauem Lehm mit definierten Mengen Flußsand, dessen Zusammensetzung der Lößerde aus der Umgebung in Lintong entspricht.²⁹ Ein reduzierender Brand sorgte bei wahrscheinlich 950 bis 1000°C³⁰ für die Farbgebung. Die graue und bei einigen Bruchstücken rote, da nachgebrannte Terrakotta, besitzt ein einheitlich homogenes Gefüge³¹. Im Gegensatz dazu zeigen die weniger qualitätvollen, splittrigeren Bruchstücke der modernen Kopie zwar einen ähnlichen, aber sehr viel feineren Aufbau mit mehr Rissen. Neben der für Testzwecke benutzten Kopie kommen für die Klebversuche speziell hergestellte Terrakottaprüfkörper zum Einsatz. Die seit 2001 benutzten Prüfkörper wurden 2011 für eine höhere Festigkeit und weitere Tests nochmals bei 950° nachgebrannt.³² (siehe „Festigkeit“)

²⁸ Messungen: Wasseraufnahme, Bohrwiderstand, Ultraschall des strukturellen Aufbaus, Zugfestigkeiten, mikroskopische Untersuchung, Utz in: BMBF-Forschungsbericht 1999/2000, S. 124-171; BMBF-Forschungsbericht 2001/2002, S. 97-102.

²⁹ Utz in: BMBF-Forschungsbericht 1999/2000, S. 104.

³⁰ Angabe vom Museum der Terrakottaarmee. Die Untersuchungen dazu wurden von der CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, teilweise in Xi'an, teilweise in Shanghai durchgeführt. Eine Tabelle zu gemessenen Brenntemperaturen von Rong Bo befindet sich im Anhang.

³¹ Ein Feuer 206. v. Chr. sorgte für einen zweiten Brand einiger Scherben. Die dadurch weniger vorhandenen aktiven Tonminerale sorgen für eine leicht geringe Wasseraufnahme, die roten Scherben sind teils leicht verzogen und weniger passgenau.

³² Erster Brand: BATHOLT in: BMBF-Forschungsbericht 2001/2002, S. 94-96, Zweiter Brand zur Festigkeitsverbesserung: Februar 2011: oxidierender Brand im Keramikofen der Keramikerin Frau Stiegler, München. Maße der Prüfkörper: Quader: 73 x 36 x 27 mm; Rechtecke: 26 x 36 x 36 mm.

Kriterien	„Original“/Lintong-Terrakotta	Terrakottaprüfkörper	Moderne Kopie eines Terrakottakriegers
Matrix	70% Phyllosilikate und Eisenhydroxide, 30% Quarz (Durchschnitt: 0,3 mm)	Lehm der Firma GIMA 575 II sekundär	Sehr fein, über 15% Quarz, Phyllosilikate (unter 0,03mm)
Komponenten/ Zuschlag	5-10% Quarz, Plagioglas, Mikroklin (Durchschnitt: 0,3 mm)	10% Quarzsand 0,2-0,7 mm	unter 5% Quarz, Plagioglas, Steinbruchstücke
Porosität (Volumenprozent)	30 Vol.-%	30,3 Vol.-% (2001)	10 Vol.-%, nicht sichtbar im Lichtmikroskop
Wasseraufnahmekoeffizient	1-15 kg/m ² h ^{0,5}	W-Wert: 8,7 kg/m ² h ^{0,5} (2001)	
Brandtemperatur	950 – 1050°C (Reduzierender Brand) [aus: Shaanxi Sheng 1988] Neuere Untersuchungen: durchschnittlich um 940°C (Rong Bo, Auskunft 2012)	800°C erster Brand (2001) 950°C zweiter Brand (2011)	

Tab.3 : Überblick über die Eigenschaften der Terrakotta aus Lintong und der Testmaterialien

Porosität/Wasseraufnahme/Benetzung

Für eine optimale Klebung ist neben dem stabil erhaltenen Gefüge auch die Porosität und Wasseraufnahme relevant (Tabelle 3). Die Porosität der Originalterrakotta ist mit ca. 30 Volumenprozent ähnlich der der nachgebrannten Terrakottaprüfkörper.³³ Trotzdem ist ein unterschiedliches Aufsaugen von Wasser bzw. eines Primers festzustellen³⁴, während die Prüfkörper Wassertropfen sofort aufsaugen, befindet sich beim Original eine dünne Wasserschicht bis zu 4 Minuten auf der Oberfläche. Deshalb müssen exakte Konzentrationen für Primeraufträge abschließend an originalen Bruchflächen vor Ort getestet werden. Dabei darf der Auftrag nicht zu dick sein, da sonst der Primer eine eigene Klebschicht bildet. Grundsätzlich wirkt bei poröser Terrakotta neben der spezifischen Adhäsion (deren Wirkungsbereich bei ca. 0,2 bis 1 nm liegt) besonders die mechanische Adhäsion, eine formschlüssige Verankerung der Klebschicht in den Poren, Kapillaren und Hinterschneidungen.³⁵ Wichtig dafür ist eine ausreichende Benetzung der Fügeiteiloberflächen, damit die Kräfte überhaupt wirken können. Ein zu flüssiger Klebstoff führt zu nicht ausreichenden Klebschichtdicken, da zu viel Klebstoff in die Poren eindringen kann oder von den Kapillarkräften „eingesaugt“ wird (sog. „Wegschlagen“). Vorteilhaft ist deshalb ein zweimaliger Auftrag des Klebstoffes oder eines Primers, um die Klebflächen ausreichend zu benetzen und die Poren so zu versiegeln, dass eine ausreichende Menge Klebstoff in der Klebfuge verbleibt.³⁶

Das Benetzungsverhalten wurde im Vergleich sowohl an der Originalterrakotta als auch den Prüfkörpern mit ausgewählten Primerkonzentrationen getestet. Mit der Pipette wurde tropfenweise Mowital B30H 17%ig, 10%ig, 5%ig und Paraloid B72/Paraloid B44 17%ig (7:3)

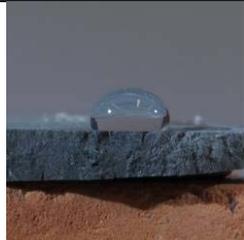
³³ BMBF-Forschungsbericht 1999/2000, S. 140.

³⁴ Beobachtungen an Probestücken unter dem Auflichtmikroskop mit Wassertropfen.

³⁵ Sie sind im Wesentlichen durch chemische, physikalische und thermodynamische Gesetzmäßigkeiten verantwortlich für die Ausbildung von Adhäsionskräften, also der Haftung der Klebschicht an der Fügeiteiloberfläche (HABENICHT 1997, S. 293).

³⁶ HABENICHT, GERD, "Kleben, Grundlagen, Technologie, Anwendungen". 3., Berlin. 1997, S. 647 f.; SCHÄUFELHUT in: BMBF-Forschungsbericht 2000, S. 74.

auf die beiden gleich vorbereiteten Prüfkörper aufgebracht, zeitgleich fotografiert und der Randwinkel abgeschätzt (Tab. 4).³⁷

Tab. 4.: Testkörper (oben) und Lintong-Terrakotta (unten) mit Primertropfen (von links nach rechts):			
Mowital B30H 17%ig,	10%ig,	5%ig,	Paraloid B72/44 (17%ig)
			
Randwinkel $\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 25^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 20^\circ$
			
$\alpha = 100^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 35^\circ$

Grundsätzlich zeigt der Prüfkörper eine bessere Benetzung als die Lintong Probekörper, so dass die Primer dafür niedriger angesetzt werden müssen. Dies sollte allerdings nochmals an weiteren Probeflächen vor Ort getestet werden. Optimale Benetzungswinkel liegen bei $\alpha < 30^\circ$.³⁸ Bei $\alpha > 90^\circ$ kann die Benetzung als unvollständig gelten. Die 17%ige Mowital B30H Mischung ist als zu stark konzentriert anzusehen, auch der ausgehärtete Film ist zu dick. Alle anderen Primer weisen eine gute Benetzung auf, auch wenn die 10%ige Mowital B30H Mischung mit einem Randwinkel von ca. 40° an der Obergrenze liegt.

Für die weiteren Tests mit den Prüfkörpern scheinen die 17%ige Paraloid-Mischung und eine 5 bis 10%ige Mowital-Mischung geeignet. Die Auswertung der aufgetrockneten Tropfen kurz nach dem Auftrag lassen sich in die Bewertung mit einbeziehen (Abb.: 11, 12), stark glänzende, erhabene Schichten sind zu hochkonzentriert, zu weit auslaufende Tropfen zu niedrig. Für die Terrakotta aus Lintong sollten die Konzentrationen insgesamt etwas niedriger liegen als bei den Prüfkörpern.

³⁷ Präzisere Messungen wären mit einem Goniometer/Randwinkelmessgerät möglich, sind aber nicht notwendig.

³⁸ HABENICHT 1997, S. 310.



Abb. 11: Lintong-Terrakotta mit aufgetrockneten Tropfen



Abb. 12: Prüfkörper mit aufgetrockneten Tropfen

Zur Festigkeit der Klebung und der Klebverbindung

In der Restaurierung und der Restaurierungsfachliteratur wird der Begriff Festigkeit bei der Suche nach einem passenden Kleb- oder Ergänzungsmaterial diskutiert (wie fest muss bzw. darf das neu eingebrachte Material sein?), teilweise gewertet (vergleichsweise geringe/mittlere Festigkeit), meistens aber nicht mit Messwerten belegt.³⁹

Inzwischen wird festgestellt, dass viele üblich eingesetzte Klebmittel eine sehr viel höhere Festigkeit aufweisen als benötigt: „most [epoxies] are stronger than necessary for the applications to which the conservator puts them“ (PODANY u.a. 2001, p. 3)⁴⁰

„A product should be slightly weaker than the object to which it is applied.“ (HORIE, p.106)⁴¹

Grundsätzlich gilt auch der Ansatz der gleichen Eigenschaften von neu eingebrachtem und ursprünglichem Material:

„Conventional wisdom in art conservation suggests that repair materials such as pins or adhesives should have similar properties (such as strength and modulus) to the substrate.“ (RICCARDELLI 2011, p.1)

Der Idealfall – ein Kohäsionsbruch in der Klebschicht – tritt praktisch nie ein, auch wenn die Festigkeiten der Klebmittel unter der Festigkeit der Terrakotta liegen. Über Versuchsbeispiele mit Marmor berichtet Riccardelli: „Although the fracture energy of the [adhesive] [...] tested to be slightly lower than that of marble alone, most fractures occurred within the marble itself, and not in the glue join. [...] the thermoplastics were found to be nearly as strong as thermosetting adhesives.“ (RICCARDELLI 2011, p. 2)⁴²

Das Vorurteil, dass vergleichsweise viele Klebstoffe als zu schwach eingestuft werden, hält sich weiterhin. Zusammenfassend und pointiert formuliert JORJANI:

³⁹ Oft können keine passenden Vergleichsobjekte herangezogen werden, es sind keine geeigneten Prüfmaschinen vorhanden und die Beobachtungen in kleiner angelegten Testreihen bleiben schlecht vergleichbar. Ein positives Beispiel ist: POHORILAKOVA, IDA/MOY, SARA A.: „A Re-evaluation of Adhesives Used for Mending Ceramics at Kaman-Kalehöyük: A final assessment“, unpubliziertes paper für das Japanese Institute of Anatolian Archaeology. Die Autoren untersuchten vier Klebstoffe (als Ersatz für Paraloid B72: Paraloid B48N, Mowital B30H [Butvar B98], Cellulosenitrat) auf Alterung und wechselnde Klimabedingungen in der Türkei seit 1999 bis 2009 und führten abschließend Festigkeits- und Löslichkeitsversuche (Angabe des Versagens in Stunden) durch. Nach 10 Jahren bei Anhängung eines Gewichts von 250 g brach kein einziger Testkörper. Bei kontrolliertem Fall von 1 kg auf diese Testkörper wurden die Brucharten beschrieben. Obwohl insgesamt Paraloid B72 am besten bewertet wurde, gelten Paraloid B48N und Butvar B98 wegen ihres höheren Tgs in diesem Fall als geeignete Lösungen.

⁴⁰ PODANY, JERRY; RISSER, ERIK; SANCHEZ, EDUARDO: „Never forever, assembly of sculpture guided by the demands of disassembly“, in: AMBERS 2009, pp. 134–142.

⁴¹ HORIE, CHARLES: „Materials for conservation, organic consolidants, adhesives and coatings“. Reprint, Oxford u.a., 2003.

⁴² RICCARDELLI, CAROLYN; WHEELER, GEORGE; MUIR, CHRISTINA et al.: „An examination of pinning materials for marble sculpture“, unpublished paper, 2011.

„The fracture patterns observed for the adhesives were all similar, with the vast majority of the breaks in the marble and not at the adhesive line. An initial instinct might be that this is unacceptable. The conventional wisdom in conservation is to use an adhesive that is not as strong as your matrix. That convention needs to be reexamined, since even the thermoplastic adhesives could be considered too strong by these standards.“ (JORJANI, 2009, p. 32)⁴³

Eine Entscheidung zwischen „festem“ und „schwachem“ Klebstoff kann somit nicht so einfach entschieden werden und ist zudem von unterschiedlichsten Faktoren abhängig.

Festigkeit ist eine Werkstoffeigenschaft, die den mechanischen Widerstand beschreibt, den ein Werkstoff einer Verformung oder Trennung entgegensetzt. Abgesehen von den Beanspruchungen sind allgemein für die Festigkeit einer Klebung die geometrische Gestaltung, die Festigkeit der Fügeteile, sowie deren Grenzschichten und die Festigkeit der Klebschicht selbst verantwortlich. Die Festigkeitswerte einer Klebung oder einer Klebverbindung sind abhängig von der angewendeten Prüfmethode. Geprüft werden können Beanspruchungsarten auf Zug, Druck, Schub, Biegung und Torsion und Kombinationen. An einer Terrakottafigur können z.B. verschiedene statische (Stoß) und dynamische Belastungen (Transport über die Autobahn) auftreten.

Ein bereits oben angesprochenes Fallbeispiel zeigt, dass die Klebung eines abstehenden Armes einer lebensgroßen Marmorfigur eine maximale Zugspannung von nur $0,48 \text{ N/mm}^2$ erfährt (eine Scherspannung von nur $0,05 \text{ N/mm}^2$), das normalerweise dafür eingesetzte Epoxidharz dafür aber eine Zugfestigkeit von $42,79 \text{ N/mm}^2$ besitzt. Selbst unter Einberechnung zusätzlicher Beanspruchungen (Sicherheitsfaktor) ist dies zu hoch.

Eine eigne Berechnung bestätigt dies. Als Beispiel wurde das Gewicht eines Unterarmes einer Terrakottafigur bestimmt,⁴⁴ indem der Unterarm der Kopie einer nachgebrannten Terrakottafigur (gepanzertes Soldat mit angewinkeltem Unterarm) vermessen und gewogen wurde. Dieser entspricht in Gewicht, Abmessungen und Wandstärke den Originalen.

Zur Vereinfachung wurde als Grundform des Unterarms eine Röhre angenommen, die zuvor aus der flachgedrückten Röhre berechnet wurde.

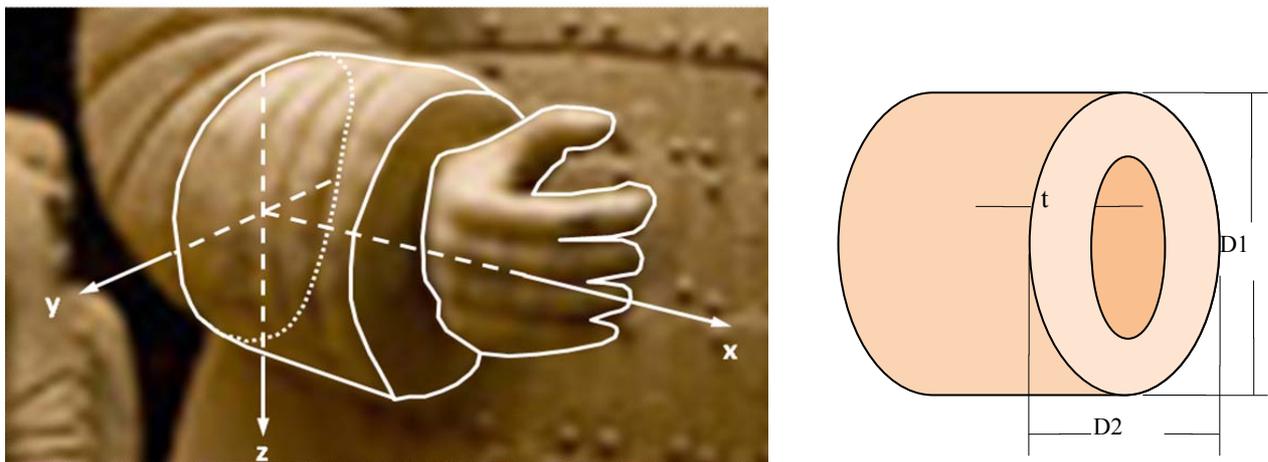


Abb. 13: Zeichnungen zur Veranschaulichung der Messung mit Unterstützung von Dipl. Ing. Andreas Dörr

⁴³ JORJANI, MERSEDEH; WHEELER, GEORGE; RICCARDELLI, CAROLYN et al.: „An evaluation of potential adhesives for marble repair“, in: AMBERS 2009, pp. 143–149. Um Klebstoffe für die Restaurierung zu prüfen, wurden auch Messungen zum Bruchwiderstand an Grenzflächen und zur Klebstoffschichtstärke durchgeführt (Hier waren keine Zusammenhänge zwischen Klebeschichtdicke und Bruchfestigkeit festzustellen). Die Festigkeitswerte waren alle ausreichend für die Marmorverklebung. Thermoplastische und duroplastische Kleber sind allerdings anders als angenommen ähnlich fest.

⁴⁴ Dazu wurden Beispielgewichte von Armbruchstücken herangezogen und die Armkopie der nachgebrannten Terrakottafigur gewogen, da sie im Bezug auf die Wandstärke mindestens an das Gewicht der Originale heranreicht. Figur T23G10-26: ebenfalls je 5 kg.

Gewicht des Unterarms: $m = 5 \text{ [kg]}$

Abmessungen Ellipse:

Großer Durchmesser der Ellipse: $D1 = 15 \text{ [cm]}$

Kleiner Durchmesser der Ellipse: $D2 = 10 \text{ [cm]}$

Äquivalenter Kreis:

Außendurchmesser Kreis: $Da = \frac{D1 + D2}{2} = 12,5 \text{ [cm]}$

Außenradius Kreis: $ra = \frac{Da}{2} = 6,25 \text{ [cm]}$

Wandstärke der Bruchfläche: $t = 3 \text{ [cm]}$

Innenradius: $ri = ra - t = 3,25 \text{ [cm]}$

Fläche des Außenkreises: $A_A = \pi \cdot ra^2 = 122,72 \text{ [cm}^2\text{]}$

Fläche des Innenkreises: $A_I = \pi \cdot ri^2 = 33,18 \text{ [cm}^2\text{]}$

Fläche Kreisring: $A_{KR} = A_A - A_I = 89,54 \text{ [cm}^2\text{]}$

Gewichtskraft: $F = m \cdot g = 49,05 \text{ [N]}$

Dichte: $\rho = 1890 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Volumen: $V = \frac{m}{\rho} = 2645,5 \text{ [cm}^3\text{]}$

Länge: $l_{\text{hohlerArm}} = \frac{V}{A_{KR}} = 29,55 \text{ [cm]}$

Bruchspannung: $\sigma_{\text{Bruch}} = \frac{F}{A_{KR}} = 0,005 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$

Bruchspannung mit hohem Sicherheitsfaktor: $\sigma_{\text{Bruch}} \cdot 10 = 0,05 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$

In vorliegendem Fall kann die Klebung des Unterarmes mindestens eine Zugspannung von 0,005 N/mm² aufnehmen, bevor es zum Bruch kommt. Die Zugfestigkeiten der meisten Epoxidharze liegen weit über 10 bis 40 N/mm², was eine 2000 bis 8000fach höhere Festigkeit darstellt. Selbst mit dem hoch angesetzten Sicherheitsfaktor⁴⁵ von zehn ist der Wert von 0,05 N/mm² sehr gering. Andere Bereiche der Figur können ebenso berechnet werden, liegen aber mit ihren Bruchspannungen eher noch unter der des stark belasteten Unterarmes.

Durch Berechnung – wie dieses Beispiel zeigt – lassen sich die mindestens nötigen Festigkeitseigenschaften eines Klebers für eine Belastung durch Eigengewicht ermitteln.⁴⁶ Allerdings handelt es sich bei den Terrakottabruchstücken um unterschiedlichste Brüche, die anschließend zusätzlichen Beanspruchungen ausgesetzt sein werden. So wirken normalerweise

⁴⁵ Im Baugewerbe würde bereits ein Sicherheitsfaktor von drei genügen (= starken Schwankungen unterlegenes Holz), hier wurde ein Faktor zehn eingesetzt, wie er z.B. für Seilzüge in Liften berechnet wird.

⁴⁶ PODANY, JERRY/GARLAND, KATHLEEN M./FREEMAN, WILLIAM R./ROGERS, JOE: *Paraloid B72 as a structural adhesive and as a barrier within structural adhesive bonds: evaluations of strength and reversibility*, in: JAIC (Journal of the American Institute for conservation) online, 2001, vol. 40, no. 1, pp. 15-33.

auf einen abstehenden Arm in der Hauptsache Scherkräfte während auf einen Fußquerschnitt hauptsächlich Druckkräfte wirken. Dazu kommt aber die zusätzliche Bewegung der Figuren beim Transport, die nicht im Voraus berechnet werden können, weshalb viele Restauratoren sehr viel stärkere Klebstoffe als nötig zur Sicherheit einsetzen⁴⁷.

Im Rahmen des Chinaprojektes wurden deshalb die Zugfestigkeiten des Terrakottamaterials, der Prüfkörper sowie ausgewählter Klebstoffe gemessen.

Durch die im Zugversuch gleichmäßige Zugspannungsverteilung über die Klebfuge kann für die Berechnung der Festigkeit die Zugfestigkeit der Klebung zugrunde gelegt werden. Bei der Zugscherfestigkeitsmessung müsste dagegen die geometrische Gestaltung mit einbezogen werden.⁴⁸ Bestimmt wird die Zugfestigkeit durch das zerstörende Prüfverfahren im Zugversuch aus der maximal erreichten Zugkraft (F_{\max}) senkrecht zur Klebfläche (A).⁴⁹ Bei zunehmender Belastung entsteht der Bruch in der Klebschicht dann, wenn die sich aus der Höchstkraft F_{\max} ergebene Bruchspannung der Klebschicht $\sigma_B = F_{\max} / A$ erreicht ist.⁵⁰

Mit der Messung sind auch die Beurteilung der Adhäsions- und Kohäsionseigenschaften der Klebstoffe möglich.⁵¹ Ermittelte Zugfestigkeiten und im Vergleich miteinander auch die Elastizitätsmoduln sind reproduzierbar und mit Angaben in Datenblättern, als auch mit in der aktuellen Literatur angegebenen Werten zu vergleichen.

Zugfestigkeitsmessungen

Bereits durchgeführte Messungen von 1999/2000 ergaben an fünf Proben von drei Fragmenten der Originalterrakotta maximale Zugfestigkeiten von durchschnittlich 1,19 N/mm² (per) und 1,94 N/mm² (par)⁵². Erneute Messungen 2001/2002 mit mehr Einzelwerten ergaben maximale Zugfestigkeiten zwischen durchschnittlich 2,21 (par) und 1,19 N/mm² (per)⁵³; das ergibt einen Mittelwert der Zugfestigkeit von 1,70 N/mm². Die bis 2010 benutzten Prüfkörper weisen selbst nur eine Festigkeit von 1,1 N/mm² auf, weshalb sie, trotz sich dadurch verändernder Eigenschaften (z.B. Porosität) erneut gebrannt wurden. Die Prüfkörper weisen jetzt eine Zugfestigkeit von durchschnittlich 2,70 N/mm² auf.⁵⁴

Bei allen Werten muss aufgrund der Inhomogenität des Terrakottamaterials⁵⁵, der Anzahl von Proben und der bei den Originalen eingeschränkten Möglichkeit von Entnahmestellen bedacht werden, dass es sich um Richtwerte handelt.

Die seit 2010 gemessenen Zugfestigkeiten mit ihren Bruchbildern und Beschreibungen sind im Anhang in der Tabelle: Überblick Zugfestigkeitsmessungen mit Einzelwerten und Abbildungen beschrieben.

⁴⁷ PODANY 2001, S. 5.

⁴⁸ HABENICHT 1997, S. 369f.

⁴⁹ SCHINDEL-BIDINELLI, EDUARDO: *Strukturelles Kleben und Dichten*, Bd. 1, München 1988, S. 324.

⁵⁰ HABENICHT 1997, S. 369.

⁵¹ HABENICHT 1997, S. 675.

⁵² per: senkrecht auf die Terrakottafläche, par: parallel zur Bruchfläche/Oberfläche. Messungen durch RUPERT UTZ, Jahresbericht 1999/2000, S. 130 ff.

⁵³ Der an anderer Stelle veränderte Wert: 1,41 N/mm² wurde nicht verwendet, Durchschnittswert wäre sonst 1,81 N/mm².

⁵⁴ Die über der originalen Terrakotta liegende Zugfestigkeit der Prüfkörper dient der Sicherheit bei den Messungen. So können auch Klebstoffe getestet werden, die im Bereich 1,1 bis 1,7 N/mm² liegen, ohne die Sollbruchstelle noch weiter einsägen zu müssen, was zu Ungenauigkeiten der Meßergebnisse aufgrund der zu kleinen Fläche führen würde.

⁵⁵ Beispiele dafür sind die bei Zugmessungen auftretenden schrägen Risse aufgrund von Schwachstellen in den Prüfkörpern anstatt der Bruch in der Sollbruchstelle.

Dabei wurden folgende Bedingungen für die Herstellung der Prüfkörper und Aufträge der Klebstoffe eingehalten:

- Prüfkörpergröße: Terrakottaquader: 73 mm x 36 mm x 27 mm; Terrakottarechtecke: 26 mm x 36 mm x 36 mm; Klebfläche: ca. 33 mm x 24 mm.
- Schleifen aller zu verklebender Flächen: Schleifpapier Körnung 80 (Siliciumcarbid, auf dem Drehteller der Schleifmaschine Struers LaboPol-5); abschließend mit der Hand zehn Umdrehungen auf einem Schleifpapier der Körnung 60 (Bosch, Firma Kustermann München). Das Herstellen von planparallelen Bruchflächen für die Klebflächen durch Brechen der Prüfkörper stellte sich als zu aufwendig für die Testreihen heraus und wurde aufgrund der großen Menge an Proben und den zusätzlichen Beeinflussungsfaktoren vernachlässigt. Glattere bzw. nicht gebrochene Bruchflächen haben geringere effektive Oberflächen und brechen damit schneller, was auf der anderen Seite eine gewisse Sicherheit bei den Meßergebnissen bedeutet.⁵⁶
- Kurzes Abwaschen der Flächen unter fließendem Wasser mit anschließendem Trocknen von drei Tagen; bei den chinesischen Epoxidharzen aufgrund des zeitlich zu kurzen Aufenthaltes nur feuchtes Abwischen des Staubes von den Bruchflächen und mindestens 15 Minuten Trockenzeit.
- Kurz vor dem Verkleben: Reinigung der Bruchflächen durch Abwischen mit einem in Aceton getränkten Vlies.
- Definierter Klebstoffauftrag: Auftrag des Klebers in zwei Strängen (Länge des Prüfkörpers) auf jede der zwei Oberflächen durch die Handpistole mit anschließendem Verspachteln; einmaliges Abziehen einer Seite mit dem Zahnkamm (Zahntiefe: 1,3 mm; Zahnlückenbreite: 1,4 mm); Um 90° gedrehtes Aufeinanderpressen der Prüfkörperklebschichten.
- Mindestens 48 Stunden Aushärtungszeit der Klebstoffe (Paraloid und Mowital aufgrund der teilweise längeren Aushärtungszeit länger)
- Mindestens 48 Stunden Aushärtungszeit der Kleber, die die Prüfkörper auf den Zugstempeln halten: Uhu plus endfest 300.
- Primerauftrag: Paraloid B72 und B44 17% (Aceton), zweimaliger Auftrag (im Abstand von fünf Minuten) mit einem Borstenpinsel. Dieser wird nur weiter als Primer verwendet, wenn es nicht um Mowital oder reversible Kleber geht, sonst wird der verdünnte Kleber als Haftungsverbesserer/Primer verwendet.
- Da nicht alle Möglichkeiten durchgetestet werden können und die Klebstoffsysteme unterschiedlich sind, können die Voraussetzungen nicht immer ganz einheitlich gestaltet werden. Ziel war ein fester, reversibler Verbund mit dem Klebsystem entsprechender Klebschichtstärke.
- Die Verarbeitung fand entweder im Labor des Lehrstuhls oder dem klimatisierten Testräumen des BLfD bei 50 bis 55% rel. Feuchte und 20 bis 23°C statt.

Die Mowitalklebungen zeigen unterschiedliche Zugfestigkeiten, abhängig vom Ausgangsstoff B30H oder B60H, dem Füllstoff aus Kieselsäure und ganz besonders den Primern. Sie liegen mit ihren Zugfestigkeiten jedoch alle unter oder knapp unter denen der originalen Terrakotta, der wie oben beschrieben bei durchschnittlich 1,7 N/mm² angenommen wird.

Beim Vergleich von Mowital-Klebungen mit und ohne Primer (aus Paraloid B72 und B44, 17%ig in Alkohol, 2maliger Aufstrich) ergab sich ein wesentlich höherer Wert durch den vorherigen Primerauftrag: bei Mowital B30H: 0,95 N/mm² statt nur 0,57 N/mm². Durch die zum Klebstoff zugegebene Kieselsäure erreichte die Klebung – wie von einigen Autoren in der Restaurierung beschrieben – tatsächlich höhere Werte, allerdings nur von 0,95 N/mm² auf 0,98

⁵⁶ Siehe JORJANI 2009, p.20.

N/mm². Die höchsten Werte (M26-M30) von bis zu 1,97 N/mm² wurden bei Mowital B30H mit dem Primer aus Mowital B30 selbst erreicht (10%ig, zweimaliger Aufstrich). Falls nötig könnten sie durch die Kieselsäure nochmals verbessert werden.

Im Vergleich mit Mowital B30H zeigt die Klebung mit Mowital B60H eine sehr viel geringere Zugkraft (0,3 N/mm²).⁵⁷ Ein weiterer Test mit Primer und Kieselsäure wäre sinnvoll, wurde aber auf Grund der Menge an Messungen nicht weiterverfolgt. Außerdem sind die E-Moduln der reinen Mowital B60H Klebung (M31-M35) höher als die von der Mowital B30H Klebung (M6-M10), was eine vergleichsweise höhere Sprödigkeit des Mowital B60H belegt. Die E-Modul-Werte mit Primer ohne pyrogene Kieselsäure (M16-20) liegen sogar ca. 10mal so hoch, während die Werte mit pyrogener Kieselsäure (M21-M25) ca. nur 3mal so hoch liegen, was auf einen positiven Einfluss des Kieselsäuregitters im Klebstoff schließen lassen könnte.

Bei den Montageklebstoffen konnten keine verwendbaren Werte gewonnen werden, da die Klebung oft bereits beim Einsägen der Sollbruchstelle versagte. Für bessere Ergebnisse müsste an einer besseren Haftung auf den Terrakottafügeteilen gearbeitet werden.

Pattex PA700 zeigt mit 1,35 N/mm² durchschnittlich höhere Zugfestigkeiten als die Mowitalklebung. Der Kleber wird als elastischer Dicht- und Montageklebstoff eingesetzt. Auch nach dem Auseinanderziehen im Zugtest klebten die Fügeteile aufgrund der hohen Elastizität noch aneinander (was in der Praxis theoretisch vorteilhaft wäre).

Wie für den Pattex PA700 wurden auch bei dem anorganischen Klebstoff, dem Mörtel KP 1090 unilijm, bereits die bei 950°C gebrannten Prüfkörper eingesetzt. Der Mörtel besitzt einen guten durchschnittlichen Festigkeitswert von 1,34 N/mm², der aber für evtl. höhere Festigkeiten nicht mehr modifiziert werden kann. Im Vergleich mit den anderen Klebern ist er sehr spröde und seine Kohäsionskraft zu gering (E-Modul: 2,00 kN/mm²).

Bei dem chinesischen Epoxidharz konnten bei den ersten Messungen keine ausreichenden Werte gewonnen werden. Der Klebstoff ist auf jeden Fall stärker als die Terrakotta und so weit eingedrungen, dass die Testkörper nicht in, sondern mehrere Millimeter neben der Sollbruchstelle und der Klebschicht brechen. Ähnliches gilt für die Paraloid B44 Klebungen mit pyrogener Kieselsäure, allerdings lässt sich hier noch zu 5% eine Klebschicht erkennen (Kohäsionsbruch). Für mehr Aussagekraft müssten drei weitere Zugtests durchgeführt werden, da es zu viele Prüfkörper mit Materialbruch gab.

Bis auf den reinen Kohäsionsbruch bei der Mörtelklebschicht zeigen die anderen Bruchbilder, dass bei einem Auftrag mit Primer ein größerer Kohäsionsbruchanteil (M16-M20: 30-40% Kohäsionsbruch, M6-M10 nur 20% Kohäsionsbruch) vorliegt, bzw. ohne Primer der Bruch eher in die ersten Terrakottaschicht eintritt. Am stärksten tritt dies beim chinesischen Epoxidharz auf, das wohl auch die höchste Festigkeit aufweist, die dadurch allerdings nicht gemessen werden konnte. Hier müssten bei einem weiteren Versuch die Prüfkörper für eine bessere Sollbruchstelle noch weiter eingesägt oder aber eine andere Prüfmethode gewählt werden.

Ergebnisse der Zugfestigkeitsmessungen

Ideale Werte liegen im Bereich der ermittelten 1,70 N/mm² der originalen Terrakotta. Bei idealisierter Annahme sollte die Festigkeit des gesuchten Klebstoffes knapp unter diesem Wert liegen, so dass nicht ein Bruch in der Terrakotta, sondern ein Kohäsionsbruch in der Klebschicht entsteht. Da es sich bei den 1,70 N/mm² um keinen absoluten Wert handelt und

⁵⁷ In Italien wird ausschließlich mit Mowital B60HH aufgrund seiner angeblich höheren Klebkraft geklebt: siehe: Tabelle: Klebemittleinsatz und -techniken für großformatige Keramik- /Steinfiguren weltweit.

dieser auch nicht vollständig auf die Situation der Prüfkörper übertragen werden kann, sollten die Werte im Bereich um die $1,70 \text{ N/mm}^2$ liegen.

Insgesamt reißen die meisten Prüfkörper knapp über bzw. unter der Klebschicht. Dabei zeigen die mit Primern vorbehandelten Prüfkörper größere Kohäsionsbrüche. Je stärker der jeweilige Klebstoff ist und je weiter er in das poröse Material ohne Primer eindringen kann (was durch die Dünflüssigkeit bei starken Klebern meistens gegeben ist), desto mehr führt es zu einem Bruch im Terrakottamaterial knapp unter oder über der Klebschicht.

Die Vorbehandlung mit dem eingesetzten 17%igen Acrylat-Primer (Mischung aus Paraloid B72 und B44), durch den der Klebstoff nicht so weit in die Terrakotta eindringen kann, ist deshalb sinnvoll. Aufgrund der Erfahrungen sollten zu den jeweiligen Klebstoffen am besten die passenden Primer, also die verdünnten Klebstoffe benutzt werden.

Trotz ihrer guten Verarbeitungseigenschaften und ungefährlichen Inhaltsstoffe schließen sich die Montageklebstoffe aufgrund ihrer geringen und nicht besser zu modifizierenden Zugfestigkeitswerte aus.

Auch Unilijm Mörtel-Werte liegen trotz ihres guten Bruchbildes zu niedrig, dazu kommt die zu dicke, spröde Klebschicht, die sich nicht für perfekt passende Scherben eignet.

Von den Epoxidharzen mit ihren zu hohen Festigkeiten abgesehen, wären die Paraloid B44-Werte geeignet, um weitere Untersuchungen vorzunehmen. Obwohl die Versuche mit Primer im Gegensatz zu denen ohne Primer nicht gemessen werden konnten, zeigen sich auch dort gute Bruchbilder. Vorteile sind, dass sowohl Primer als auch Klebstoff noch modifiziert werden können. Obwohl die meisten Untersuchungen in den Restaurierungswissenschaften mit Paraloid B72 durchgeführt werden, ist auch Paraloid B44 ein in der Restaurierung bereits lang eingesetztes Material⁵⁸, das durch seinen höheren Tg-Wert in Lintong verwendet werden kann. Im Eigenschaftsvergleich mit Mowital B30H schnitt letzteres allerdings besser ab. Obwohl für die bessere Vergleichbarkeit zwischen den Klebstoffen anfangs Mowital B30H ohne Primer und ohne Füllstoff und Mowital B30H mit Primer, bestehend aus Paraloid B72 und B44 in 17%iger Konzentration, sowie mit und ohne Füllstoff verwendet wurde, erwiesen sich die Zugfestigkeitswerte von Mowital B30H 25%ig mit Primer, bestehend aus Mowital B30H 10% ohne Füllstoff, als die mit Abstand höchsten und geeignetsten. Im Hinblick auf seine weiteren geeigneten Eigenschaften wird der Klebstoff in dieser Weise in China eingesetzt.

Zwar wies auch Pattex PA700 Total Fix passende Zugfestigkeitswerte auf, die Rückstände auf den Prüfkörpern (teilweise dunkle, schmierige Verfärbung, die nicht rückstandsfrei zu entfernen war) und seine teilweise unbekannte Zusammensetzung schlossen diesen Klebstoff jedoch aus.

Der vielversprechende Steinkleber kann trotz der Materialbrüche beim Test noch nicht als durchgefallen gelten. Drei Werte zeigen Zugfestigkeiten zwischen $2,10 \text{ N/mm}^2$ und $2,86 \text{ N/mm}^2$. Auch hier könnte es sich lohnen, noch weiter zu modifizieren, allerdings würde dies im Hinblick auf die relativ komplizierte Herstellung des Klebstoffes viel Zeit in Anspruch nehmen und erfordert eine sehr viel genauere Arbeitsplanung und Arbeitsweise vor Ort als die Herstellung des Mowitalklebers.

Die Möglichkeiten zum Fügen der Terrakottafragmente

Zum Wiederausammenfügen der Terrakottascherben kann eine reine Verklebung der Scherben vorteilhaft sein, sowie eine Kombination aus Kleben und mechanischen Hilfsmitteln, wie sie bereits bei antiken Steinskulpturen angewandt wurde. Rein mechanisch Fügemitel, wie z.B.

⁵⁸ Paraloid B44 ist in frischem Zustand ähnlich gut löslich wie Paraloid B72 (HORIE 2010, p. 392).

Schrauben, Klammern oder Steckverbindungen, sind heute seltener zu finden und beinhalten meist eine zusätzliche Verklebung oder Einmörteln der Hilfsmittel, wie z.B. Dübel. Im Folgenden wird auf die beiden ersten Möglichkeiten näher eingegangen. Der Schwerpunkt lag und liegt aber während der gesamten Projektphase bei der Verklebung.

Verklebung mit mechanischen Hilfsmitteln

An der Kopie eines Kriegers wurden bereits Versuche zum Fügen mit verschiedenen mechanischen Verbindungen in Form von verklebten und unverklebten Nypondübeln und Spannschlössern an den Innenseiten getestet.⁵⁹ Probleme sind dabei der mehr oder weniger große Verlust von Terrakottmaterial, die ungünstige punktuelle Spannungsverteilung und die schwierige Durchführbarkeit der Anbringung bei gekrümmten Flächen und bei gleichzeitig mehreren Scherben. Rein mechanische Lösung konnten nicht entwickelt werden.

Bei Untersuchungen des METROPOLITAN MUSEUM OF ART zur Verklebung von Marmor mit optimalen Dübelmaterial ergab sich, dass die reine Verklebung mit einer Paraloid B72 und Paraoid B48N Mischung gebrochener Marmorprüfkörper (45° Winkel) eine höhere maximale Belastung aushielt (50,65 kN) als die Klebung inklusive des dafür perfekt abgestimmten zweifachen Dübels aus Fiberglas (41,51 kN).⁶⁰

Die Möglichkeiten mit Klebungen und zusätzlich mechanischen Hilfsmitteln zu arbeiten sind vielfältiger, aber auch komplizierter in der Abschätzung ihres Verhaltens. Deshalb sollen Versuche zu unterstützenden Maßnahmen im Inneren ohne Materialverlust unternommen werden. An den Innenraum perfekt angepasste Plattenbauteile aus alterungsbeständigem Material, die punktuell, im besten Fall reversibel angeklebt werden, können schwierige Brüche überbrücken. Mit Hilfe der *additiven Fertigung*, welche auf einer schichtweisen Bauteilherstellung beruht, können z.B. Kunststoffe und Keramiken, aber auch Metalle direkt aus CAD-Daten zu komplexen, individuellen Bauteilen verarbeitet werden. So können z.B. am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN aus einem formlosen Ausgangsmaterial (z. B. Pulver) durch den Strahlschmelz- bzw. Sinterprozess aufgrund hochenergetischer Strahlquellen (Laser- oder Elektronenstrahl) oder durch Polymerisation mittels eines chemischen Binders in kurzer Zeit geometrisch definierte Festkörper/Bauteile hergestellt werden.⁶¹ Dazu müsste von einer „trocken“ zusammengebauten Figur in Lintong der Innenraum gescannt werden (z.B. computertomographisch). In einem Gespräch mit den chinesischen Restauratoren und dem Ansprechpartner Dr. Stefan Krug vom iwb in München wurde beschlossen, die ersten Schritte in China zu unternehmen bzw. auch an der dortigen Universität passende Ansprechpartner zu finden. Leider wurden keine weiteren Schritte unternommen.

Nachteile dieser Idee sind die für jede Figur individuell herzustellenden Bauteile, die durch eine externe Firma erstellt werden muss und damit sehr aufwendig und teuer für die

⁵⁹ WALLNER, STEPHANIE: „Test series for the assembling of terracotta figures carried out on a replica of a warrior“ in: BMBF-Forschungsbericht 1999/20000.

⁶⁰ RICCARDELLI 2011: Bei dem Klebstoff handelt es sich um eine Mischung aus Paraloid B72 und Paraloid B48N je 40 g in 54 g Aceton und 6 g Ethanol (3:1). Sollten aber Dübel eingesetzt werden, werden Fiberglas- und Carbonfaserstifte empfohlen, da sie stark genug sind, aber den Marmor nicht vor ihrem Versagen zerstören.

⁶¹ Online unter: <http://www.iwb.tum.de/Institut+f%C3%BCr+Werkzeugmaschinen+und+Betriebswissenschaften+%28iw%29.html>.

Bedingungen vor Ort erscheint. Da die Bauteile zusätzlich zu einer Klebung eingesetzt würden, stand zuerst die modellhafte Klebung der Figuren im Vordergrund.

Problemstellungen und Voraussetzungen für Verklebungen

Um gebrauchsfertige Klebstoffe von Firmen zu beziehen und eine Vorauswahl treffen zu können, wurde ein Anforderungskatalog (siehe: Anhang) erstellt, der neben einer Einführung zur Problemstellung des bisherigen Klebens der Figuren und der Beschreibung der Kunstwerke alle Mindest- und darüber hinausreichenden Anforderungen beinhaltet. Für die Versendung an Firmen wurde zusätzlich eine dreiseitige Kurzversion entworfen. Nachteil eines solchen Katalogs ist oft eine frühzeitige Absage der Firmen, weil die Menge an unterschiedlichen und bereits sehr spezifischen Anforderungen auf kein Produkt zutreffen kann.

Sind geeignet erscheinende Produkte oder Formulierungen gefunden, finden Vorversuche an kleinen, modernen Terrakottaziegeln statt (siehe Tabelle: Vorversuche von zur Zugfestigkeit bestimmten Klebstoffen). Wenn sich der Klebstoff auch praktisch gut verarbeiten lässt und sich nach dem Aushärten durch Feuchtigkeit, Hitze oder mechanisch wieder öffnen lässt, werden systematische Versuche zur Festigkeit in Form von Zugfestigkeitsmessungen durchgeführt. Obwohl diese nicht als optimale bzw. alleinig ausreichende Messung zur Beurteilung der Eignung als Klebstoff für restauratorische Zwecke dienen können, liefern sie doch wichtige vergleichbare Meßwerte.

Die große Anzahl heute erhältlicher Klebstoffarten zeichnen sich durch spezifische Eigenschaften und Verarbeitungsverfahren aus⁶² und machen damit zusätzliche Angaben nötig: Für Reaktionsklebstoffe sind beispielsweise Anpressdruck und Topfzeit⁶³ für die Festigkeit entscheidend.

Obwohl eine elastischen Klebung für eine bessere Spannungsverteilung in der Klebfuge sorgt und damit weniger schnell zum Bruch führt, sind dafür mindestens Schichtstärken von 1mm erforderlich.⁶⁴ Bei exakter Wiederverklebung passender Terrakottabuchstücke sind solche Klebstoffe damit ausgeschlossen, bzw. erzielen bei geringer Schichtstärke keinen elastischen Effekt mehr.

Die Glasübergangstemperatur (T_g) im Rahmen einer thermomechanischen Analyse ist ein entscheidendes Kriterium für die Festigkeit, Elastizität und Bruchart eines Klebmittels und kann Aussagen über Kriechen⁶⁵ (Retardation) und Biegeermüdung geben.⁶⁶ Außerdem ist sie eine Mindestanforderung, wenn es sich um die beschriebenen Klimabedingungen (siehe: Klimasituation vor Ort) handelt.

Reine Verklebung

⁶² In der Industrie werden Klebstoffe nicht aufgrund ihrer chemischen Basis eingeordnet, sondern nach Verarbeitungsweise, -temperatur, Lieferform und Verwendungszweck.

⁶³ Topfzeit: „Zeitspanne, in der ein Ansatz eines Reaktionsklebstoffs nach dem Mischen aller Klebstoffbestandteile für eine bestimmte Verwendung brauchbar ist.“ (HABENICHT 1997, S. 166)

⁶⁴ Siehe z.B.: FLEISCHMANN, WOLFGANG: *Fügetechnologie Kleben Teil 1, Vorlesungsskript Henkel und Fraunhoferinstitut Bremen*, Juni 2010, online unter:

http://www.fast.kit.edu/download/Downloads/Leichtbautechnologie/KIT_Vorlesung_Teil_1_100625.pdf, S. 41-42.

⁶⁵ Kriechen ist eine zeit- und temperaturabhängige, plastische Verformung unter Last.

⁶⁶ Der T_g -Wert ist jedoch oft nicht in den Datenblättern angegeben. Trotz Angabe kann es gravierende Unterschiede zwischen den Meßwerten geben, da die angewendeten thermomechanischen Analysen und die Interpretation der Daten sehr stark differieren können (YOUNG, CHRISTINA: *Predicting practical properties of unfilled adhesives from thermomechanical data*, CCI Symposium Ottawa, 2011, S.2).

Bereits im 19. Jh. wurden Keramiken mit natürlichen Harzen wie Mastix, die heute als schwache Klebmittel eingestuft werden, verklebt⁶⁷. Anders als bei kleineren Kunstwerken in klimastabiler Umgebung (Museum) ist die Sicherheit bei den großen und schweren Terrakottafiguren entscheidend.

Die heutige Klebtechnik nimmt als stoffschlüssiges Fügeverfahren in der Restaurierung allgemein einen großen Raum ein. Vorteil für die Anwendung bei den Terrakottafiguren ist die relativ leichte Anwendung, wenn ein passendes Klebstoffsystem gefunden ist. Im Gegensatz zu formschlüssigen Verbindungen können bei geklebten Fügeteilen die Spannungen viel gleichmäßiger verteilt werden. Klebstoffe können verschieden viskos bzw. mit Füllstoffen eingestellt werden, so dass sie kleine Unebenheiten und Spalten besser ausgleichen können. Ein reversibler Klebstoff hinterlässt zudem im Gegensatz zu anderen mechanischen Fügeverfahren sehr viel geringere Schädigung am Terrakottamaterial; das Material selbst muss nicht durch z.B. Bohrungen zerstört werden.

Neben den üblichen Klebstoffen auf organischer Basis können auch Verklebung mit anorganischen Klebern und Mörteln eine mögliche Alternative sein. Zu den anorganischen Produkten zählen physikalisch abbindende Klebstoffe unter Verdunsten von Wasser (z.B. Natronwasserglas/Natriumsilikat)⁶⁸ oder aus der Schmelze bei höheren Temperaturen sowie chemisch reagierende Klebstoffe (meist aus Phosphaten und Alkalisilicaten).⁶⁹ Problematisch ist hierbei der unterschiedlich hohe Ausdehnungskoeffizient von Klebstoff und Terracotta: Die Glaslote sind dabei zwar sehr fest, aber auch entsprechend spröde, zudem irreversibel. Es kann zu starken Spannungen kommen.

Als Mörtel wurden ein Calde Trowel HQ 82 U Feuermörtel⁷⁰ und ein Jahn Ersatzmörtel⁷¹ für Terrakotta in Betracht gezogen. Der Feuermörtel wird zur Restaurierung von Ofenkacheln eingesetzt, allerdings stellte sich heraus, dass die geklebten Produkte nur unter 400°C aushärten und haltbar sind: ein erneutes Brennen der Figuren in Lintong ist aber ausgeschlossen. Der Ersatzmörtel wurde in die Testreihen mit einbezogen.

Im Folgenden sind die Vorversuche mit den später näher beschriebenen Klebstoffen, die für die Zugfestigkeit ausgewählt wurden, kurz beschrieben.

⁶⁷ HORIE 2010, p. 258. Gemeint ist aber wohl ungeeignetes, da sprödes Klebmittel.

⁶⁸ Natronwasserglas wurde früher für die Keramik- bzw. Porzellanrestaurierung eingesetzt, heute gibt es einige Fertigmischung aus Schamotte und Wasserglas.

⁶⁹ HABENICHT 1997, S.137ff.

⁷⁰ Chefrestauratorin Romana Jagic, Croatian Conservation Institute. Bezug bei: <http://www.calderys.de/>.

⁷¹ Bezug bei: <http://jahn-international.com>.

Vorversuche von zur Zugfestigkeit bestimmten Klebstoffen

Klebstoff	Proben- nr./Anz ahl	Versuch	Beschreibung/Bemerkung
Montageklebstoff 209 (BASF) Montageklebstoff 389 (BASF)	Ca. 30	Verklebung mit verschiedenen Prüfkörpergrößen und - geometrien: z.B. kleine Ziegel aus dem Modellbau; Lösungsversuche mit der Hand, Einlegen in Wasser usw.	Bereits dabei wird deutlich, dass die Festigkeiten sehr niedrig liegen müssen, da sich die Prüfkörper meist sehr leicht per Hand lösen lassen. Die Verarbeitung ist einfach, die Lösungsversuche funktionieren gut, keine gesundheitliche Belastung. Vorteil ist die bekannte Zusammensetzung der Klebstoffe. Nach erneuter Absprache mit BASF zur Haftungsverbesserung können kaum bessere Erfolge erzielt werden.
Mörtel KP 1090 unilijm	Ca. 10	Verklebung mit verschiedenen Prüfkörpergrößen und – geometrien, Fliesen; Lösungsversuche mit der Hand, Einlegen in Wasser usw.	Die Verbünde können nicht so leicht wie die Montageklebstoffe gelöst werden, allerdings sind die Schichtstärken oft recht dick. Die Verarbeitung ist sehr einfach. Zugtests sind notwendig.
Mowital B30H	ca. 4 untersc hiedlic he	Klebung mehrerer Testgefäße (Reproduktion eines Terra sigillata Gefäßes: ca. 25cm hoch; Klebungen an der Kopie des Terrakottakriegers aus Lintong; moderene Baukeramik, Baumarkt); Klebung von Prüfkörpern	Gute und leichte Verarbeitung auf unterschiedliche Art: z.B. Abrennmethode (Wien) zur schnelleren Weiterbearbeitung. Wiederanlösungsversuche durch Auflegen von Kompressen unter Folienabschluss für ca. 1-3h: Lösung sehr gut möglich. Je nach Scherbenform und Größe der Klebefläche auch mit der Hand nach kurzer Einwirkzeit oder durch Erwärmen mit Heißluftfön oder Bunsenbrenner möglich.
Pattex PA700 Total Fix	6	Minaturziegel	Lösung mit der Hand nicht möglich, weitere Tests erforderlich
Steinkleber (Pung)	12	Herstellung des Klebstoffes zusammen mit Daniel Jöst. Versuche zur Löslichkeit: Einwirkung von Ethanol/Acetonlösun gen (1:1) unter Glasabdeckung über 3 bis 10 Tage	Herstellung der Menge muss zwar genau eingehalten werden, ist aber auf verschiedene Arten veränderbar. Die Lösungsversuche zeigten leider kaum Veränderungen an den Prüfkörpern, sie waren zumindest nicht mit der Hand zu lösen, eine höhere Acetonlösung oder direkte Benetzung müsste ausgetestet werden. Zugversuche sollen unternommen werden.
Feuermörtel Calde	6	Terrakottaprüfkörper	Nicht löslich nach Brand
Mowilith 60	Fragme nte	Lösungsversuche an den vor ca. 11 Jahren durchgeführten Klebungen an der Kopie des Terrakottakriegers (Lintong)	Wiederanlösungsversuche durch Auflegen von Kompressen (Ethanol/Aceton: 1:1) unter Folienabschluss für ca. 1-3h: Lösung sehr gut möglich.

Verklebung mit in der Restaurierung bewährten Klebstoffen

Bei lebensgroßen und monumentalen Stein- und Keramikfiguren kommen in der Regel sehr feste Klebstoffe zum Einsatz, die bereits seit einigen Jahrzehnten benutzt werden. Dazu gehören in verschiedenen Ländern dieselben Produkte (siehe Anhang: Klebemittleinsatz und -techniken für großformatige Keramik-/Steinfiguren weltweit) Monumentale Figuren werden in der Mehrzahl mit Epoxidharzen (Uhu plus, AKePox von AKEMI, Araldit BY 158, Araldite 2020 oder Fynebond), Polyesterharz (Akemi Marmorkitt 1000) und in einem Fall auch mit Paraloid B44 geklebt. Auch bei mittelschweren Figuren kommen die üblichen Klebstoffe Paraloid B72, Mowital B30H, Paraloid B44, Paraloid B48, Mecosan, Uhu plus zum Einsatz. Neuartige Formulierungen oder Klebstoffe werden trotz des großen Angebotes meist nicht verwendet und wurden auch in diesem Fall bereits vor den größeren Testreihen ausgeschlossen.

Paraloid B44

Aber selbst bei den bewährten Klebstoffen gibt es noch genug Forschungsbedarf. Zum Beispiel für Klebstoffmischungen wie Paraloid B72 und Paraloid B48N (3:1), die zur Verklebung von Marmor bei Ausgrabungen empfohlen wird, da sie einen höheren Tg-Wert als Paraloid B72 allein besitzt.⁷² Das gleiche gilt für Paraloid B44, das einen höheren und damit geeigneteren Tg-Wert von 60° bei ähnlich guten Eigenschaften aufweist: Nach DOWN⁷³ ist Paraloid B44 genauso zu den Halbflexiblen Klebstoffen mit einer gleichen geringen Vergilbungsneigung zu rechnen, auch wenn es etwas härter⁷⁴ und damit aber auch widerstandsfähiger ist. Über einen 10-jahres Zeitraum bleibt es bei Lichtalterung sowie im Dunklen im pH-Wert neutral, während B72 unter den pH-Wert von fünf sinkt. Trotz dieses Wissens wird in heißen Ländern (auch in China) das bekanntere Paraloid B72 eingesetzt. Ein Gegenbeispiel bilden die zwölf glasierten Terrakottatafeln von Lucca della Robbia im VICTORIA AND ALBERT MUSEUM, die mit Paraloid B44 gefestigt und geklebt wurden.⁷⁵ Die 23 kg schweren und 60 cm² großen Tafeln sind in einer Montage über Kopf in einer Ausstellung mit schwankendem Klima angebracht worden. Zuvor wurde z.B. ein Versuch zur Festigkeit durch Anhängen eines 16,5 kg schweren Gewichts an eine Probeklebung (Ziegel) für fünf Monate erfolgreich durchgeführt. Auch Olaf Pung setzt wegen besserer Verarbeitung für seinen Steinkleber inzwischen Paraloid B44 statt B72 ein.⁷⁶ Auch in China sollte aufgrund der Voraussetzungen der Primer Paraloid B72 gegen Paraloid B44 ausgetauscht werden.

Mowital B30H

Auch Mowital B30H ist ein bereits seit über 40 Jahren in der Restaurierung eingesetztes Klebe- und Festigungsmittel, das allerdings einen geringen Bekanntheitsgrad besitzt und weniger wissenschaftlichen Untersuchungen unterzogen wurde⁷⁷. Die Verwendung reicht von der Textil-, Gemälde-, Holz- bis hin zur Keramik- bzw. archäologischen Restaurierung.⁷⁸ In der

⁷² JORJANI 2009, pp. 144.

⁷³ Siehe dazu z.B.: DOWN, JANE/MAC DONALD, MAUREEN/ TETREAU, JEAN/WILLIAMS, SCOTT: *Adhesive testing at the Canadian conservation institute – an evaluation of selected poly(vinyl acetate) and acrylic adhesives*, p. 25f., DOWN, JANE: *Poly(vinyl acetate) and acrylic adhesives: a research update*, in: Ambers, Janet et al.: *Holding it all together*, London 2009, S. 91- 98. In den Versuchen wurde Paraloid B44 in Lösung (Toluol) verwendet.

⁷⁴ Zugfestigkeiten lagen bei Down bei 6,99 N/mm² (p. 33), bei Paraloid B72 nur bei 6,25 N/mm², nach der Alterung im Dunklen bei 21,7 N/mm², bei Paraloid B72 bei 11,9 N/mm².

⁷⁵ MARQUES, SOFIA: *"Twelve Panels by Luca della Robbia: Conservation Issues"*, in: *Glass and ceramics conservation 2007. Interim meeting of the ICOM-CC working group; August 27 - 30, 2007, Slovenia, Nova Gorica, 2007*, p. 130–140. Kleber: Paraloid B44 in Aceton (1:1 mit 0,4% Kieselsäure als Verstärkung); Primer: Paraloid B44 (2maliger Auftrag 1:0,125 in Aceton); Carbonfaserdübel: Paraloid B44 (1:0,5 mit pyrogener Kieselsäure bis Pastenbildung).

⁷⁶ Auskunft durch Maja Ossig (PRODENKMAL Bamberg).

⁷⁷ Siehe auch: HORIE 2010, p.146.

⁷⁸ Z.B. LEENE, JENTINA.: *Textil conservation*, London 1972; UNGER, ACHIM: *Holzkonservierung. Schutz und Festigung von Kulturgut aus Holz*, München 1990; JÄGERS, E.: *Synthetische Materialien für die*

„Datenbank für Polymere als Konservierungs- und Restaurierungsmittel“ der FH Potsdam ist folgende Überblicksinformation zu finden: „KERAMIK: Es wurden in den 1970er und 1980er Jahren gute Erfahrungen mit dem Produkt gemacht. Positiv werden die gute Verarbeitbarkeit, die Löslichkeit in Alkohol und der gesundheitliche Aspekt im Vergleich zu lösungsmittelgelösten Klebstoffen erwähnt. Ebenso die nicht so starke Farbvertiefung wie bei Paraloid. Es sind keine Beispiele von Unlöslichkeit/ Irreversibilität bekannt. Als negativ wurden die leichten Vergilbung erwähnt, die jedoch bei Hinterfüllung bzw. Klebung keine große Rolle spielen würden.“⁷⁹ HORIE führt aus: „that it is fairly stable, oxidizes, yellows little, degrades slowly to become brittle, and does not cross-link significantly below its glass transition temperature“. Nur „Extreme UV conditions cause considerable cross-linking with some degradation, leading to an insoluble network.“ (HORIE 2010, p. 146).

Polyvinylbutyral als Klebstoff wird auf Ausgrabungen und in keramischen Sammlungen wie z.B. im NATURHISTORISCHEN MUSEUM IN WIEN⁸⁰, dem Lehrstuhl für Restaurierung, Konservierung und Grabungstechnik der HTW Berlin oder des ISTITUTO SUPERIORE PER LA CONSERVAZIONE ED IL RESTAURO, LABORATORIO RESTAURO CERAMICHE (siehe Anhang: Klebemittleinsatz und -techniken für großformatige Keramik-/Steinfiguren weltweit) eingesetzt.⁸¹

Neben der normalen Anwendung als Klebstoff durch Aufstreichen oder Auftrag aus der Tube⁸² gibt es die Technik des Verklebens durch Anzünden der Klebstoffschicht kurz vor dem Zusammenfügen, um die Aushärtungszeit zu verkürzen.⁸³ Zum Beispiel wird im NATURHISTORISCHEN MUSEUM WIEN Mowital in dieser Methode angewendet, um große Mengen poröser Scherben kleben zu können, die keine perfekten Passgenauigkeiten mehr bieten und bei denen zahlreiche Scherben fehlen. Ein weiterer Vorteil ist dabei die Wiederanlösbarkeit der Verbindungen, um die Scherben im Verlauf des Zusammenbaus korrigieren zu können. In eigenen Versuchen wurde die Methode getestet⁸⁴. Dabei wird 25%ige Mowitallösung (in Ethanol) mit dem Borstenpinsel ca. 2 mm dick auf eine der beiden zu verklebenden Bruchkanten aufgestupft. Durch kurzes Zusammenfügen verteilt sich der Klebstoff auf beiden Seiten. Die Bruchflächen werden an einem Handspiritusbrenner angezündet und je nach Flächengröße innerhalb mehrerer Sekunden nach dem Abbrennen verklebt (Abb. 14). Für sofortige oder spätere Korrekturen müssen die Scherben entlang der Rißlinien 20 bis 40 Sekunden über dem Brenner erwärmt werden. Die Thermoplastizität sorgt dafür, dass entweder nur kleine Winkeländerungen oder eine komplette Trennung der Scherben stattfinden kann. Evtl. muss bei einer Neuverklebung zusätzlich wieder etwas Kleber aufgetragen werden.

Eine Messung mit einem normalen Thermometer zwischen Scherben und Brenner ergab dabei höchstens 65° Grad, was dem Erweichungspunkt des Kunststoffes entspricht. Es sollte darauf geachtet werden, welche Wärmequelle gewählt wird und ob die Scherben die Temperaturen aushalten.

Die Vermutung, dass sich durch diese Methode eine Art Sollbruchstelle in der Klebeschicht bildet, die bei porösen Material dafür sorgt, dass die Klebung in der Klebeschicht und nicht in der obersten Materialschicht bricht, konnte durch KURARAY folgendermaßen geklärt werden:

Malschichtfestigung., in: DRV Mitteilungen 84-85, Jahrestagung Marburg 1984, S. 26-2. Großen Einsatz findet es laut der Firma KURARAY in der Versiegelung von fossilen Knochen. Auch Schmetterlinge werden wegen des guten Glanzes damit konserviert.

⁷⁹ Online unter: <http://polykon.fh-potsdam.de/polymer.php?id=1166&page=eigenschaften>, Stand: 24.11.2002.

⁸⁰ Keramikrestauratorin Gergana Kleinecke arbeitet seit ihrer Ausbildung in den 1980er Jahren zur Keramikrestauratorin in Bulgarien mit dem Produkt Mowital.

⁸¹ Mowital wird auch sehr häufig in niedrigeren Konzentrationen z.B. 10%ig in Aceton gelöst zur Tränkung von porös gebrannter Keramik (im Exikator) eingesetzt. (z.B. am Brandenburgischen Landesamt für Denkmalpflege; BECK, SABINE; LÜCK, KATRIN, „Tränkung von niedrig gebrannter und poröser Keramik“, in: Restaurierung und Archäologie, 2010, Band 3, S. 105–116).

⁸² Frau Schäuffelhut führte diese bereits in den Workshops im Chinaprojekt ein.

⁸³ Siehe auch dazu: Anhang: Tabelle: Klebemittleinsatz für großformatige Keramik-/Steinkunstwerke weltweit.

⁸⁴ Klebung der Replik eines Hallstattgefäßes, Klebung moderner Baukeramik, gemeinsame Versuche mit Restauratorin Frau Rintelen von den STAATLICHEN ANTIKENSAMMLUNGEN MÜNCHEN.

Beim Abbrennen wird das Mowital leicht (vor)vernetzt, damit also auch brüchiger und spröder und entspricht dann mehr einem dimensionsstabilen Duroplast. Dabei spaltet sich je nachdem unkontrolliert viel Wasser ab und vernetzt damit partiell. In diesem Fall wäre auch Anfügen der gelartigen Schicht eine Alternative zum Abbrennen, um schneller Lösungsmittel verdampfen zu können und trotzdem diese Sollbruchstelle zu erzeugen. Damit würden auch Bedenken vermieden, dass sich auf empfindlicheren Scherben Rußablagerungen durch die Flamme bilden können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Abbrennmethode eine Alternative für die Anwendung bei großen Mengen kleinerer Scherben ist, um schneller arbeiten zu können, für die großen Scherben der Figuren der Terrakottakrieger ist meist diese schnellere Arbeitsweise nicht erforderlich, bzw. wird bereits durch die Klimabedingungen beschleunigt. Für kleinere Scherben ist dagegen die Festigkeit des Klebstoffes ausreichend. Wie sehr die Vorvernetzung eine positive Wirkung auf die Stabilität der Klebung und gleichzeitig eine negative Wirkung auf die Wiederanlösbarkeit der Scherben hat, müsste in ausführlicheren Versuchen getestet werden.



Abb. 14: Alternative Klebmethode für Mowital durch Abbrennen



Abb. 15: Acht Jahre alte Klebungen von porösen, schlecht sitzenden Scherben (Naturhistorischen Museum Wien) mit Mowital B30H, das sehr gut wieder lösbar und wärmeaktivierbar ist (Höhe: ca. 70 cm)

Als bessere Lösung wurde dem Mowital B30H pyrogene Kieselsäure⁸⁵ zugegeben, um die Festigkeit zu erhöhen und für schlecht passende Scherben einen hochviskosen Klebstoff zu erhalten. Diese Maßnahme bestätigte die Firma KURARAY, da die Silicatpartikel auch im Polyvinylbutyral zu einem stabilisierendem Netz führen können (SiO-SiO-..). Bei KURARAY wird die Kieselsäure als Füllmaterial und Dispergiermittel eingesetzt, um die mechanische Festigkeit zu erhöhen. Allerdings ist es bei einer zu hohen Vernetzung natürlich nicht mehr löslich und fraglich ist auch, wie sauer die Mischung nach einer unkontrollierten Zugabe ist. Bei geringen Mengen von wenigen Prozenten tritt kaum eine Änderung ein.

In China gibt es eine Niederlassung von KURARAY, um das Produkt günstig zu kaufen: Unit 2207, 2 Grand Gateway, 3 Hongqiao Road, Xuhui District, Shanghai 200030, China. Hochrechnungen zum deutschen Einkaufspreis ergaben, dass es preislich ähnlich zu dem Epoxidharz liegt, wenn man von der fertig angesetzten Lösung ausgeht.⁸⁶ Obwohl das Produkt bereits in den Werkstätten bekannt ist und der gängige Einsatz für kleinere Teile bereits publiziert wurde, wird es praktisch noch nicht bei der Klebung der Figuren verwendet.⁸⁷

⁸⁵ Wirksamkeit bei verschiedenen Autoren für Paraloid-Typen genannt.

⁸⁶ Preis für Mowitalklebstoff in Lösung: ca. 8 Euro/kg (Bezug Kremer Pigmente, in China wahrscheinlich billiger, Ethanol kommt noch dazu); Preis für Phoenix 6101 Epoxy resin 1kg: 20.50 Yuan/kg \approx 2,46 Euro, Härter 1kg: ca. 50 Yuan \approx 5,99 Euro, Gesamt: 8,45 Euro für ca. 1,5 kg Klebstoff (Bezug bei www.epoxyresin.com.cn).

87

Siehe z.B.: RONG, BO; LAN, Desheng/ 容波; 蓝德省: *Erste experimentelle Studie zu einem Terrakotta Reperaturklebstoff/秦俑修复粘接剂实验初步研究*, 2003, Artikel online unter: <http://lib.cnki.net/cjfd/WEBO200302012.html>.

Folgende Informationen beruhen auf dem Austausch mit Herrn Dr. Frank, Anwendungstechniker bei KURARAY⁸⁸. Bei Mowital handelt es sich um ein thermoplastisches Material, das zwischen 100° bis 130° Grad beständig ist, d.h. wieder verformbar bleibt. Je höher die angehängte Zahl an den Produktnamen, desto stabiler, bzw. höher ist der Tg-Wert. In Frage kommen neben Mowital B30H das Mowital B60H oder auch das noch höher viskose B75 H, das allerdings nur noch 10%ig (entspricht ca. 25% B30H) in Lösungsmittel aufgetragen werden kann. Tests mit Probemengen (siehe Messungen) zeigen, dass B30 H die beste Anwendung ermöglicht (bei B75H ist auch die Schrumpfung zu groß). Mowital B30H verhält sich wie Glas, besitzt einen Erweichungsbereich bei ca. 60-73° Grad (genau: 68), ab 50° oder 60° Grad Umgebungstemperatur kann es unter Druck schmelzen, dies kann z.B. bei Lagerung zur Verblockung führen (diese Temperaturen sind allerdings in den Gruben nicht zu erreichen). Von „Fließen“ kann dabei nicht gesprochen werden.

PVB ist ein organisches Produkt das zwischen 350 und 500° restlos zu CO₂ und Wasser verbrennen kann (weshalb es als temporäres Bindemittel für Keramik verwendet wird).

Früher wurde es bei der Firma WACKER für Laminierfolien zwischen Glasscheiben bei Sicherheitsglas benutzt. Bei Solaranlagen sitzen die Folien zwischen ungerahmten Glasscheiben, wodurch sog. „Heat slide“-Effekte entstehen, d.h. die Gläser können sich bewegen, allerdings sind hier Weichmacher zugesetzt. Ab den 50er Jahren wurde Mowital großtechnisch hergestellt und seit den 60er Jahren unter diesem Produktnamen auch verkauft. In der Mischung mit Epoxidharzen wird es als Strukturklebstoff in der Autoindustrie eingesetzt, da es dann eine bessere Haftung auf Metall besitzt. Es lässt sich mit Titanharzen härter einstellen (z.B. für Siegellacke bei Joghurtdeckeln auf Bechern mit Zitronensäureester, dabei fällt der Tg-Wert stark, es bleibt bei Raumtemperatur klebrig) oder in Kombination für harte Dosenlacke verwenden (Bisphenolharze und PVB als weicher Anteil und bessere Verarbeitbarkeit).

Bei Tests von KURARAY wurde nur die thermische Zersetzung getestet⁸⁹ (z.B. bei einer UV-Bestrahlung bei einer halben Stunde von 190 nm), die zu einer leichten Gelbfärbung führt. Dabei werden Wasser und Essigsäure am Polymer abgespalten. Obwohl nur wenig am Polymer geändert wird, ist ein chromophores System sehr sensibel, so dass schnell eine Vergilbung eintreten kann. Zwar gibt KURARAY nur zwölf Monate Garantie auf die unverarbeitete Pulverform, sie haben aber bereits 20 Jahre altes Material in ihren Lagern, das sich augenscheinlich nicht verändert hat. Im Gegensatz zu WACKER, die für ihren Folieneinsatz leicht saures Mowital (früher: Pioloform®, das bei langer Lagerung die Papiersäcke zerstörte) eingesetzt hatten, stellt KURARAY ein leicht alkalisch stabilisiertes, widerstandsfähigeres Material her: Es wird unter sauren Bedingungen hergestellt, isoliert, gefiltert, gewaschen und basisch eingestellt, mit einem Überschuss an Protonen, sogenannten Alkalititern, was sehr wichtig für die Langzeitstabilität ist. Gibt man Vernetzer zur Stabilitätssteigerung hinzu wird es weniger reversibel (aktuelle Versuche der Firma). Mowital B30H besitzt nach Firmenangaben ein E-Modul von 2523 N/mm² (B60H: 2366 N/mm², B75H: 2655 N/mm²).

Bei Keramik haftet Mowital auch durch mechanische Verankerung, wenn das Lösungsmittel in die Poren ziehen kann. Als Lösungsmittel käme auch Ethylacetat in Frage, das noch schneller als Aceton verdunsten würde, allerdings ist in China ein langsames Verdunsten vorzuziehen.

Araldite AY103-1 und Härter HY991

Die Araldite-Epoxidharze der Firma HUNTSMAN sind seit 40 Jahren im Einsatz und werden in der Restaurierung seit den 1970ern verwendet. In der Anfangszeit wurden mit Araldite AY103-1

⁸⁸ Telefonische Auskunft (069-305-13345) über die Anwendung von Mowital, 25.1.2011.

⁸⁹ Brenntests, wie sie für die restauratorische Verklebung eingesetzt werden, wurden noch nicht durchgeführt.

z.B. glasierte Terracottareliefs⁹⁰ gefestigt, in den letzten zehn Jahren wird es aufgrund seiner hohen Klebkraft in der Stein- und Keramikrestaurierung für großformatige Kunstwerke genutzt.

Es gehört zu den Epoxidharzen, die in den Studien von DOWN aus 47 Produkten unter Licht- und thermischer Alterung am wenigsten zur Vergilbung neigten (unter normalen Museumsbedingungen).⁹¹ Es verträgt sich gut in der Kombination mit den Paraloid-Typen, wodurch sich die Verwendung als Primer anbietet. Im Gegensatz zu den chinesischen Epoxidharzen, deren Produkte in wesentlich geringerem Maße Angaben über ihre Inhaltsstoffe auflisten müssen, weist das Araldite eine bewährte Qualität auf. In der Klebmittelliste finden sich die genauen Angaben, die eigenen Zugfestigkeiten konnten nicht genau ermittelt werden, da sie zu hoch liegen, dennoch ist der Klebstoff beim Einsatz an den Figuren dem bisherigen Epoxidharz Phoenix Epoxy resin 6101 vorzuziehen. Zudem sollte der Einsatz auf ein Minimum beschränkt bleiben. Es sollte nicht wie bisher üblich z.B. auch eingefärbt zum Füllen von Fugen verwendet oder die Innenseiten, über die Klebefugen hinaus als Stabilisierungsmaßnahme, damit eingestrichen werden. Solche Maßnahmen sind gerade ohne trennende Primerschichten kaum rückgängig zu machen.

Verklebung mit Primersystemen

Grund des Auftrags einer dünnen Polymerschicht vor dem eigentlichen Klebstoff ist zum einen die Verbesserung der Adhäsion zum Substrat (Haftvermittler), zum anderen die bessere Abstimmung auf den Klebstoff.⁹² Es kann sich auch um einen Sperrprimer handeln, der vorhandene Kapillaren schließt und das Einwandern verhindert.⁹³ Sinnvollerweise bestehen die Primer aus verdünnten Lösungen der nachfolgenden Klebungen. Die Oberflächenbehandlung sollte möglichst in kurzem Abstand zur eigentlichen Klebung erfolgen.⁹⁴

In der Restaurierung ist der Begriff *Primer* nicht immer eindeutig und kann auch eine nur den Scherben abdichtende Schicht meinen. Bei KOOP heißt es jedoch eindeutig: „*Priming ensures better adhesive contact and a stronger join*“ and „*Priming is, in a sense, consolidation of the adherent surface, but should not be regarded as a substitute for consolidation*“⁹⁵

Wichtig ist das vollständige Durchtrocknen der Primerschicht vor dem Auftrag des Klebstoffes, da sonst noch enthaltene Lösungsmittel als Weichmacher wirken können.⁹⁶

In allen befragten Ländern (siehe Tabelle Klebemittel Einsatz und -techniken für großformatige Keramik-/Steinfiguren weltweit) wie Deutschland, Österreich, England, Italien, Spanien, den Niederlanden, und Portugal, werden bei leichten und mittelschweren Figuren immer und meist auch bei schweren Figuren Primer eingesetzt. Es handelt sich der Häufigkeit nach um Paraloid B72, Paraloid B44 und Mowital (in den Niederlanden auch um eine verdünnte Form des Epoxidharzes) in Lösungsverhältnissen von 5 bis 22%ig. In den meisten Fällen werden Primer mit der Begründung eingesetzt, die Klebung reversibel zu gestalten, weshalb eine möglichst dicke Schicht gewählt wird. Eine zu dicke Schicht kann aber dazu führen, dass der Primer wie eine eigene Klebschicht wirkt und einen zusätzlichen stärkeren Kleber überflüssig macht.⁹⁷

⁹⁰ HEMPEL, KENNETH F. B.: „Notes on the Conservation of sculpture, stone, marble and terracotta“ in: *Studies in Conservation*, 1968, 13/1, S. 34.

⁹¹ Siehe: DOWN 1996, p. 159, 5 von 47 Produkten.

⁹² STEINHILPER, WALDEMAR/SAUER, BERND: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1*, Berlin 2012, S. 447.

⁹³ PODOLA, TORE: *Abdichtung von Natursteinelementen mit verspritzbaren Dichtstoffen*, in: HINTERWALDNER, RUDOLPH: *Kleben, Leimen, Befestigen und Dichten im Hoch- und Tiefbau*, München 1993, S. 55.

⁹⁴ HABENICHT 1997, S.153f.

⁹⁵ KOOP, STEPHEN: „*The use of Acryloid B-72 in the treatment of archaeological ceramics: minimal intervention*“, in: *Materials issues in art and archaeology II. Symposium held April 17-21, 1990, San Francisco, California, U.S.A, Pittsburg, Pa, 1991, v. 185, pp. 591–596, p. 594.*

⁹⁶ PODANY 2001, p. 19.

⁹⁷ PODANY u.a. 2001, S. 4.

Optimale Konzentrationen und Schichtdicken müssen bei jedem Primer individuell ermittelt werden. Zudem hat das Lösungsmittel Einfluss auf die Eindringtiefe und Verarbeitung. Ein zu schnelles Einsaugen in poröse Oberflächen kann zu unzureichender Haftkräfteausbildung führen.⁹⁸

Der für die Testreihen ausgewählte Primer aus Paraloid B72 und Paraloid B44 (3:1, 17%ig in Aceton) wurde gewählt, weil diese Thermoplaste eine ausreichende Festigkeit aufweisen⁹⁹ und Paraloid B72 nachgewiesenermaßen auch in der Verbindung mit Epoxidharz besser reversibel ist (siehe *Reversibilität*)¹⁰⁰. Die Konzentration von 17% in Aceton wurde bereits bei PODANY ausführlich getestet. Die Mischung mit Paraloid B44 wurde gewählt, um den Primer widerstandfähiger zu gestalten. Zwar ist der Tg-Wert dieser Mischung noch nicht ermittelt, wird aber sicher wie bei MARQUES 2007 über dem von Paraloid B72 liegen, zudem besitzt Paraloid B44 eine höhere Härte und Festigkeit.¹⁰¹ Bei KREMER PIGMENTE wird sogar die Mischung (Paraloid B44: Paraloid B72: 30%: 70%) empfohlen, um die Wetterechtheit und Festigkeit des Filmes deutlich zu erhöhen.¹⁰² „B-72 is known to soften at 30-35°C (86-95°F) and can, at that point, yield“ (PODANY 2001 nach Selwitz, p. 5): Für die Temperaturen in Lintong ist deshalb die verbesserte Lösung mit Paraloid B44 eine gute Alternative zu reinem Paraloid B72, oder kann dieses ersetzen, auch wenn Paraloid B72 durch seinen breiten Einsatz in europäischen Museen wie auch in China als einziges bekanntes Arcylat gilt.

Die Auswahl des 17%igen Primers aus Paraloid B72/B44 diente auch dazu, die Zugfestigkeitsmessungen mit verschiedenen Klebstoffen zu vereinheitlichen und vergleichbarer zu gestalten. Erst bei folgenden Versuchen wurde z.B. bei der Klebung mit Mowital B30H auch der Primer aus Mowital gewählt, der dann auch noch bessere Ergebnisse lieferte. Ebenso wie die Acrylate verträgt sich das Polyvinylbutyral sehr gut mit Epoxidharzen und wird in Mischungen verwendet (siehe Information KURARAY zu Mowital).

Reversibilität der Maßnahmen

Grundsätzlich ist die Klebstoffindustrie daran interessiert Klebeverbindungen zu schaffen, die sich nicht mehr in der Klebfuge trennen, sondern höchstens weit daneben im Material. Wenn reversible Klebstoffe produziert werden, dann nur für den Kurzeiteinsatz. Damit sind sie nicht alterungsstabil.

Bei den für die Terrakotta eingesetzten Klebstoffen sollte geklärt sein, in wie weit die Klebungsmaßnahmen rückgängig gemacht werden können, die Gründe wurden bereits genannt. In früheren Untersuchungen des Projektes konnten sich unterschiedlich große Probekörperflächen, mit 17%igem Paraloid B72 bzw. Primal AC 33 als Primer und Araldite 2011 verklebt, nach 20 bis 40 Minuten durch Acetondämpfe voneinander lösen und einfach reinigen lassen.¹⁰³ Das Epoxidharz Araldite SV427 auf einem Primer aus Paraloid B72, bei Terrakotta verklebt, bleibt bei Versuchen mit einem Skalpell ohne Schäden lösbar.¹⁰⁴ Verklebungen von Prüfkörpern mit Paraloid B72 als Kleber und als Primer mit Epoxidharz Araldite AY 103-1 und Akemi Polyester ließen sich nach acht Stunden unter Lösemitteldampf lösen.¹⁰⁵ Auch Araldite 2020 (XW396/XW397) wurde in Testreihen auf seine

⁹⁸ Z.B. SCHÄUFFELHUT, STEPHANIE: *Klebung archäologischer Keramik*, Abschlussarbeit Fachhochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin 2000, S. 74.

⁹⁹ Z.B. DOWN 1996, p. 34.

¹⁰⁰ PODANY u.a. 2001, S. 15.

¹⁰¹ Datenblätter und DOWN 1996, p. 34.

¹⁰² KREMER PIGMENTE Katalog 2010/11, S. 91.

¹⁰³ BMBF-Forschungsbericht 1999/2000, S. 184. Die reine Araldite 2011 Verklebung ließ sich auch nach 24 h nicht lösen.

¹⁰⁴ ALLOIN 1997 bei MARQUES 2007, p. 136.

¹⁰⁵ PODANY u.a. 2001, S. 16.

Wiederentfernbarkeit getestet.¹⁰⁶ Grundsätzlich lässt sich sagen, dass mit Lösungsmitteln und hier besonders mit Lösungsmittelgemischen im Gegensatz zu Lösungsmittelgelen und Abbeizmitteln am effektivsten angequollen werden kann, An- und Auflösungen des Epoxidharzes konnten in keinem Fall erreicht werden. Durch die Lösungsmittelaufnahme bzw. Quellen des dreidimensionalen Epoxidharzgerüsts geht aber das Epoxidharz in einen hartgummiartigen Zustand über, bis nach kürzerer oder längerer Einwirkzeit Abplatzungen durch das Reißen des starren Gerüsts auftreten.¹⁰⁷ Dies kann bei einer Tränkung mit Epoxidharz auch zur Sprengung führen, weshalb der Einsatz von Epoxidharz auf die Klebfuge beschränkt bleiben und durch einen Primer am Eindringen in die Poren der Terrakotta gehindert werden sollte.

Wie bereits die Umfragen in anderen Ländern ergaben, sollten Primer als Zwischenschicht zwischen Epoxidharze aufgetragen werden, um die Klebverbindung reversibler zu halten. An allen Bereichen, an denen kein Epoxidharz notwendig ist, sollten besser lösliche Klebstoffe wie z.B. Acrylate oder Polyvinylbutyral verwendet werden.

¹⁰⁶ DERSCHAU VON, DORIT/UNGER, ACHIM: *Epoxidharz-Restaurierungen. Zum Problem der Entfernung*, in: *Restauro* 1998/7, S.486-493.

¹⁰⁷ Gemessen wurden Volumenquellmaß und Lösungsmittelaufnahme verschiedener Lösungsmittel und Lösungsmittelgemische wie z.B. Dichlormethan, Aceton, 1,3 Dioxolan, Dimethylformamid, Dichloroform.

Die modellhafte Klebung einer Terrakottafigur

Im Rahmen der Projektphase 2011 bis 2013 sollte zusammen mit den chinesischen Wissenschaftlern vor Ort eine Terrakottafigur modellhaft geklebt werden. Vorarbeiten und Testreihen wurden größtenteils zuvor an der TU München und bei Arbeitsaufenthalten vor Ort geleistet. Im Folgenden ist ein Überblick über die Maßnahmen und Aufenthalte zusammengestellt.

Maßnahmen für die Klebung

2011

- Literaturrecherche zum Klebstoffeinsatz zu großformatigen Terrakotta/Steinfiguren weltweit
- Verbesserung eines Anforderungskatalog zur Auffindung eines geeigneten Klebstoffs
- Besuch und Gespräche mit Klebstofffirmen (besonders: HINTERWALDNER CONSULTING)
- Sammeln und Auswerten zugesandter Produkte
- Vorversuche und Beginn Zugfestigkeitsmessungen an ausgewählten Produkten
- Modifizierung der Terrakottatestkörper für die Zugfestigkeitsmessungen
- Auswahl und Tests von Füllstoffen für die Klebstoffe
- Beginn der Berechnung für die benötigte Kraft eines Klebstoffes an den Terrakottafiguren

2011-3-21 bis 2011-4-1

Erster Arbeitsaufenthalt und Treffen im Museum der Terrakottakrieger und Pferde des Qin Shihuang mit den verantwortlichen Restauratoren Lan Desheng (Werkstattleiter), Rong Bo, Xi Na, Zhang Yi und Li Bin.

- Diskussion mit Erkundigung über die Bedingungen in den Gruben und den Werkstätten im Hinblick auf die Klebung
- Austausch über die momentane Situation des Klebens, die Technik und die verwendeten Materialien
- Gemeinsame Klebe- und Lösungsversuche mit den chinesischen Epoxidharzen und mitgebrachten Klebstoffen (Mowital B30H, Paraloid B44) an dortigen Prüfkörpern.

2011-10-17 bis 2011-10-20

Austausch und Anregungen auf dem CCI-Symposium „Adhesives and consolidants for conservation: research and applications“ in Ottawa, Kanada

2012

- Genaue Kraftberechnungen für Bruchstellen wie z.B. den Armansatz eines Terrakottakriegers
- Nach den entsprechenden Zugfestigkeitsmessungen und weiteren Versuchen: Auswahl von Klebstoffen zum Einsatz in Lintong
- Testreihen zu verschiedenen Aufstrichen und mit verschiedenen Primern des Klebstoffsystems Mowital
- Praxistests an einer Terrakottakopie eines Kriegers: Reversibilitätsversuche neuer und in früheren Workshops geklebter Scherben
- Tests und Bau von Hilfsmitteln zum Halten der Fragmente während des Aushärtens der Klebstoffe

- Nach dem Aufenthalt in Lintong: Lösungsfindungen für die (Splitter-)Brüche an den Beinen der Figur, vor allem für die Füllung des Hohlraumes
- Zusammenarbeit mit dem Kollegen Daniel Jöst (Steinrestaurierung des Bayerischen Nationalmuseums München): Vorversuche mit der neuen Variante des Steinklebers von Herrn Pung
2012-8-19 bis 2012-9-24

Arbeitsaufenthalt mit der Studentin Charlotte Höpker im Museum der Terrakottakrieger und Pferde, Lintong

- Verschiedene Vorversuche an chinesischen Terrakottaprüfkörpern zu Primern und Klebstoffen
- Beginn der Arbeiten an dem Terrakottakrieger T23G10-26 aus der Grube 1 in den Werkstätten des Museums zusammen mit den Kollegen Li Bin, Wang Dongfeng, Lan Desheng und einigen Hilfskräften: Klebung von Torso, Kopf sowie der Füße mit anfangs chinesischem Epoxidharz, später Araldite AY103 mit Primern und Mowital B30H mit Primer
- 2012-9-20 bis 2012-9-22: Konferenzteilnahme in Xi'an, Jiaotong Universität: „*International Conference on Modern Chemical Technology in the Protection of Cultural Heritage*“

2012-4-10 bis 2012-5-15

Arbeitsaufenthalt chinesischer Kollegen in München: Rong Bo, Li Bin

- Vorstellung, Versuche und Bewertung zu den verschiedenen Klebstoffen an Terrakottaprüfkörpern zur Klebung des Kriegers; unter anderem auch Zugfestigkeitsmessungen im Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege

2013

- Im Hinblick auf den Arbeitsaufenthalt (2ter Teil der Klebung des Kriegers T23G10-26): Vorversuche zu Füllstoffen und Klebmitteln zur Restaurierung des Splitterbruchs der Schienbeine, passend zu bereits eingesetzten Klebsystemen
- Abschließende Zugfestigkeitsmessungen nach Modifizierung der Testkörperherstellung
- Löslichkeitsversuche an dem Steinkleber von Herrn Pung
- Tests von mitgebrachten chinesischen Klebstoffen (Epoxidharze, Celluloseklebstoff)
- Vorbereitung von Versuchen und Tests zu Ergänzungsmassen (Einbezug von Bindemitteln und Füllstoffen aus Deutschland und China)
- Dokumentationsaufarbeitung über den abschließenden Aufenthalt zur Klebung des Kriegers
- Abstimmung weiterführender Arbeiten an den Figuren/Klebstoffen/Untersuchungen

2013-4-1 bis 2013-4-26

Arbeitsaufenthalt im Museum der Terrakottaarmee des Qin Shihuang mit Studentin Charlotte Höpker zur Fertigstellung des Terrakottakriegers T23G10-26

- Fortsetzung der Arbeit des Aufenthalts 2012
- Ergänzungen und Klebung für das instabile, gebrochene Bein
- Bau einer speziellen Konstruktion für gleichzeitige Bearbeitung von Beinen und Rumpf
- Klebstoffe für schlecht passende Scherben Restauratoren Li Bin, Wang Dongfeng, Lan Desheng und Hilfskräfte des Museums mit.

2013-6-17 bis 2013-7-16

Arbeitsaufenthalt chinesischer Kollegen in München: Lan Desheng (Werkstattleiter), Restauratoren Li Bin, Zhu Zhenyu

- Vorbereitung des Arbeitsaufenthalts im April
- Versuche zum Verhalten verschiedener Füllstoffe bzw. Ergänzungsmaterialien für Terrakotta. Tests an selbst hergestellten Terrakottaprüfkörpern, Eigenschaftsbewertung
- Besuch der Mitarbeiter Herrn Rupert Utz und Herrn Uli Meinhard von ProDenkmal, Bamberg (Besprechung zur Vorgehensweise zu den Messungen in Grube 1)
- Besuche und Informationen zur Einrichtung eines Labors für Stein- und Keramikuntersuchungen in Lintong

2013-9-10 bis 2013-9-16

Abschlußkonferenz in Xi'an: "Symposium of Qin Terracotta Army and Polychrome Cultural Relics Conservation and Research – Chinese-German Cooperation in the Preservation of Cultural Heritage – Results of Research and Conservation" mit Vortrag: "*Gluing one broken terracotta sculpture – considerations and procedure*"

Der Arbeitsplan

Für die ersten fünf Arbeitswochen in Lintong war die Vorbereitung und Klebung einer Terrakottafigur aus der Akrobatengrube K9901 geplant, in der seit dem Neubau über der Grube 2011 wieder ausgegraben wird. Vor Ort stellt sich jedoch heraus, dass für die Klebung einer vollständigen¹⁰⁸ Figur aus der Akrobatengrube von den Archäologen bisher zu wenige Fragmente geborgen worden sind. Außerdem sind viele der erdfeuchten Fragmente noch nicht gereinigt bzw. ihre Farbfassung noch nicht gefestigt (was mit langen Wartezeiten einhergeht). Es wird außerdem von chinesischer Seite vermutet, dass die Terrakotta dieser Grube eine andere Qualität wie die der Grube 1,2 und 3 aufweist.¹⁰⁹

Es wurde daher von chinesischer Seite entschieden eine Terrakottafigur aus Grube 1 mit der Inventarnummer T23G10-26 zu restaurieren. Dieses Terrakottamaterial ist bereits ausführlich untersucht worden. Das Zusammensetzen und Kleben sollte in der Keramikwerkstatt in Zusammenarbeit mit den chinesischen Restauratoren Li Bin, Lan Desheng (Werkstattleiter), Wang Dongfang und den dort arbeiten Mitarbeitern stattfinden.

Zur Vorbereitung gehörten bereits in Deutschland anhand ihrer durchgeführten Untersuchungen ausgewählte Primer und Klebstoffe sowie deren für den jeweiligen Fall angepassten Lösungskonzentration. Zudem sollten vor Ort nochmals Vorversuche an dafür bereitgestellten Testkörpern stattfinden.

Auch seit längerem von chinesischer Seite geplant waren Zugfestigkeitsmessungen von Mowital B30H, die in der Jiaotong Universität in Xi'an gemessen werden können. Wegen fehlender Prüfkörper konnten weder die Zugfestigkeitsmessungen noch die von chinesischer Seite gewünschten Tiefeneindringtests mit unterschiedlichen Primern und die Benetzungstest durchgeführt werden. Letztere wurden allerdings bereits in Deutschland, auch mit Probenfragmenten aus Lintong, als auch die Zugfestigkeiten, getestet.

Zudem sollen die mitgebrachten Hilfsmittel zur Unterstützung während des Klebens bzw. trocknen Zusammenfügens zusammen getestet und erklärt werden. Dazu zählen das

¹⁰⁸ Vollständigkeit meint nicht das Vorhandensein aller Fragmente, aber grundsätzlich von Körper, Kopf sowie beiden Beinen und Armen.

¹⁰⁹ Von Xia Yin wird vermutet, dass die Qualität schlechter ist, da teilweise keine Lackgrundierung zu finden sei, größere Risse und Hohlräume in der Terrakotta zu finden sind als im Material von Grube 1 und 2 und die Wände unterschiedliche Stärken aufweisen. Probleme bereiten auch der Schimmel auf den noch feuchten Fragmenten, die schichtweise ausgegraben werden, allerdings ist die Grube trockner als Grube 1, der Grundwasserspiegel liegt bei 20 bis 30 m. Bis zu Arbeitsbeginn wurden 27 Figuren gereinigt, teilweise sind nur Torsi vorhanden.

Vakuumpad und Polyesterkissen der Firma Polypad, die Gewindestange für Innenbereiche, Zuggurte und Klettbänder.

Bereits ausgewählte Klebstoffe

Die Auswahl von möglichen Klebstoffen und Primern erfolgte bereits in Deutschland aufgrund geeigneter Materialeigenschaften, Versuchen und zum Schluss durch praktische Tests an der Kopie eines Terrakottakriegers (Abb. 16)¹¹⁰.



Abb. 16: Teil der Kopie eines Terrakottakriegers während der Einspannversuche

Aktuell benutzen die Chinesen für große Bruchstücke das Epoxidharz Phoenix Epoxy Resin 6101 und Hardener 650 mit einem Primer aus Paraloid B72 (2-4%ig in Aceton). Für kleine bis mittlere Bruchstücke gibt es die chinesische Variante des Einkomponenten Kontaktklebstoff „Pattex Contact Adhesive Transparent“ von Henkel aus der Dose, ein Polyurethan in organischen Lösungsmitteln (Aceton). Daneben wird ein chinesisches Zweikomponenten Epoxidharz aus der Tube (PY – AAA Chaonengjiao/ 合众 AAA 超能胶/Superglue AAA), das dem deutschen Uhu plus 300 endfest entspricht, für die kittende Klebung verwendet, indem es mit Terrakottamehl vermischt wird.¹¹¹ Weiterhin wird mit Klebstoffen experimentiert: z.B. dem Zweikomponenten Sk-138 Epoxidharz und Härter. Alle Klebstoffe finden

sich mit näheren Informationen in der Klebemittelliste im Anhang.

Wegen der nötigen hohen Glasübergangstemperatur, dem sehr guten Reversibilitätsverhalten und der Langzeiterfahrung soll als Hauptklebemittel Mowital B30H gelöst in Alkohol eingesetzt werden. Ein Primer wird in diesem Fall nicht aus Reversibilitätsgründen benötigt, sondern um zwischen dem porösen Terrakottamaterial und dem viskosen Klebstoff eine bessere Haftungsbrücke durch Sättigung der Poren zu erhalten.

Für das Acrylharz Paraloid B72, das bereits seit 1999 eine Verbesserung der Klebtechnik darstellt, weil es als Primer für die Epoxidharze eingesetzt wird, wurde das Acrylharz Paraloid B44 (gelöst in Aceton) empfohlen, weil es eine höhere Glasübergangstemperatur besitzt. Die Alterungseigenschaften ähneln denen von Paraloid B72, bzw. sind sogar besser geeignet (siehe: Reine Verklebung, Paraloid B44). Der Hauptgrund für den Wechsel ist das geringere Risiko des Kriechens des Klebstoffes unter den Klimabedingungen in der Grube, wo die Temperaturen durchschnittlich bis -2 °C im Januar und durchschnittlich 28 °C im Juli erreichen, Maximalwerte lagen 2011 bei 36,5 °C im Juli, im Januar bei -7° C.¹¹²

Passend zu Paraloid B44 als Primer¹¹³ soll von chinesischer Seite zuerst das chinesische Epoxidharz Phoenix Epoxy Resin 6101/ Hardener 650¹¹⁴ als Klebstoff verwendet werden, allerdings sollte es, sobald möglich, mit dem Epoxidharz Araldite AY103-1 und Härter HY 991¹¹⁵ ausgetauscht werden, da dessen Zusammensetzung und Langzeiteinsatz besser bewährt sind.

¹¹⁰ Der Terrakottadummy aus Lintong wurde bereits 1999 für Klebeversuche benutzt (Stephanie Wallner, Xia Yin, Lan Desheng). Seit dieser Zeit wird in Lintong das Acrylharz Paraloid B72 als Primer unter Epoxidharz eingesetzt.

¹¹¹ Ein Sicherheitsdatenblatt halten nur die dt. Uhuwerke bereit, siehe Anhang: Klebemittelliste Überblick.

¹¹² Einfache Auswertung der Klimadaten von 2011, siehe: Klimasituation vor Ort.

¹¹³ Paraloid B44 sollte in Aceton gelöst sein, dass sich das Lösungsmittel besser mit Araldite verträgt als Ethanol.

¹¹⁴ Weitere Angaben im Anhang. Bei der Firma sind wenig aussagekräftige Informationen zu bekommen, die allgemeine Information ist im Anhang übersetzt beigefügt.

¹¹⁵ Hergestellt von HUNTSMAN, siehe: Verklebung mit in der Restaurierung bewährten Klebstoffen.

Vorversuche

Obwohl die Konzentrationen der Klebstoffe und Primer in Deutschland getestet wurden, sollten zusammen verschiedene Konzentrationen an Bruchstücken bzw. den zu klebenden Scherben erneut überprüft und ausprobiert werden. Deshalb stellte man als erstes folgende Primer-Lösungen in Mengen von ca. 20 g bis 50 g her:

Mowital B30 H in Ethanol: 15%, 10%, 5%, 3%, 2%

Paraloid B44 in Aceton: 15%, 10%, 5%, 2%

Für die Tests wurden niedrig gebrannte, graue Terrakottaziegel (22 cm x 11 cm x 6 cm), die wahrscheinlich als Bodenfliesen gedient haben zur Verfügung gestellt, von denen sich durch Zerschlagen mit dem Hammer passende Bruchstücke herstellen ließen, die eine gebrochene statt einer geschliffenen Oberfläche aufweisen und so optimale Saugeigenschaften zeigen.¹¹⁶ Die Primer wurden mit einem relativ harten Pinsel einmal flächig aufgetragen. Zum Vergleich, und da auch die Chinesen ihren Primer bisher in zwei Durchgängen auftragen, wurden nach ca. 1 Minute weitere Bruchstücke ein zweites Mal eingestrichen, bzw. zuerst mit 5%iger und anschließend mit 10%iger Lösung behandelt.

Sofort danach und nach einer Stunde Trockenzeit wurden Glanzgrad, Auftragsstärke und Sättigung beurteilt. Dabei müssen der 5%ige Auftrag als zu gering, der zweimalige und dreimalige 10%ige Auftrag als zu stark eingeordnet werden: Sie würden eine eigene Schichtstärke zur Klebeschicht bilden.



Abb. 17: Anwendungstests mit verschiedenen Primerkonzentrationen von Mowital B30H auf Bruchstücken von Terrakottaziegeln

Anhand erster Versuche an originalen Fragmenten wurde 15%iges Paraloid B44 als Primer für die Epoxidharzklebungen (60% Epoxidharz + 40% Härter) und 10%iges bis 15%iges Mowital B30H für die Mowitalklebungen (25%ig in Ethanol) gewählt. Es stellte sich heraus, dass die Konzentrationen stark von dem unterschiedlich porösen und damit saugfähigem Terrakottamaterial abhängig sind (Abb. 18, 19). So werden bei Bruchkanten von Kopf, Händen und dem Oberkörper weniger hohe Konzentrationen benötigt als bei Beinen, Unterseite des Torso und der vom Material saugfähigsten, da am größten gemagerten Bodenplatte. Dies hängt natürlich auch mit der Gestaltung der Figuren zusammen, bei der das feinste Material für die feine Modellierung von Kopf und Händen verwendet wurde. Deshalb können nur Bereiche der Konzentrationen angegeben werden, 2% bis 5%ige Konzentration, wie sie bis jetzt eingesetzt wurden, sind allerdings viel zu niedrig, um noch eine maßgebliche Wirkung auf die

¹¹⁶ Die chinesischen Terrakottaprüfkörper, die 2011 in München zum Vergleich herangezogen wurden, konnten in China für diesen Aufenthalt nicht beschafft werden und die Sägeeinrichtung zum Schneiden für eine evtl. größere Probenmenge nicht verwendet werden.

Reversibilität zu haben. Bei diesen Konzentrationen, bei denen kein Glanzgrad auf der Oberfläche erscheint, dringt das Epoxidharz auf jeden Fall in die Poren ein.



Abb. 18: Feingemagertes, weniger saugfähiges Terrakottamaterial des Kopfes (Fragment Nr. 61)



Abb. 19: Gröber gemagertes, stark saugfähiges und poröseres Terrakottamaterial der Beine und der Bodenplatte (Fragment Nr. 5)

Weitere Versuche betrafen die Viskositätserhöhung der eingesetzten Klebstoffe um schlecht passende Scherben mit stark abgearbeiteten Flächen zu kleben (Abb. 20). Ein anderer Einsatz sind Scherben, die kaum Kontakt zu anderen Fragmenten haben, da der Versatz zu groß ist. Dazu wurde sowohl Mowital B30H als auch das Araldite AY103-1/HY991 mit verschiedenen Mengen an Füllstoffen auf und zwischen Terrakottaprüfkörpern getestet. Zu den Füllstoffen gehörten Quarzmehl, Aerosil 200, Hohlglaskügelchen, Arbocell grob und fein und Terrakottamehl. Die Omegasilprodukte (Steinkohleflugasche) hatten sich schon zuvor aufgrund ihrer schlechten Verteilung im Klebstoff ausgeschlossen. Die Mischungen mit Quarzmehl erweisen sich als zu grob und hart für den benötigten Einsatz. Das Mowital verliert bei zu viel Füllstoffanteil von Quarz- und Terrakottamehl zudem an Klebkraft. Mowital mit Arbocell grob kann als Hinterfütterungsmaterial eingesetzt werden (es bleibt sehr gut löslich). Am besten eignet sich das Aerosil 200, das bereits in geringen Mengen für die richtige Viskosität sorgt, ohne die Klebkraft zu senken. Beim Mowital kann aufgrund der Füllstoffmenge die Wiederanlösbarkeit beeinträchtigt sein. Aber die verdickten Klebstoffe werden nur in einigen Ausnahmen eingesetzt: für drei Fragmente am Körper sowie zwei Vertiefungen an der Bodenplatte zu den Füßen.



Abb. 20: Stark abgearbeitete, schlecht passende Bruchante (teilweise Ansammlung von Zuschlag)

Auch in Lintong fanden einfache Wiederanlösversuche zu dem chinesischen Epoxidharz Phoenix Epoxy resin 6101 mit und ohne Primer, dem Mowital B30H und dem Paraloid B44 an Terrakottaprüfkörpern statt. Zum einen wird mit Kompressen (Aceton/Ethanolmischungen) unter Folie (ca. 6h) eingewirkt, zum anderen mit dem Heißluftfön. Aufgrund der hohen Tiefe der Testkörper und der stark porösen Bruchflächen brauchen alle Klebverbindungen längere Einwirkzeiten als in Deutschland. Mit Einlegen in Aceton lässt sich Paraloid B44 lösen. Mowital B30H gibt bei Einlegen in Ethanol und zusätzlichem Druck nach. Das chinesische Epoxidharz bricht nach längerer Einlegphase in Aceton und starkem Druck in der Nähe der geklebten Fläche.

Überlegungen, Vorgehensweise und Restaurierung einer Terrakottafigur

Die von den Archäologen freigegebenen Fragmente des Kriegers T23G10-26 wurden in die Restaurierungswerkstatt für Keramik gebracht, wo die Figur gemeinsam mit den chinesischen Restauratoren wiederaufgebaut und zusammengeklebt werden soll. Viele der Figuren, die weniger Farbfassung aufweisen werden auch direkt in der Grube 1 geklebt, in der Akrobatengrube finden die Arbeiten in dem nebenanliegenden, vergläserten Bereich statt (Abb. 21. Akrobatengrube: Ausgrabungssituation 2012-4).

Die Bergung der Fragmente findet teilweise im Block mit Cyclododecan in Anlehnung an die Methode von Sandra Bucher zur Bergung der Steinpanzer statt (Abb. 23). Anschließend werden die Blöcke oder Fragmentkisten per Hand und Seilen aus der Grube gehoben. Hilfsmittel, wie Kräne, werden als zu schwer für die Zwischenstege der Akrobatengrube, die bereits starke Risse aufweisen, angesehen.



Abb. 21: Akrobatengrube: Ausgrabungssituation 2012-4 vor Beginn des Aufenthaltes (Foto: Rong Bo)



Abb. 22: Akrobatengrube (2013-8): Bergung der Fragmente in Kisten und im Block



Abb. 23: Blockbergung mit Cyclododecan von empfindlichen Fragmenten (Fassung)

Einrichten des Arbeitsplatzes

Das Arbeiten in der Werkstatt bietet einige Vorteile gegenüber dem Arbeiten in der Grube: Weniger Staub und Ablagerungen auf den zu klebenden Bruchflächen; bessere Laborausstattung mit Abzugsanlage zum Abwiegen und Ansetzen der Epoxidharze, bessere Klima- und Beleuchtungsbedingungen.

Dafür wird ein Arbeitsplatz mit größeren Ablageflächen für einen Teil der Scherben zur leichteren Übersichtlichkeit eingerichtet. Zur Verfügung steht ein stabiles Metallrahmengestell von ca. 60 cm Höhe, bei dem zwei zusätzliche, horizontal verlaufende Stege flexibel feststellbar sind. Dieses Gestell wird benutzt, um die Figuren vom Rumpf her, noch ohne Beine, trocken aufzubauen und auch um sie darauf später zu kleben. Außerdem befindet sich sämtliches Werkzeug, Abpolsterungsmaterial, Schnüre und Gurte zum Verspannen sowie die Fotoeinrichtung in unmittelbarer Nähe.

Dokumentation der Figur TG23G10-26

Bereits vor Ort werden die einzelnen Figuren und Pferde von den Archäologen einmal grob zusammengesetzt (Abb. 27), um die Fragmente zuordnen zu können, evtl. werden auch bereits

Teile geklebt, bevor sie verloren gehen. Die vorliegende Figur wurde im Sektor T23 in der Grube 10 am südlichen, mittleren Rand geborgen (siehe: roter Pfeil in der Abb. 25).¹¹⁷

Die Fragmente werden danach in Kisten an die Restauratoren übergeben, die eine Kurzdokumentation mit Zeichnung anfertigen, sowie alle Fragmente fotografieren und nummerieren. Nach der Reinigung mit einem Ethanolwassergemisch, Wattestäbchen und mechanischen Hilfsmitteln wie Skalpelle werden die Fragmente nochmals allseitig fotografiert. Eine Liste der Fragmente befindet sich auf CD, sie wurde im Laufe der Arbeiten um die zusätzlich gefundenen und kleineren Fragmente erweitert, da oft nur Bruchstücke über mehrere Zentimeter aufgenommen werden.

Es handelt sich um 84 nummerierte (Abb. 24) und gereinigte und mehrere hundert unnummerierte, oft wenig gereinigte Fragmente.



Abb. 24: Überblick über die nummerierten Fragmente von Figur T23G10-26 vor der Reinigung (Aufnahme: Lan Desheng)

¹¹⁷ Im Jahr 2011 wurden nach Aussage von Lan Desheng 24 Figuren (Nr. 2, 3, 4, 5, 7, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 31, 32, 36, 37) aus Sektor 23 fertig restauriert und geklebt, davon zwei im letzten Monat (2012-2/3) und 7 davon aus Grube 10 (insgesamt 69 Figuren in Grube 1). Im August 2013 sind bereits 36 Figuren fertiggestellt.



Abb. 25: Fundsituation Terrakottakrieger (roter Pfeil), Sommer 2010 (Foto: Museum der Terrakottaarmee)



Abb. 26: Nahaufnahme Fundsituation Terrakottakrieger Tg23G10-26 (Foto: Museum der Terrakottaarmee)



Abb. 27 : Erster Grobzusammenbau der Archäologen in der Grube (Foto: Museum der Terrakottaarmee)

Beschreibung der Figur TG23G10-26

Es handelt sich um die Sorte von Kriegern, die am meisten in der Armee vorhanden sind: einen Fußsoldaten mit angewinkeltem rechten Arm und einer wohl ehemals einen Speer greifenden Hand. Er ist über seiner Langjacke gepanzert: auf der Brust sitzen acht Reihen Platten, auf der Rückseite sieben, dazu besitzt er auch einen Armschutz. Unter den knielangen Hosen sind die spiralförmig von links unten nach rechts oben gewickelten Wickelgamaschen mit Schleifenabschluss zu sehen.

Die Frisur besteht aus einem flachen Haarknoten, dessen Zopf mit einer quadratischen Spange festgesteckt ist. Dazu trägt er einen Schnurrbart mit herabhängenden Enden und ein kleines Bärtchen unter der Unterlippe.

Maße und Gewichte

Zu den 83 nummerierten Fragmenten konnten 36 weitere Fragmente der Figur zugeordnet werden, davon sieben aus der Grube Nr. 1 (rechte Hand, Schuh Schleifen, Finger, Fragment mit Oberfläche, Abb. 28, 29). Alle diese Fragmente wurden gewogen und fotografiert, eine Liste findet sich im Anhang.

Der Kopf wiegt 5,45 kg und die beiden Arme jeweils 4,90 kg und 5,13 kg. Alles zusammen kommt die Figur mit der Bodenplatte von 7,79 kg auf ein Gesamtgewicht von 176,86 kg bei einer Größe von 1,87 m und einer Tiefe von 53 cm (Breite: 59 cm). Die Bodenplatte misst 36 x 35 x 3,7 cm. Alle Werte sind üblich für vergleichbare Terrakottafiguren.



Abb. 28: Zusätzlich gefundene Fragmente aus Grube 1



Abb. 29: Rückseite: Schleife linkes Bein mit Werkzeugspuren

Farbfassung

Im Vergleich mit gut erhaltenden Terrakottafiguren besitzt er wenig erhaltene Fassung, die teilweise wohl während der Lagerung und damit auch durch Austrocknung verloren gegangen sein muss. Das zeigen die Vor- und Nachzustandsbilder der einzelnen Fragmente. Dennoch gibt es ein paar Fassungsreste, die während und nach dem Zusammenbau auch zeichnerisch dokumentiert wurden (Anhang: Dokumentation der Farbfassung).

Die am besten erhaltene und dickste Bemalung von rosa mit Resten von Lack lässt sich an den Füßen in der Vertiefung zu den Schuhen und an den Knöcheln finden (Abb. 30). Auch am seitlichen Schuhband des linken Fußes sind kleine Reste grüner Bemalung erhalten (Abb. 31).



Abb. 30: Rechter Knöchel: Rosafarbene Fassung



Abb. 31: Linker Fuß: Grüne und rosafarbene
Fassungsreste

Ein Grün mit ockerfarben findet sich auch noch auf einer später aufgefundenen Fragmenteansammlung, die zwischen den Beinen des Kriegers durch den Druck der Beine herausgebrochen ist und in deren Nähe keine weiteren Farbspuren mehr zu finden sind (Abb. 35). Gut erhaltene Reste weist auch die linke Hand auf, die nachträglich in Grube 1 gefunden wurde und noch frisch gefestigt worden ist (Abb. 36). Der Daumen der rechten Hand zeigt nur geringe hell rosa Bemalungsreste, obwohl seine restliche dunkle Farbe auf eine starke Tränkung mit Festigungsmittel hindeutet (Abb. 34).

Kleine Spuren von Weiß finden sich auch in Auge, am Mund, dem rechten Ohr und der Haarspange (Abb. 32, 33). Einige, teilweise auch später gefundene Verbindungsstiche zeigen rote Fassungsreste. Für Vergleiche und eine genauere Interpretation siehe dazu: BLÄNSDORF, CATHARINA: *Studien zur Farbfassung von Figuren aus der Terrakottaarmee und aus anderen Beigabengruben der Grabanlage des Ersten chinesischen Kaisers Qin Shihuang*, Dissertation, Staatliche Akademie der bildenden Künste Stuttgart, 2014.



Abb. 32: Rechtes Ohr, weiße Fassungsreste

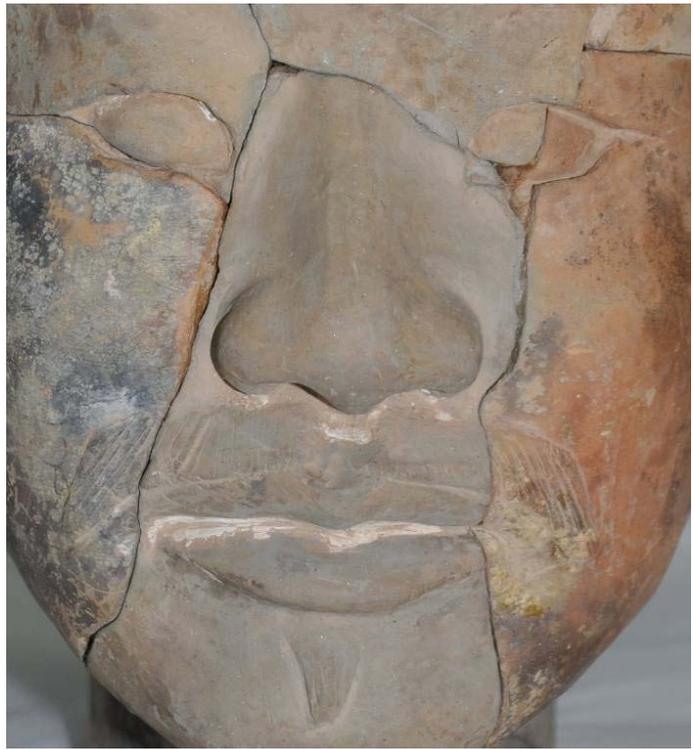


Abb. 33: Gesicht mit weißen Fassungsresten



Abb. 34: Daumen (rechte Hand), rosafarbene Fassung



Abb. 35: Unterseite, zwischen den Beinen: Fragmente mit grüner und ockerfarbener Fassung



Abb. 36: Linke Hand mit gut erhaltener Fassung

Verfärbungen, Arbeitsspuren und Techniken

Bereits am Fundort der Figur kann man erkennen, dass sie auch dem Feuer in den Gruben ausgesetzt war.¹¹⁸ Viele der Scherben sind dadurch von grau zu rot verfärbt worden. Je nach Fundlage gibt es zwischen weiter auseinanderliegenden Scherben harte Farbgrenzen (was das Zusammenpuzzeln nach Farbe erschwert) oder fließende Übergänge. Während die Beine gar nicht betroffen sind, zeigt der Oberkörper der rechten Seite, der den Abschluss der Figurenreihe zur Wand bildete, zusammen mit dem Kopf die größte Verfärbung (Abb. 99).

Im rechten Armstumpf (Abb. 44), in welchem die Hand zusammen mit Terrakottabruchstücken und Lehm eingesteckt war und die sich inzwischen gelockert hat, lassen sich Reste schwarzer Kohle finden.

Neben dem Aufbau der Hosenbeine aus gerollten Platten wurden die Arme, teilweise wahrscheinlich auch die Körper mit gerollten Lehmwürsten aufgebaut, die anschließend mit Modellierhölzern verdichtet und verstrichen wurden. Dies lässt sich z.B. an den äußeren Oberflächen (Abb. 38) oder im Innenraum des Armes (Abb. 43) erkennen. Im Innenbereich des Körpers wurde auch mit den Daumen verdichtet (z.B. Abb. 47), an vielen Stellen sind dabei Fingerabdrücke der Arbeiter erhalten geblieben (Abb. 39, 40, 42).

An einem Bein befinden sich mehrere kleine gebrochene Teile, die allerdings fest mit dem Untergrund verbunden sind (Abb. 46). Bei genauerer Untersuchung, auch des anschließenden Beines, stellte sich heraus, dass es sich um eine entstehungszeitliche „Klebung“ handeln muss.¹¹⁹ Dies würde auch zu der These passen, dass die Beine bereits eingebaute Schwachstellen besaßen. Für die perfekte Wiederverklebung musste die historische Restaurierung allerdings gereinigt und mit einer dünneren Klebschicht, besser passend verklebt werden. Von der Erdlagerung befinden sich oft Abdrücke und schwarze Verfärbungen von Pflanzenwurzeln an den Oberflächen (Abb. 41).

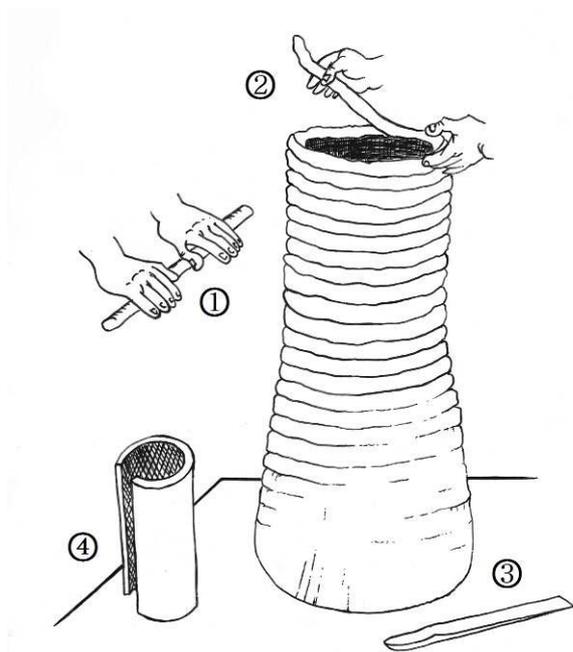


Abb. 37: Schematisierte Herstellungstechniken: 1: Rollen der Lehmwürste; 2: Aufbau des Torso; 3: Glätten der Oberfläche mit Schlag- und Modellierhölzern; 4: Teilformen aus Lehmplatten (z.B. Hosenbeine)



Abb. 38: Rock mit senkrechten Glättungsspuren durch Modellierhölzer

¹¹⁸ Nach Sima Qians *Shiji* („Aufzeichnungen des Historiographen“, 1. Jh. v. u. Z.) soll im Jahr 207 v. u. Z. der Rebellenführer Xiang Yu auf seinem Weg zur Hauptstadt die Grabanlage gebrandschatzt und verwüstet haben. Unter Erhitzen mit Sauerstoffzufuhr hat sich graue Reduktionsbrandkeramik (ohne Sauerstoffzufuhr) rot verfärbt.

¹¹⁹ Wahrscheinlich wurde das herausgebrochene Fragment einfach mit einem fetthaltigen Lehm befestigt, dessen Reste heute hart und trocken sind.



Abb. 39: Fingerabdruck an einer Oberfläche des Ärmels des rechten Armes



Abb. 40: Fingerabdruck an einer Bruchkante des Torso-unterteiles, dass durch Aufrauen mit Werkzeugen eine bessere Verbindung erhalten sollte und an dieser Stelle später erneut brach



Abb. 41: Fragmentinnenseite: Reste/Verfärbungen von Wurzelwerk von der Erdlagerung



Abb. 42: Oberkörper, Vorderseite: Fingerabdruck unter einem abgeplatzten Verbindungsstich



Abb. 43: Linker Arm: Aufbau durch Lehmwürste, die anschließen verstrichen und geglättet wurden



Abb. 44: Blick in den rechten Unterarm mit eingesteckter Hand



Abb. 45: Werkzeugspuren vom Verstreichen im Inneren des Torso



Abb. 46: Entstehungszeitliche Bruchstelle am linken Bein

Das Vorgehen beim Zusammenbau

Als erstes wurden die bereitgestellten Fragmente ausgelegt und grob nach Körperpartien anhand von Oberflächenmerkmalen und teilweise auch Farben vorsortiert. Ein trockener Zusammenbau aller Fragmente soll zeigen, an welchen Stellen Probleme auftauchen oder Fragmente fehlen (Abb. 59). Bei zu großen Fehlstellen muss geprüft werden, ob sich überhaupt ohne Ergänzungen arbeiten lässt. Grundsätzlich wurde für die Figur entschieden auf Ergänzungen zu verzichten.

Beim Kopf ließ sich schnell und sehr einfach feststellen, welche Fragmente nach Benutzung der nummerierten Scherben noch fehlen.

Wie beim Zusammenbau heraus gefunden wurde, richtet sich in den meisten Fällen der Aufbau der restlichen Figur nach einer bestimmten Reihenfolge, in der die Fragmente zusammengesetzt werden müssen. Kopf und Beine sind dabei eigenständig zusammenklebbar, meist auch die Arme mit den Händen vor dem Ansatz zur Schulter. Deshalb wird im Normalfall zuerst der Boden des Torso bzw. des Rockes zusammengeklebt. Im nächsten Schritt, um möglichst schnell eine Standfläche für die immer weiter wachsende Figur zu bekommen, müssen (bevor das Gewicht durch zu hohen Aufbau zu schwer wird) die Beine angeklebt werden. Dies kann entweder im Stehen oder über Kopf erfolgen. Dabei ist der Torso als schwerstes und stabilstes Element nach unten eingespannt und die Klebung der Beine wird durch die Schwerkraft unterstützt (vgl. Abb. 7, 8). Probleme können dann im Folgenden oft die nicht planparallelen Fußflächen auf der Bodenplatte sein, bzw., wenn die Füße mit der Platte verbunden sind, gibt es Spannungen zwischen Platte und Torso. Dies muss entweder durch perfekt passende, gut gereinigte Klebtechnik vermieden oder durch geschickte Zulagen und Füllungen so verbessert werden, dass die Figur weiter belastet werden kann.

Die individuellen Probleme einer Figur müssen am besten bereits vor Beginn des Klebungsprozesses erkannt werden, um ihnen entgegenzuwirken. Bei der vorliegenden Figur war das Problem, dass die Beine mit dem Torso bereits schon während der Herstellung einen Schwachpunkt bildeten: In diesem Fall wurden die Beine aus massiven Rollen gefertigt, die in die aus Platten zusammengerollten Hosenbeine gesteckt wurden. Die ca. letzten 8 cm der Hosenbeine bilden zusammen mit der Rockunterseite ein massives Plateau. Dabei wurden die Hosenbeinröhren durch Aufrauung/Eindrückung von Werkzeugen mit weiteren Lehmschichten verbunden. Nachträglich wurde noch Material zur Verbindung von unten eingedrückt (Abb. 48), wovon sogar noch der Fingerabdruck zu finden ist (Abb. 40). Die heute wieder auseinander gebrochenen drei schweren Fragmente des unteren Torso zeigen deutlich die herstellungszeitliche Weise des Zusammenbaus mit den Werkzeugenspuren, welche die erste Standfläche für den weiteren Aufbau bilden (Abb. 47). Die zweite Hosenbeinröhre ist so glatt wie bei ihrer Herstellung zu erkennen (Abb. 49).

Die Last der nachschiebenden Erde oder der Stoß durch eine Nebenfigur können gereicht haben, um die Figur nach vorne zum Kippen zu bringen. Dabei brach das vordere Torsofragment (Abb. 48) an der früheren Nahtstelle heraus. Gleichzeitig knickten die schwächsten, da dünnsten Partien der Unterschenkel nach vorne ein, was das größte Problem beim Wiederverkleben darstellt, da es sich gerade bei dem linken Schenkel um einen Splitterbruch mit fehlenden Teilen handelt (Abb. 81ff.). Zudem brachen die Beine unterhalb der Hose und die abstehenden Füße, die den Druck nach vorne nicht Stand halten konnten.



Abb. 47: Blick von oben in den bereits geklebten Torso/Rockbereich; die Hosenbeinröhren sind deutlich sichtbar



Abb. 48: Vorderes Toro/Rockfragment mit Werkzeugspuren und nachträglich eingedrücktem Terrakottamaterial (mittleres Nasenstück) zur Verbindungen zwischen den Hosenbeinröhren



Abb. 49: Zweite Hosenbeinröhre mit glatter Bruchstelle; rechts davon das für den Brand wichtige Luftloch, Fragmentnr. 1)



Abb. 50: Linke Hosenbeinröhre mit eingedrückten Werkzeugspuren (Fragmentnr. 2)



Abb. 51: Torso während des Aushärtens nach der Klebung des ersten Ringes: Stabilisierung mit Vakuumpad



Abb. 52: Gewindestange als Stabilisierung und gegen das Verschieben von Fragmenten im inneren des Torso während des Aushärtens

Für den Splitterbruch muss eine eigene Lösung in Deutschland entwickelt werden, da zu viel Material fehlt, so dass die Stelle mit Ergänzungen verstärkt bzw. gefüllt werden muss. Normalerweise wird das (was oft vorkommt) laut der Restauratoren mit Gips gemacht. Um trotzdem weiterarbeiten zu können, wurde der Torso weiter aufgebaut. Daraus folgt später, dass die Beine von unten an den Körper angeklebt werden müssen.

Deshalb wurde beim ersten Aufenthalt die Klebung am Körper fortgesetzt. Auch hier ergibt sich das Vorgehen durch die Röhrenform, bei der schichtweise Ringe von Fragmenten geklebt werden. Sind diese intakt, stabilisieren sie sich gegenseitig nach innen, so dass von außen ringförmiger Druck durch Gurte und Seile angelegt werden kann. In vorliegendem Fall mussten in der Mitte schlecht passende Fragmente mit abgearbeiteten Bruchkanten von innen unterstützt werden. Dies geschah zum einen durch Füllen des Innenraums durch das stabilisierende Vakuum-pad und zusätzliche Kissen (Abb. 51) sowie mit der selbst gebauten Gewindestange (Abb. 52).

Wichtig ist dabei immer, dass die in einem Schritt geklebten Ringe oder Partien vorher noch einmal trocken zusammengesetzt werden, um die Reihenfolge festzulegen. Außerdem müssen so viele Fragmente gleichzeitig geklebt werden, dass es bei den anschließenden Stücken keine Hinterschneidungen gibt oder die Scherben nicht mehr eingepasst werden können. Aus diesem Grund muss nach dem letzten Ring die gesamte Schulterpartie mit dem Halsausschnitt in einem Stück geklebt werden. Dafür braucht es nicht wie bei den Ringen nur zwei Personen, sondern drei bis vier. Zwei davon halten bereits die ersten geklebten Fragmente, während die anderen weitere Fragmente einstreichen und dann einpassen. Dies erfolgte allerdings erst im zweiten Aufenthalt und nachdem die Figur bereits auf ihren Beinen stand.

Die Arme konnten separat geklebt werden und wurden dabei mit gepolsterten Holzträgern unterstützt, die zwischen Boden und Armunterseite eingeklemmt wurden (Abb. 53).

Zum Schluss können Hände und Kopf eingesteckt werden. Bei der Figur bildete ein ringförmiges Plateau im Hals die genaue Auflage für den Kopf. Er wurde zusätzlich nur durch einen kleinen Streifen Ethafoam fixiert. Dadurch bleibt der separate Transport des Kopfes möglich. Auch bei der rechten angewinkelten Hand hielt die ursprüngliche Einsteckung mit Bruchstücken und Schlicker bereits durch nochmaliges Fixieren (Abb. 44), während die Linke von vornherein unbeweglich in ihrer Röhre festsaß.



Abb. 53: Klebung von Schulterbereich mit rechtem Arm auf unterstützendem T-Träger



Abb. 54: Umsetzen eines vergleichsweise weniger schweren Teils des Torso zu viert; Das Gewicht sitzt auf dem Band unter der massiven Rockunterseite

Das Vorgehen bei der Klebung

Die Klebung mit mehr als einem Klebstoff an einer Figur mit schweren, unhandlichen Fragmenten bedeutet eine sehr genaue vorrausschauend geplante Arbeitsweise. Für den Krieger wurden in den meisten Fällen zwei Personen benötigt. An vielen Stellen wie der Klebung des Torso (bei dem es noch keine Auflage gab), dem Schulterbereich mit seinen vielen Teilen und dem Sonderfall Beine und Bodenplatte, benötigte man mindestens vier bis sechs Personen, die entweder gleichzeitig Bruchkanten mit Klebstoff einstreichen, Fragmente in Position halten, Zulagen anpassen, Spanngurte oder Zwingen anlegen oder die Figur anheben bzw. versetzen (z.B. Abb. 56).

Zuerst sollte aufgrund des trocknen Zusammenbaus (Abb. 59), der Kenntnisse der Gewichte sowie der Zug-, Druck- und Scherkräfte und der Schwachstellen durch fehlende oder schlecht sitzende Fragmente entschieden werden, an welchen Stellen welche Klebstoffe zum Einsatz kommen sollen. Im Vorfeld sollten verschiedene Klebungssysteme ausgewählt worden sein, die je nach Einschätzung an der passenden Stelle angewandt werden. Im vorliegenden Fall waren dies zu Beginn der Arbeiten:

- das chinesische Epoxidharz Phoenix Epoxy Resin 6101 mit Härter 650 (3:2) mit
- einem reversiblen Primer aus Paraloid B44 (15%ig in Aceton)

Später:

- das Epoxidharz Araldite 103-1 mit Härter HY991 (GT: 100:40) mit
- dem reversiblen Primer aus Paraloid B44 (15%ig in Aceton)

für alle sehr großen schweren Fragmente, die extremen Scher- und Zugscherbeanspruchungen ausgesetzt waren wie z.B. den ersten drei schweren Torsofragmenten, Teilen der Schulterpartie, schlecht passende Fragmente im Körperbereich, Teile der stark belasteten Beine, die Vorderfüße, die angewinkelten und ausgestreckten Arme und Komplettbrüche der Bodenplatte.

Alle anderen Klebungen sollten mit:

- Mowital B30H (30%ig in Ethanol) und dem passenden
- Primer aus Mowital B30H (10 bis 14%ig in Ethanol) erfolgen.

Dazu gehörten alle druck- und horizontal belasteten oder gut sitzenden, mittelschwer bis leichteren Fragmente, wie der komplette Kopf, der Hals, Teile des Körpers und der Arme, die Hände, Teile der Beine und Füße, sowie alle nicht tragenden Kleinstfragmente wie die Verbindungsstiche, Schleifen, Finger, Bruchstücke.

Zusätzlich wurde das reversible Mowital so eingesetzt, dass komplette Bereiche der Figur nachträglich wieder gelöst werden können, da zusammenhängende Flächen eingepant wurden. Dies gilt besonders für den Körper und die Arme, was die weitere Bearbeitung um z.B. nachträglich gefundene Scherben einzufügen wesentlich vereinfacht, selbst wenn dann auch noch Klebungen mit Epoxidharz/Paraloid zu öffnen sind.

Die genauen Klebungen müssen dazu gut dokumentiert in eine Kartierung eingetragen werden (siehe: Die Dokumentation der Klebstoffsysteme und Fragmente), um später nachvollziehen zu können, wo mit welchen Lösungsmittelkompressen gearbeitet werden muss. In den Kartierungen sind die Klebungen für Mowital B30H rot, für das Araldite blau eingezeichnet, das chinesische Epoxidharz wurde nur für die ersten drei Torsofragmente und Teile des ersten Ringes eingesetzt.

Bei der Klebung eines Abschnittes von Fragmenten, z.B. eines Ringes, werden zuerst die Fragmente von eventuellem Staub gereinigt. Nachdem die Klebung aller Bruchflächen festgelegt ist, werden die mit Epoxidharz zu klebenden Flächen markiert (oder andersherum je nach Menge). Dies kann z.B. mit weißer Kreide an der Außenseite (chinesischen Vorgehen) oder auch mit Dreieckspfeilen aus wiederablösbarem Klebeband geschehen, welches direkt auf den Bruchflächen angebracht werden kann. Die Pfeile lassen sich schlechter beim Bearbeiten verwischen als die Kreide, aber es dauert länger, wenn es später auch auf den Außenseiten angebracht wird, um die Klebungen zu markieren. Denn zuerst werden die beiden Primer mit Borstenpinseln¹²⁰ aufgestrichen. Dabei sollen 5mm Abstand zur Außenseite, evtl. auch zur Innenseite der Figur gelassen werden (zu allem siehe Abb. 55, 56). Dies gilt auch für den Auftrag der Klebstoffschicht, damit sie nicht an der Außenseite austritt und aufwendiges Nachreinigen nötig wird. Epoxidharz lässt sich kaum und schon gar nicht auf einer Fassungsschicht ohne Verluste entfernen. Es ist auch sinnvoll nicht einzustreichende Flächen in diesem Fall mit Kreide zu markieren: häufig gibt es Ausbrüche an den Außenkanten, an denen glänzende Epoxidharzaufträge zu finden sind, dies kann dadurch vermieden werden.

¹²⁰ Borstenpinsel eignen sich, um besser in Vertiefungen zu gelangen und für einen kontrollierteren Klebstoffauftrag.

Bei dem Klima in den Werkstätten in Lintong dauerte es nur wenige Minuten bis die Primer trocken genug für den Klebstoffauftrag waren. Das Primern sollte aber nicht länger als einen Tag vor dem eigentlichen Klebstoffauftrag erfolgen, da durch Staub und Lagerung sowie Abreibung ansonsten keine Schicht mehr auf den Bruchflächen zu finden ist.

Die Markierungen und die glänzenden Primerschichten helfen beim Einstreichen mit den Klebstoffen. Mowital wird dabei etwas dicker und satter verwendet, das Araldite eher sparsam und kann auch erst mit einer Spachtel aufgetragen werden.¹²¹ Wie bereits beschrieben sorgt ein dünnerer Auftrag für eine bessere Verbindung. Beim Einstreichen mit dem Klebstoff sollte erst das Epoxidharz aufgetragen werden, da seine Verarbeitungszeit wesentlich länger ist¹²² als die von Mowital. Der Polyvinylbutyralaufstrich sollte sofort an die passende Stelle gedrückt und möglichst nicht mehr bewegt werden. Auch dies erfordert gewisse Absprachen. Der Vorteil des Mowital liegt darin, dass es nach kurzer Anpresszeit durch die Hand je nach Lage des Fragmentes losgelassen werden kann, um die passenden Zulagen oder Einspannvorrichtungen anzubringen. Bei gut geplante Vorgehen ergänzen sich die beiden Klebstoffe.

Die Hilfsmittel zum Einspannen der Fragmente während des Aushärtens sollten im Vorfeld getestet worden sein. Für die Ringklebungen eignen sich Zuggurte mit Zulagen aus Schaumstoff, ETHAFOAM oder die mit Stöcken verdrillten Bänder, um gezielt Druck auszuüben. Eine Alternative waren oft die KLEMSIA Holzzwingen, die mit punktuellen Druck wirken und damit nicht an Oberflächen reiben oder aufliegen, an denen z.B. noch Farbfassung zu finden ist. Oft sind Zulagen aus Holz nötig um schlecht sitzende Fragmente besser an Ort und Stelle zu halten (z.B. Abb. 57). Danach werden die beiden Klebeverbindungen mindestens 24 Stunden ausgehärtet. Dies ist auch bei dem schnell anziehenden Mowital wichtig, da das Ethanol in breiten Klebefugen nicht so schnell entweichen kann wie bei kleinen Klebungen. Auch der Druck ist bei beiden Klebstoffen wichtig, um keine Verschiebungen durch zu dicke Klebeschichten zu erhalten. Deshalb hat es sich als sinnvoll erwiesen auch die nachfolgenden Fragmente aufzusetzen und mit einzuspannen, um die spätere Passgenauigkeit, aber auch das grundsätzliche Einpassen der nächsten Scherben zu den bereits geklebten unter Kontrolle zu haben.



Abb. 55: Auftrag des chin. Epoxidharzes auf die geprimten Torsosfragmente mit Spachteln



Abb. 56: Bereits markierte (Kreide, Klebstreifen) und geprimte Fragmente der Schulter während des Klebens mit mehreren Personen

¹²¹ Die chinesischen Restauratoren bevorzugen Spachteln: Das Epoxidharz ist so dünnflüssig, dass es sich auch damit ausreichend verteilt.

¹²² 90 min laut Herstellerangaben, in Lintong wegen des Klimas nur 45min.



Abb. 57: Geklebter, mit Zwingen eingespannter Fußes



Abb. 58: Blick in den Halsausschnitt mit Plattform für den Kopf



Abb. 59: Trockenes Zusammensetzen des gesamten Torso mit Gurten, verdrillten Bändern, Klettbändern und Zulagen als Kontrolle



Abb. 60: Klebung der linken Hand in einer Art medizinischer Schlinge am noch gesicherten aber fertigen Krieger

Zum Schluss sollte eine Kontrolle auf ausgetretenen Klebstoff erfolgen. Die Markierungen an den Außenseiten können noch genutzt werden, um die verschiedenen Klebstoffe in der Zeichnung zu kartieren, dann sollten sie entfernt werden.

Die Dokumentation der Klebstoffsysteme und Fragmente

- Mowital B30H mit Primer: Mowital B30H: rot ■
- Epoxidharz Phoenix Epoxy Resin 610/Härter 650 mit Primer: Paraloid B44 (nur Torsoboden) oder Epoxidharz Araldite 103-1/HY991 mit Primer: Paraloid B44: blau ■
- Schwarze Flächen: Fehlstellen

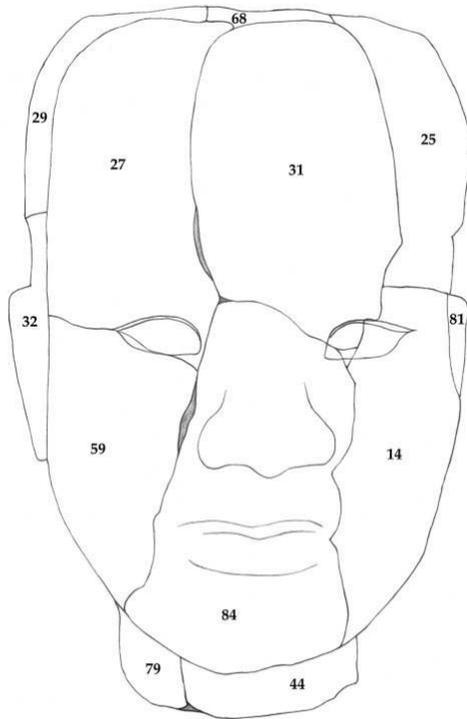


Abb.61: Kopf, Vorderseite mit Fragmentnummern

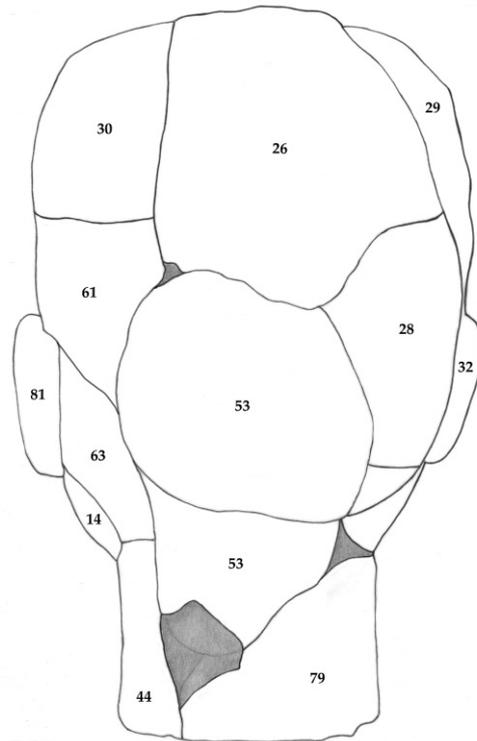


Abb.62: Kopf, Rückseite mit Fragmentnummern

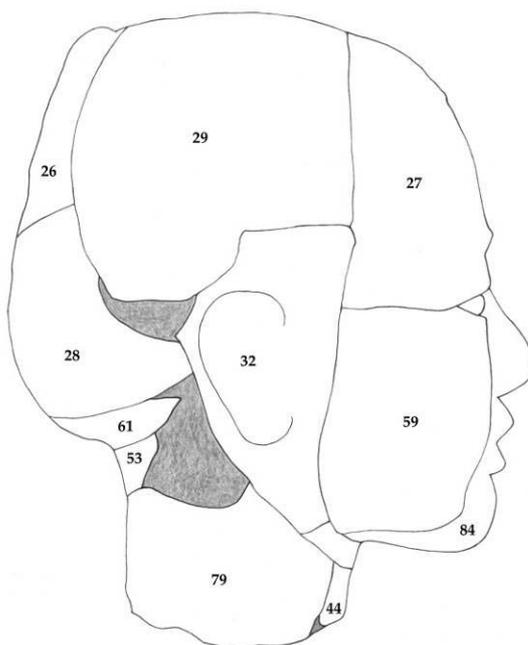


Abb. 63: Kopf, rechte Seite mit Fragmentnummern

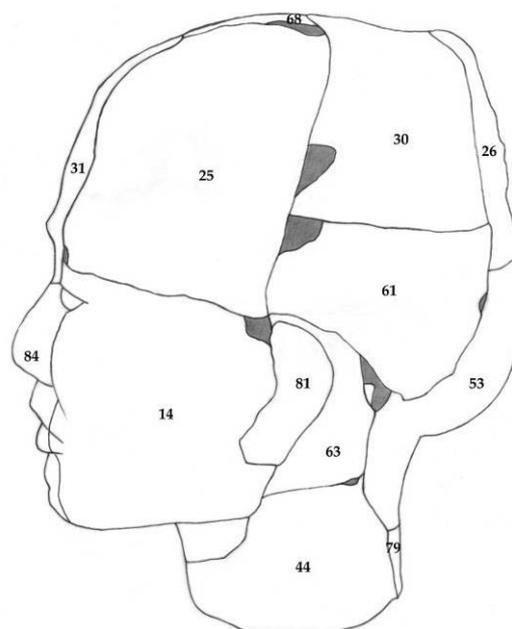


Abb.64: Kopf, linke Seite mit Fragmentnummern

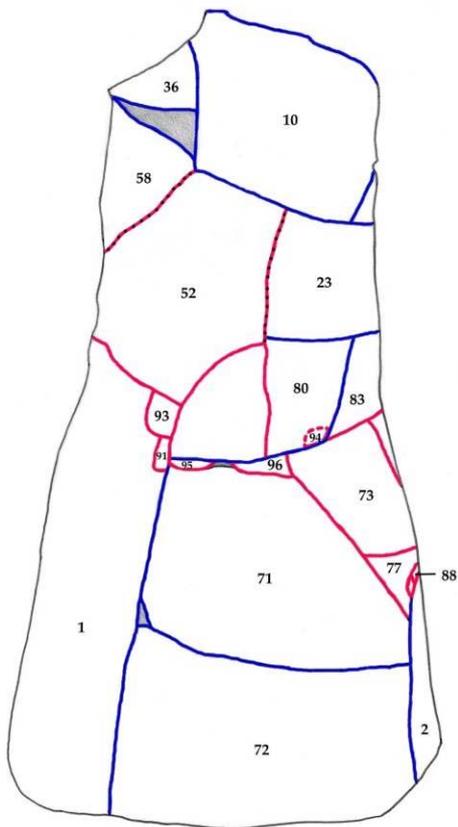


Abb. 65: Torso, Klebung Vorderseite mit Fragmentnummern

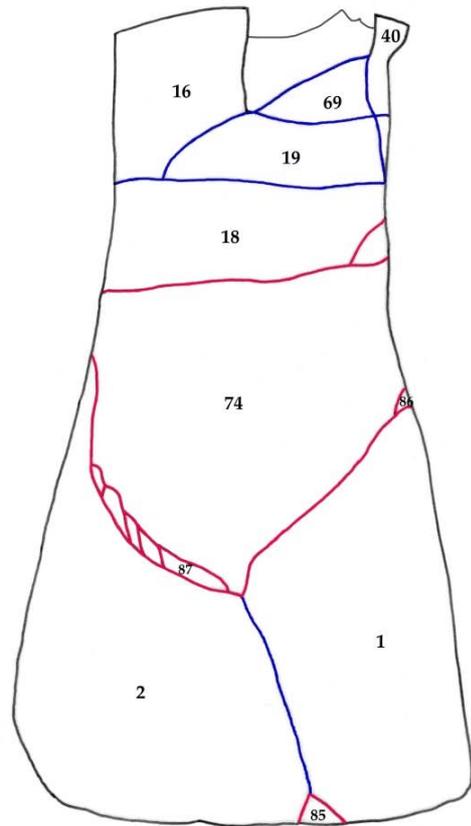


Abb. 66: Torso, Klebung Rückseite mit Fragmentnummern

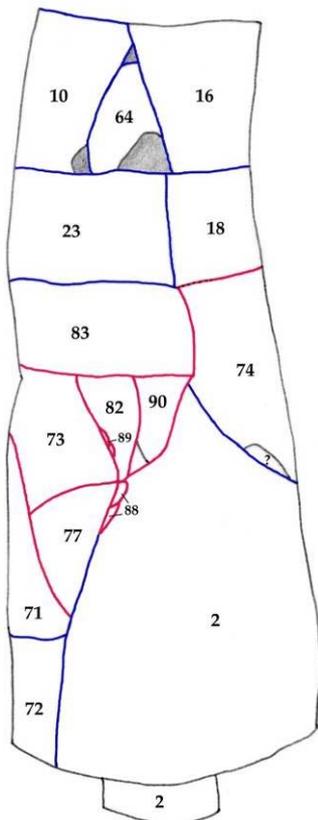


Abb. 67: Torso, linke Seite mit Fragmentnummern

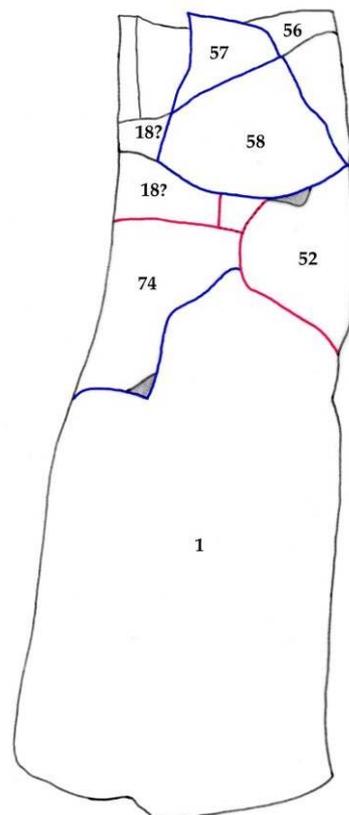


Abb. 68: Torso, rechte Seite mit Fragmentnummern

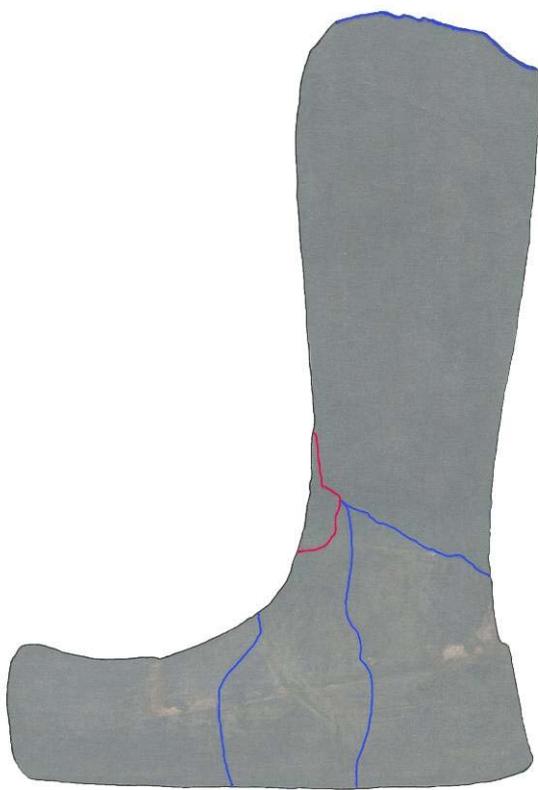


Abb. 69 : Linker Fuß, Klebung linke Seite

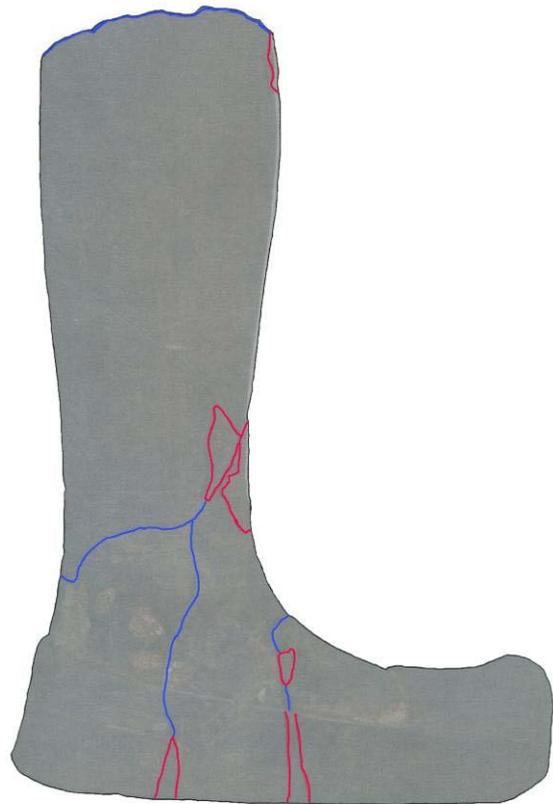


Abb. 70: Linker Fuß, Klebung rechte Seite

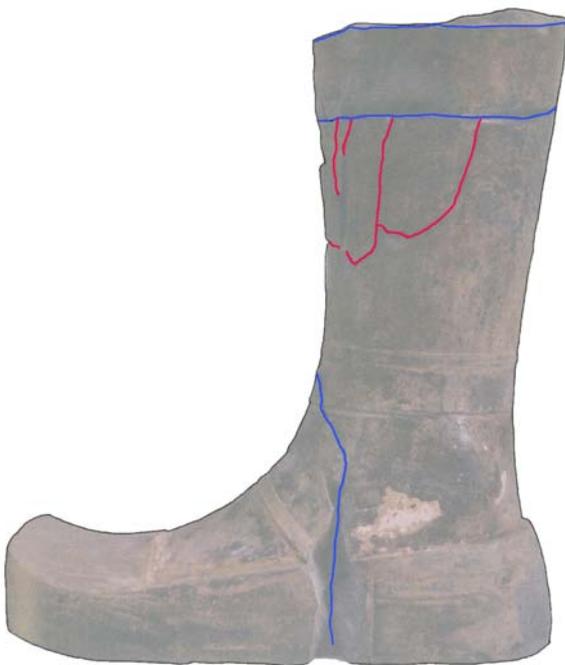


Abb. 71: Rechter Fuß, Klebung linke Seite



Abb. 72: Rechter Fuß, Klebung rechte Seite

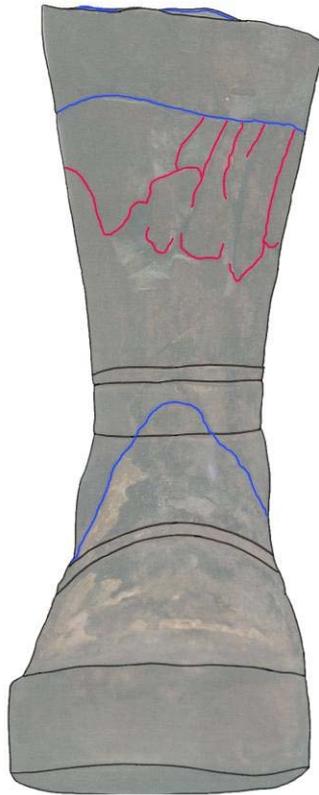


Abb. 73: Rechter Fuß, Vorderseite: Klebung

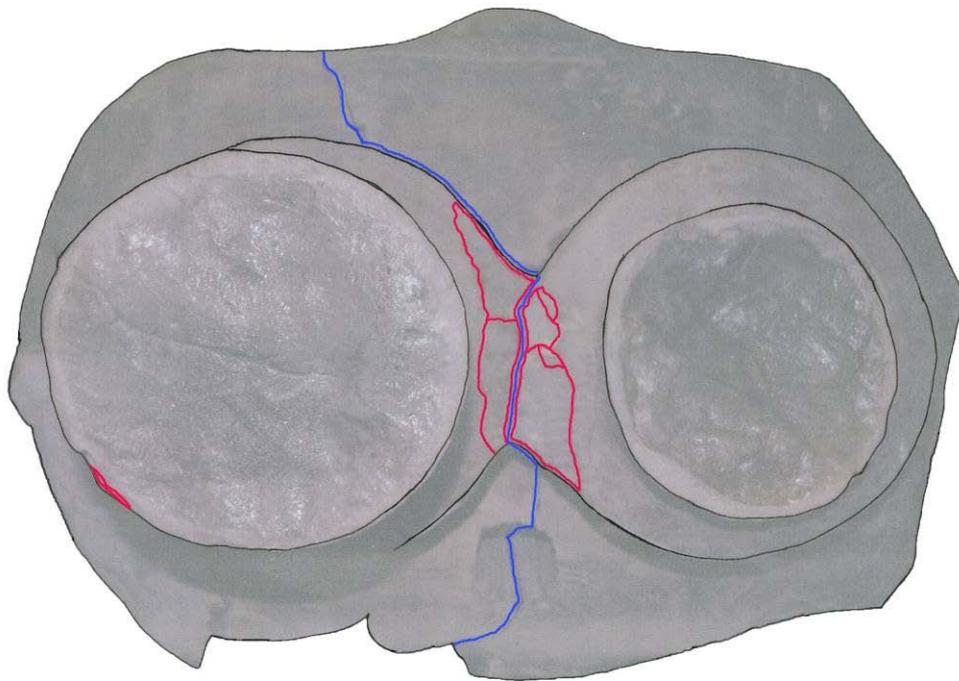


Abb. 74: Klebung Torso: Unterseite

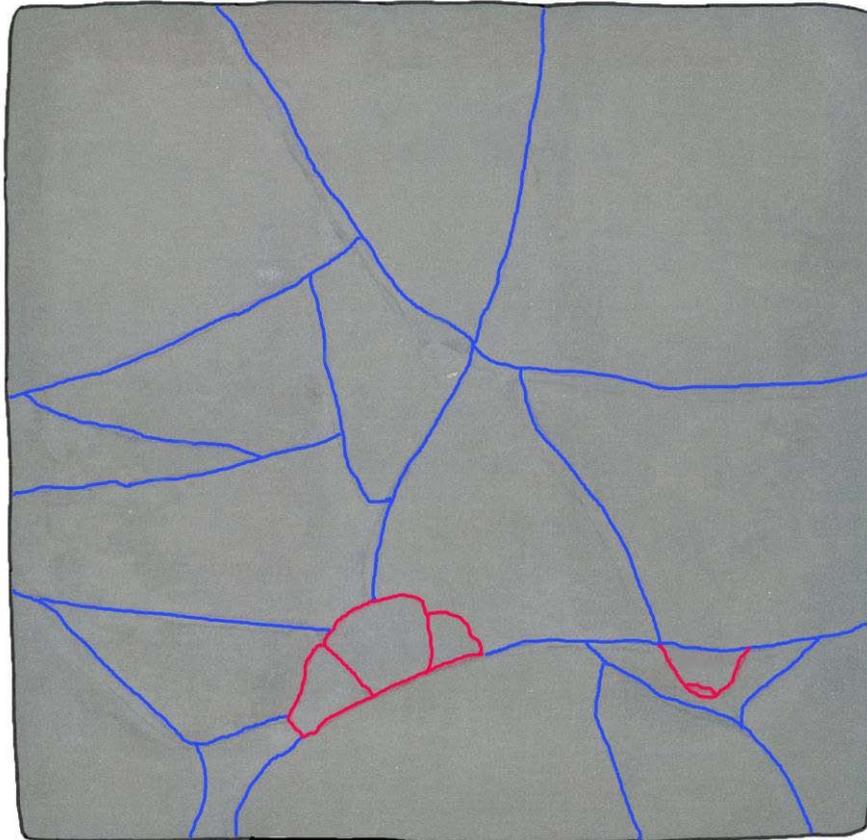


Abb. 75: Klebung Bodenplatte: Oberseite

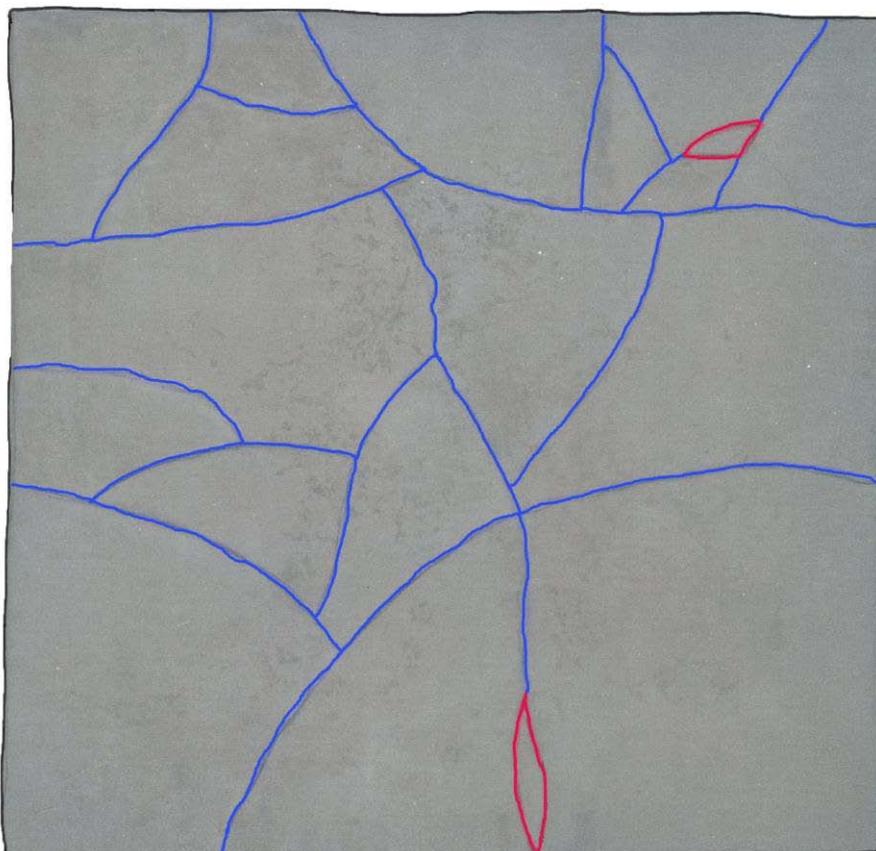


Abb. 76: Klebung Bodenplatte: Unterseite

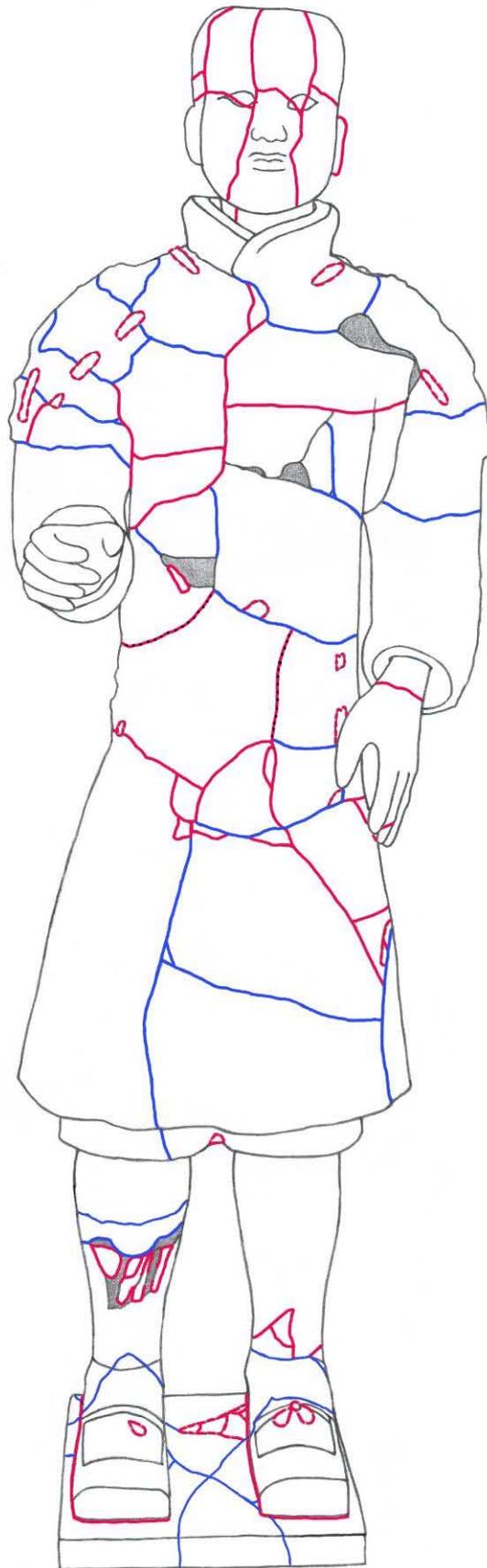


Abb. 77: Gesamtansicht, Klebung Vorderseite

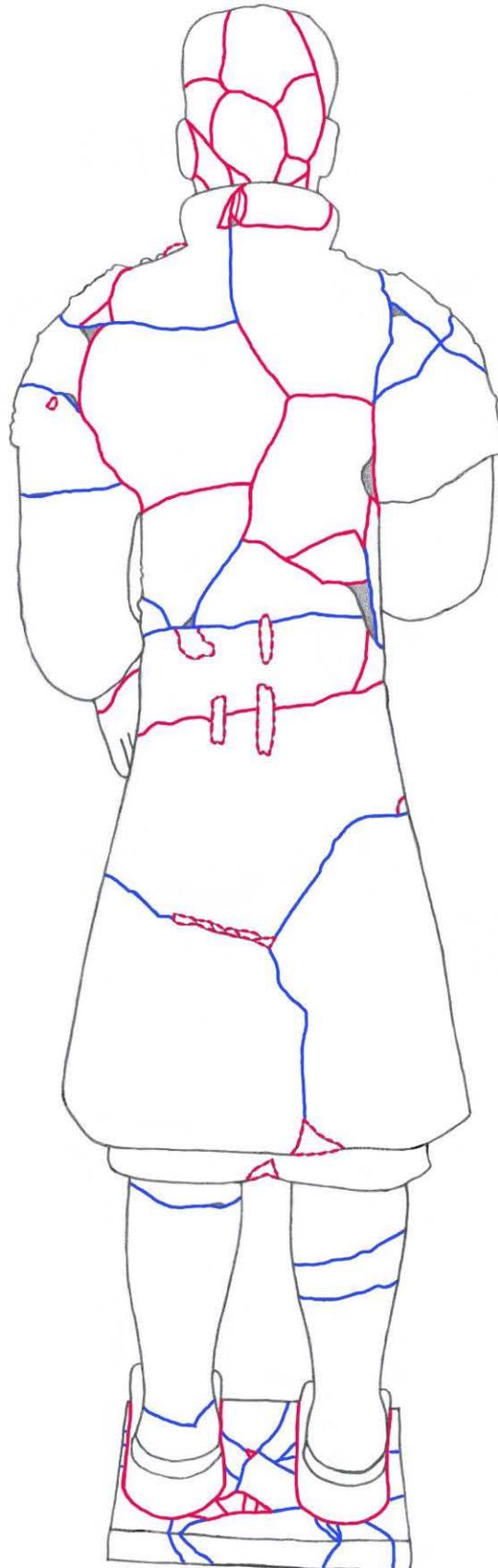


Abb. 78: Gesamtansicht, Klebung Rückseite

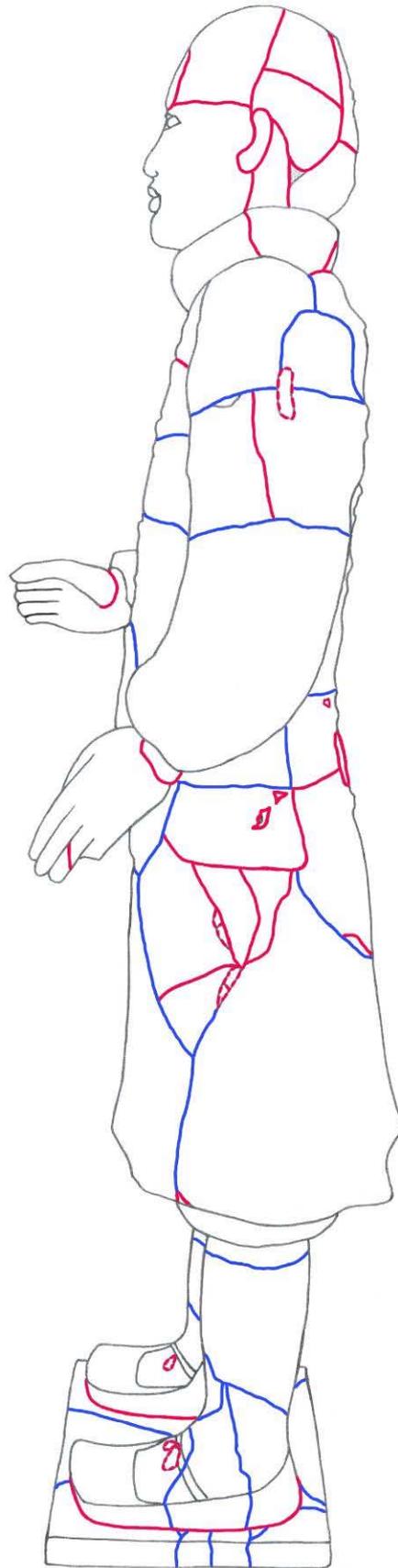


Abb. 79: Gesamtansicht, Klebung linke Seite

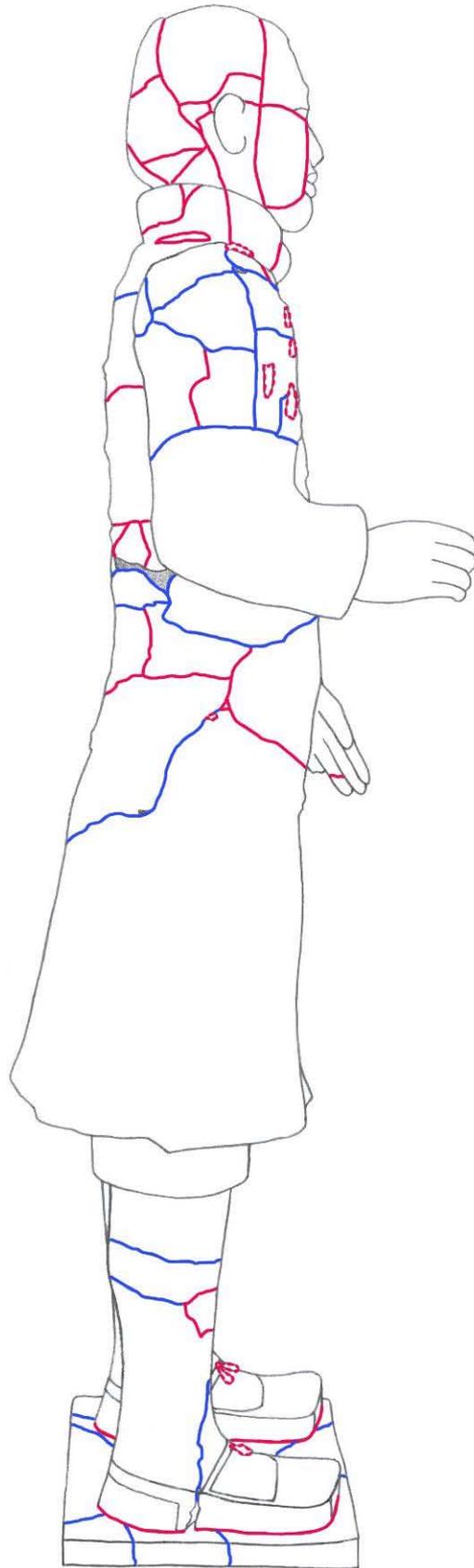


Fig. 80: Gesamtaufnahme, Klebung rechte Seite

Problemfall Beine, Bodenplatte und Hand

Beim zweiten Aufenthalt wurden die Beine bearbeitet: Um einen stabilen Stand zu erhalten, wurden zuerst die Füße mit nachträglich gefundenen Bruchstücken an die Beinstümpfe angeklebt, dies erfolgte aufgrund der großen Scherspannungen mit dem Epoxidharz/Paraloid B44 System. Aufgrund des Splitterbruches am rechten Bein (Abb. 81) mussten zwei Ergänzungen als konstruktiv tragende Teilstücke hergestellt werden, die die gesamte Last der Figur aushalten können. Denn die innenliegenden Fehlstellen von ca. 3 cm x 3 cm x 2 cm Größe können nicht mehr gefunden werden, es sind nur zierende, dünne Oberflächenfragmente erhalten (Abb. 83). Die Ergänzungen sollten direkt, durch Abtrennung mit Folie vom Objekt abgenommen werden, indem die ursprünglichen Fragmente provisorisch während des Aushärtens am Bein befestigt waren.

Dazu wurden Prüfkörper aus verschiedenen Mischungen und Produkten hergestellt, die meist würfelförmig in Hostaphan- und Alufolie aushärteten (siehe: Überblick Klebemittelliste):

- Mowital B30H mit verschiedenen Konzentrationen an Quarzsandzugabe
- Epoxidharz 2011 (AW 106 / HV 953U) mit Terrakottamehlzugabe
- Epoxidharz 2011 (AW 106 / HV 953U) mit Quarzsandzugabe (ca. VT 1: 1)
- Epoxidharz 2011 (AW 106 / HV 953U) mit Aerosil
- Moltofil (Spachtelmasse auf Naturgipsbasis, Bezug: Kustermann)
- Alabastergips (Bezug: Kremer)
- Chinesischer Gips (ungekennzeichnet)

Obwohl eine Ergänzung im besten Fall mit den bereits in das Kunstwerk eingebrachten Materialien und Klebstoffen erfolgen sollte, konnte in diesem speziellen Fall weder das Mowital noch das Epoxidharz Araldite AY 103 /HY991 mit Füllstoffen verwendet werden. Das Mowital B30H mit Quarzsand lässt sich gut anteigen und sogar modellieren, bildet aber nach dem Trocknen zu viel Schwund, gegossen mit geringem Quarzanteil sinkt es zu stark ein. Das Epoxidharz AY103/HY991 ist zu dünnflüssig, deshalb wurde aus dem gleichen System das ebenfalls in der Restaurierung verwendete pastösere Araldite 2011 (AW 106/HY 953U) ausprobiert, das mit der Quarzsandzugabe sehr gute Prüfkörperwürfel hervorbrachte. Leider ließen sie sich schlecht von den Folien trennen, da aber nur zwei Ergänzungen nötig waren, wurden diese einfach anschließend mit Sandpapier nachgeschliffen. Es handelt sich bei den Ergänzungen um druckfeste, perfekt in der Fehlstelle sitzende Körper, die reversibel mit den restlichen Fragmenten eingeklebt werden sollen. Dabei sitzen die meisten der Terrakottafragmente ohne stabilisierende Wirkung vor den Ergänzungen. Eine Epoxidharzergänzung wurde mit Paraloid B44 15%ig geprimed und wie im Klebungssystem vorgesehen, passend dazu mit Araldite AY 103-1/HV991 eingeklebt. Die andere Ergänzung, die keine Scherzug-, sondern nur Druckbelastungen aushalten muss, wurde mit Mowital B30H eingeklebt.

Eine weitere Lösung benötigte eine dünne Spalte des Splitterbruches, für die aufgrund der geringen Tiefe keine Ergänzung angefertigt werden konnte. Sie wurde nach Versuchen mit verschiedenen Gipsen mit Moltofil gefüllt. Zuvor fand eine Absperrung aller Grenzflächen mit dickflüssigem Mowital B30 statt, das in Versuchen keinerlei Verbindung mit dem Gips eingeht. Der Gips ist somit ebenfalls wie die Epoxidharzergänzungen reversibel eingeklebt und alle können bei einer späteren Maßnahme einfach von den umgebenden Fragmenten entfernt werden.



Abb. 81: Bruchstelle des rechten Beines



Abb. 82: Herstellung einer Epoxidharzergänzung durch Abtrennung mit Alufolie



Abb. 83: Nichttragende und schlecht sitzende Außenfragmente mit Epoxidharzergänzung



Abb. 84: Fertig eingeklebte Ergänzungen und Bruchstücke



Abb. 85: Vorderansicht: fertig restaurierter rechter Fuß



Abb. 86: Mit zusätzlich eingefügten Fragmenten stabilisierter und fertig geklebter linker Fuß

Um die fertiggestellten Beine von unten an den Körper kleben zu können, musste der Torso durch eine Erhöhung von zwei Holzbalken in das Metallgestell eingespannt werden. Die Beine sollten nacheinander angeklebt werden. Dazu wurde ein passender Wagenheber¹²³ ausgewählt, an dessen Oberseite ein Kantholz durchgeschoben und mit einer geraden Arbeitsfläche verschraubt wurde. Unter den geklebten Fuß geschoben, der von einer Person gehalten wurde, war er durch ein langes Brett zusätzlich zur Höhenverstellbarkeit im Winkel einstellbar (Abb. 87). Die Feinjustierung durch Zulage und Wagenheber nahm viel Zeit in Anspruch, da das Bein an der Klebestelle nicht stark hin und her bewegt werden konnte, ohne dabei Bruchkanten zu zerstören.

Nach zwei Tagen Aushärtungszeit erfolgte die Klebung des zweiten Beines auf die gleiche Art, während das andere Bein mit Zulagen weiter unterstützt wurde. Nach drei Tagen sollte die grundsätzliche Standfähigkeit überprüft werden, indem die Figur mit einer ca. 1 cm dicken Ethafoamzulage dazwischen auf den Boden abgestellt wurde. Die Zulage zeigte später das Höhen- und Tiefenprofil der Fußabdrücke und diente damit als Vorlage für den passgenauen Zuschnitt der Balsaholzzulagen (Abb. 88).



Abb. 87: Klebung des linkes Beines mithilfe eines modifizierten Wagenhebers

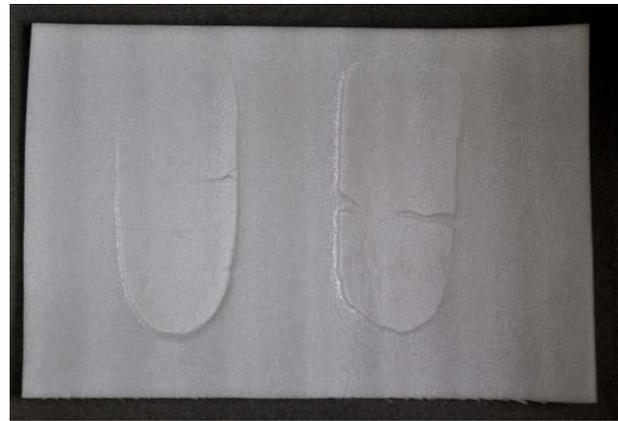


Abb. 88: Tiefenprofil der Schuhabdrücke für die Balsaholzzulagen

Die beiden fertig geklebten Beine waren ursprünglich nicht auf der Bodenplatte befestigt oder mit ihr verbunden.

Im Vorfeld konnte nicht geklärt werden, wie parallel die beiden Schuhe zum Boden oder zu der Bodenplatte ausgerichtet sein würden, wenn sie am Körper befestigt wären. Allerdings konnte man bereits an der fertig geklebten Bodenplatte und den Unterseiten der Schuhe erkennen, dass diese keineswegs perfekt plan gearbeitet, sondern aufeinander abgestimmt waren. Anhand der farblichen Abdrücke kann man aber relativ genau die Lage der Schuhe auf der Platte einplanen. Von chinesischer Seite ist gewünscht, die Bodenplatte am besten mit Epoxidharz an die Schuhe zu kleben. Dies kann dazu führen, dass bei Transporten, der die Figur noch ausgesetzt sein wird, erneut die schwächste Stelle, nämlich die Beine, stark belastet werden. Im schlimmsten Fall brechen die Beine erneut mit der Bodenplatte ab. Besser wäre ein Abbrechen der Bodenplatte von den Füßen, bevor die Beine brechen. Diese ist nicht nur stabiler und einfacher zu kleben, sondern dies entspricht auch der ursprünglichen Idee bei der nichtstarrten Verbindung Platte zu Füße. In diesem Fall bietet sich auch die Klebung mit Mowital B30H zusammen mit einem Puffer an, der die Unebenheiten ausgleichen kann. Dafür wurde Balsaholz gewählt, das sich nach dem Abstellen der Figur an den nötigen Stellen noch stark komprimieren kann. Um trotzdem eine gute Klebung zu leisten, sollten die Plattenlagen perforiert werden, um genügend Klebstoff einsetzen zu können (Abb. 89). Die genaue Anpassung erfolgte erst nach Klebung der Beine an den Körper und anhand des Profils der

¹²³ Die Idee stammt von Wang Dongfang. Zuerst sollte die Figur mit einem Wagenheber von unten angepresst werden, für diesen war aber zu wenig Platz und die Kraft zu wenig dosierbar.

untergelegten Ethafoamplatte. Die Mitte der Schuhe benötigte am meisten Unterstützung. Dort wurden die Platten in doppelter Stärke gewählt (0,3 bis 0,6 mm). Die Hölzer wurden mehrfach mit der Mowitalösung vorgetränkt und an die passende Stelle auf der Bodenplatte geklebt (Abb. 90). Zum Schluss wurde der Krieger durch vier Personen angehoben, die Bodenplatte untergelegt und die Figur langsam an der richtigen Stelle abgesenkt.

Für den zukünftigen Transport sollte die Bodenplatte selbstverständlich immer mit angehoben werden, auch um die Beine zu entlasten, bzw. eine Transportplatte unter die Bodenplatte gelegt werden, an welche die entsprechenden Befestigungen angebracht sind (siehe: Hilfsmittel beim Zusammenfügen der Fragmente).

Die Anklebung der linken Hand bereitete Probleme, da die Festigung der Farbfassung in zu kurzem Abstand zur Klebung erfolgte. Die Festigung erfolgte von chinesischer Seite mit bereits angesetzten Mischungen von Polyethylenglycol 30% und mit Methylcellulose 76, 10% in einem Ethanol/Wassergemisch¹²⁴ durch zwei tagelanges mehrmaliges sattes Einstreichen. Für die Klebung mit Mowital B30H waren die Bruchstellen zum Zeitpunkt der Klebung zwar äußerlich nicht mehr feucht, doch war die gesamte Hand noch nicht lange genug getrocknet. Im Falle von Festigungsmaßnahmen mit wässrigen Bindemitteln sollten demzufolge ausreichende Trockenphasen folgen, bevor geklebt wird.



Abb. 89: Herstellung der teils mehrschichtigen Balsaholzunterlagen



Abb. 90: Fertige Bodenplatte mit doppelten Balsaholzunterlagen

Der Umgang mit fehlenden Fragmenten

Grundsätzlich sollten zu Beginn der Restaurierung einer Figur alle Fragmente bis hin zu möglichen kleinsten Bruchstücken vorhanden sein. Denn oftmals sind es gerade kleine Bruchstücke im Inneren der Körper, die für einen maßgeblichen Halt sorgen oder Oberflächengestaltungen die durch ihr Fehlen den ersten Eindruck stark beeinträchtigen. Und gerade diese gehen leicht verloren. Kleinteile wie die Verbindungsstiche oder Schleifen lassen sich meistens perfekt zuordnen, weil sie eindeutige Bruchflächen zueinander aufweisen (Abb. 92).

Da nicht alle kleinsten Fragmente schon in der Grube den teilweise über einander liegenden Figuren zugeordnet werden können, müssen diese in Tüten, besser aber in stabile Kisten verpackt zu den Grubenabschnitten dazugegeben werden. Später sollte nachvollziehbar sein, zwischen welchen Figuren diese Fragmente gefunden wurden.

Da bei der vorliegenden Figur ca. 17 größere und auffällige Fragmente fehlten¹²⁵, wurden davon Fotos erstellt und mit in die Grube 1 genommen, um nach diesen Teilen zu suchen, da

¹²⁴ Dies ist die momentan gängige Festigungsmethode für Farbfassung.

¹²⁵ Insgesamt fehlen noch mehr kleinere Teile, dennoch ist die Figur im Vergleich zu mehr als 95% vollständig.

die nachgereichten Fragment-Tüten der Archäologen nicht ausreichten. Vom Sektor G10 waren mehrere Kisten übrig gebliebener Fragmente von 0,5 mm bis 30 cm zu sichten (Abb. 91). Bei der Suche muss systematisch vorgegangen werden, größere Fragmente können schnell und einfach beurteilt werden (z.B. fünf Hände, spezielle Teilstücke mit Fassung usw.). Die restlichen Fragmente müssen systematisch nach Oberflächen, Größe oder erkennbarer Partie (z.B. Fußteile, Haarteile, Nähte, Finger, Außenseiten usw.) auf Ethafoamplatten sichtbar ausgelegt werden. Ca. 50 Schleifen konnten teilweise anhand der Bilder ausgeschlossen werden. Nur ein kleiner Teil wurde zum Testen mit in die Werkstatt mitgenommen. Es konnten insgesamt elf wichtige Fragmente gefunden werden (Abb. 28), die tatsächlich zur Figur gehören, was beweist wie wichtig diese Maßnahme auch bei allen anderen Figuren wäre.¹²⁶ Zudem ist eine einmalige Sortierung für die gesamte Grube ausreichend, wenn die Teile danach in ihren Gruppen erhalten bleiben.

Sind Fragmente schließlich nicht mehr aufzufinden, muss beurteilt werden, ob die Figur ohne diese zusammengeklebt werden könnte oder ob auch aus ästhetischen Gründen Ergänzungen eingesetzt werden sollen. Dies war bei der zu bearbeiteten Figur, die zu über 95% erhalten war nicht nötig. Je nachdem, ob eine Figur eine ästhetische oder konstruktiv nötige Ergänzung braucht, müssen die Materialien ausgewählt werden. Nachmodellierungen und Oberflächenergänzungen sollten auf jeden Fall durch eine Trennschicht wieder entfernbare gehalten sein (z.B. Gipsergänzen¹²⁷). Dies kann im selben Klebstoffsystem erfolgen, z.B. durch Mowital oder Paraloid. Konstruktive Ergänzungen sollten soweit möglich auch entfernbare bleiben (siehe dazu auch die Ergänzungen bei der vorliegenden Figur). Dazu kommen druck- und scherfestere Materialien und Klebstoffe zum Einsatz, evtl. durch Trennschichten von Primern. Die Ergänzungen sollen auf die Bruchflächen begrenzt bleiben. Ist eine Stabilisierung über diese hinaus ins Innere der Figur nötig, sollte auch hier die Oberfläche, die genauso von historischem Interesse ist, zuvor abgesperrt werden. Zum Beispiel sind Kaschierungen mit Glasfaserfilamentgewebestreifen¹²⁸ sehr gut mit Trennschichten abzusperrern¹²⁹. Auch hier gilt die Maßnahme auf das flächenmäßig geringste Maß zu begrenzen.

Ergänzungsmassen für klein bis mittelgroße Ergänzungen wurden z.B. auch gemeinsam bei einem Aufenthalt in Deutschland getestet. Dabei kamen folgende Bindemittel und Füllstoffe zum Einsatz:

- Acrylatmörtel Trockenmischung: Z 1 Ziegel hellrot von Romstedt
- Bindemittel AC, Wässrige Reinacrylatdispersion von Remmers
- Jahn M 100 Ersatzmörtel für Ziegelstein, Jahn International Restaurierungstechnik
- Köstrosol 0830 AS, Kiselol: kolloide Dispersionen aus Siliziumdioxidpartikeln in Wasser, Chemiewerk Bad köstritz GmbH
- Moltofill, Spachtelpulver innen, Kustermann
- Omega-Sil XL, Steinkohlenflugasche (100% mineralisch), Omega Minerals Germany,
- Syton X30, Wässrige Kisel säure dispersion, Kremer Pigmente
- Terrakottamehl aus Lintong
- verschieden Pigmente von Kremer Pigmente (z.B. Eisenoxidrot)
- Alabastergips (Kremer Pigmente)
- Quarzsande verschiedener Körnung

¹²⁶ Mit mehr Zeit wären durchaus noch mehr Teile möglich gewesen, die Suche dauerte nur einen Vor- und Nachmittag mit Sortieren.

¹²⁷ Rezept in China für Ergänzungen: 300g Gips, 30 g Terrakottapulver, 30 g weiße Emulsion, 20 g Tinte, 10 g klares Wasser (lanshui), 10 g Ocker. Denkmalamt Shaanxi: *Kaogu-yu-wenwu, Shuangyuekan/Archeology and cultural relics*, 5, Shaanxi. 2005, p. 92.

¹²⁸ Z.B. Glasfilamentgewebe Köper/Leinen von Gößl & Pfaff GmbH, Münchener Str. 13, 85123.

Karlskron/Brautlach, www.goessel-pfaff.de.

¹²⁹ Siehe dazu auch: MARQUES 2007.



Abb. 91: Grube 1: Systematisches Auslegen und Suchen fehlender Scherben: Kisten mit bisher nicht verwendeter Fragmenten aus Sektor 23, Grube 10



Abb. 92: Eindeutig zuordenbare Verbindungsstichfragmente nach der Klebung (5 Stück)



Abb. 93: Versuche zu gefärbten und ungefärbten Ergänzungsmassen in Terrakottaprüfkörpern

Aufbewahrung und Lagerung

Fragmente, die bis zur Klebung gelagert werden müssen, sollten in den Kisten gepolstert und ohne Reibung gegeneinander aufbewahrt werden, um Schädigungen und Staubauflagerungen zu vermeiden. Da Fragmente öfter umgepackt werden, sollten die Unterteilungen flexibel, z.B. Bambusstäbchen festgesteckt sein (Abb. 94). Bereits fertig geklebte, größere Fragmente können an ihre Form angepasst auf Kissen gelagert werden (Abb. 95). Wichtig ist daneben auch die Beschriftung aller Kisten und ihrer Inhalte, um unnötiges Öffnen zu ersparen. Ungereinigte Kleinteile sollten in Boxen mit Seidenpapier als Zwischenschicht aufbewahrt werden.



Abb. 94: Aufbewahrung von Fragmenten: Kisten mit festgesteckter, reversibler Ethafoampolsterung um Reibung zu vermeiden



Abb. 95: Aufbewahrung von bereits geklebten Fragmenten: Kisten mit Ethafoampolsterung und Kissen für perfekt angepasste Unterstützung



Abb. 96: Vaccumpad als Hilfsmittel zur Bearbeitung oder als temporäres Transportmittel



Abb. 97: Aufbewahrung kleinster Fragmente nach Zugehörigkeit in Kisten

Ganze Terrakottakörper, die eine liegende Deponierung erfordern, müssen im Bereich der Liegefläche durch Unterfütterung mit stabilem Material passend unterstützt werden. Partien mit Fassung sollten ausgespart werden. Auch hier ist eine staubsichere Hülle aus z.B. Seidenpapier oder Stoff zu empfehlen, je nach Empfindlichkeit der Fassung.

Die Aufklebeetiketten sollten nicht weiter eingesetzt werden, da sie dunkle Rückstände auf der Terrakottaoberfläche hinterlassen. Entweder werden Etiketten eingesetzt, die sich rückstandsfrei entfernen lassen oder die Fragmente werden mit angebundenen Etiketten versehen. Bei letzter Möglichkeit muss sichergestellt sein, dass diese sich nicht leicht lösen. Durch eine vollständige Dokumentation (allseitige Fotografien) aller Fragmente einer Figur sollte allerdings sichergestellt sein, dass jedes Teil auch ohne Nummer wieder zugeordnet werden kann. Spätestens nach dem Zusammenbau sind alle Etiketten bis auf die Figurennummer zu entfernen.

Bewertung und Ausblick

Die große Anzahl an Terrakottafiguren im Museum der Terrakottakrieger und Pferde, von denen bisher nur ein kleiner Teil bearbeitet ist, bietet weiterhin ein breites Spektrum an Forschungsmöglichkeiten. Auf keinen Fall sollte nur nach einer standardisierten Methode bei der Restaurierung und Klebung vorgegangen werden, sondern in jedem Fall neu auf die individuellen Fragestellungen der Figuren eingegangen und jede Verbesserung für die nachfolgenden Figuren übernommen werden. Die unternommenen Versuche zur Verbesserung der Klebung sollten umgesetzt, weiter vorangetrieben und erweitert werden. Statt der zügigen Fertigstellung vieler Figuren nacheinander, sollten mehr exemplarische Figuren geklebt werden. Denn die meisten Verbesserungen erfordern nicht mehr Zeit, sondern nur eine systematischere Vorgehensweise, von der dokumentierten Ausgrabung und Aufbewahrung, bis hin zur Konservierung der Farbe und Klebung der Verbindungsstiche.

Mit der modellhaften Restaurierung und Klebung eines Standartkriegers konnte gezeigt werden, dass bereits kleine Verbesserungen ohne großen Aufwand zu sehr guten Ergebnissen führen: Eine verbesserte Klebtechnik mit verschiedenen, in der Restaurierung teilweise bewährten Klebstoffen und Systemen, welche die nötigen Anforderungen erfüllen, aber weiter modifizierbar bleiben und ein individuelles Vorgehen bei Zusammenbau und der Klebung, für das Verbesserungen für andere Figuren abgeleitet werden können.

Langfristig sollten die Klebstoffe noch besser auf die Situationen abgestimmt werden und speziell die dazu in China zusammenarbeitenden Institutionen und Firmen eingebunden werden, um parallel zur praktischen Arbeit Testreihen zu Klebstoffen, Primern und Ergänzungsmaterialien durchzuführen. Der Krieger TG23G10-26 ist nur eine Möglichkeit der verbesserten Umsetzung.



Abb. 98: Der fertige Krieger mit dem Arbeitsteam



Abb. 99: Gesamtansicht, Vorderseite



Abb. 100: Gesamtansicht, Rückseite



Abb. 101: Gesamtansicht linke Seite



Abb. 102: Gesamtansicht rechte Seite

Acknowledgment

Within the framework of the German-Chinese Cooperation sincere thanks are given to the German Ministry for Education and Research, Technische Universität Munich, Chair of Restoration, Art Technology and Conservation Science (Prof. Erwin Emmerling), the Museum of Terracotta Army (Prof. Zhou Tie), to the Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, to Stephan und Rudolf Hinterwaldner (Hinterwaldner Consulting & Partner), to my colleagues on the German and Chinese side: Catharina Blänsdorf, Charlotte Höpker, Andreas Dörr, Mathias Kocher, Rupert Utz (ProDenkmal), Gergana Kleinecke (Naturhistorisches Museum Wien), Barbara Jändl, Constanze Thomas (Archäologische Staatssammlung München) Angelika Stiegler, Lena Rintelen (Staatliche Antikensammlung München), Sandra Bucher, and to Li Bin, Lan Desheng, Wang Dongfeng, Xia Yin, Rong Bo, Kong Lin and the staff of the ceramic workshop of the Museum of Terracotta Army).

Literatur

AMBERS, JANET: *Holding it all together. Ancient and modern approaches to joining, repair and consolidation*, London 2009.

BECK, SABINE; LÜCK, KATRIN: *Tränkung von niedrig gebrannter und poröser Keramik*“, in: Restaurierung und Archäologie, S. 105–116.

BLÄNSDORF, CATHARINA/UTZ, RUPERT: *Untersuchungen zur Terrakotta und zum Kleben der zerbrochenen Figuren aus der Grabanlage des Qin Shihuangdi*, in: Der Vergangenheit eine Zukunft geben, 15 Jahre deutsch-chinesische Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur Erhaltung von Kulturgut, Berlin 2006

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG: jährlicher Forschungsbericht des Projektes 1998

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG: jährlicher Forschungsbericht des Projektes 1999-2000

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG: jährlicher Forschungsbericht des Projektes 2001-2002

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG: jährlicher Forschungsbericht des Projektes 2003

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG: jährlicher Forschungsbericht des Projektes 2007-2009

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG: *Der Vergangenheit eine Zukunft geben, 15 Jahre deutsch-chinesische Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur Erhaltung von Kulturgut*, Berlin 2006.

BYRNE, GREGORY: *Adhesive formulations manipulated by the addition of fumed colloidal silica*, in: Adhesives and consolidants; preprints of the contributions to the Paris congress, 2 - 8 September 1984, London, 1984, pp. 78–80.

Denkmalamt Shaanxi: *Kaogu-yu-wenwu, Shuangyuekan/Archeology and cultural relics*, 5, Shaanxi. 2005.

DERSCHAU VON, DORIT/UNGER, ACHIM: *Epoxidharz-Restaurierungen. Zum Problem der Entfernung*, in: Restaura 1998/7, S.486-493.

DOWN, JANE/MAC DONALD, MAUREEN/ TETREAU, JEAN/WILLIAMS, SCOTT: *Adhesive testing at the Canadian conservation institute – an evaluation of selected poly(vinyl acetate) and acrylic adhesives*, in: *Studies in Conservation*, 1996, Vol. 41/1, p. 19-44.

DOWN, JANE: *Poly(vinyl acetate) and acrylic adhesives: a research update*, in: Ambers, Janet et al.: *Holding it all together*, London 2009, S. 91- 98.

FLEISCHMANN, WOLFGANG: *Fügetechnologie Kleben Teil 1, Vorlesungsskript Henkel und Fraunhoferinstitut Bremen*, Juni 2010, online unter:

http://www.fast.kit.edu/download/DownloadsLeichtbautechnologie/KIT_Vorlesung_Teil_1_100625.pdf.

HABENICHT, GERD: *"Kleben, Grundlagen, Technologie, Anwendungen"*. 3., Berlin. 1997.

HEMPEL, KENNETH F. B.: *„Notes on the Conservation of sculpture, stone, marble and terracotta“*, in: *Studies in Conservation*, 1968, 13/1, p. 34-44.

HORIE, CHARLES: *„Materials for conservation, organic consolidants, adhesives and coatings“* Reprint, Oxford u.a. 2003.

JORJANI, MERSEDEH; WHEELER, GEORGE; RICCARDELLI, CAROLYN et al.: *„An evaluation of potential adhesives for marble repair“*, in: AMBERS 2009.

KOOB, STEPHEN: *The use of Paraloid B-72 as an Adhesive: its application for archaeological ceramics and other materials*, in: *Studies in conservation*, 16, . 1971, pp. 7–14.

- KOOB, STEPHEN: *The use of Acryloid B-72 in the treatment of archaeological ceramics: minimal intervention*, in: *Materials issues in art and archaeology II*. Symposium held April 17-21, 1990, San Francisco, California, U.S.A., Pittsburg, Pa, 1991, pp. 591–596.
- KOOB, STEPHEN: *Paraloid B-72: 25 years of use as a consolidant and adhesive for ceramics and glass*, in: AMBERS 2009, pp. 113–119.
- KOSER, ELKE: *Restaurierungsmörtel in der Denkmalpflege*, Stuttgart. 2006.
- MARQUES, SOFIA, "Twelve Panels by Luca della Robbia: Conservation Issues", in: *Glass and ceramics conservation 2007*. Interim meeting of the ICOM-CC working group; August 27 - 30, 2007, Slovenia, Nova Gorica, 2007.
- PODANY, JERRY; RISSER, ERIK; SANCHEZ, EDUARDO: "Never forever, assembly of sculpture guided by the demands of disassembly", in: AMBERS 2009.
- PODANY, JERRY/GARLAND, KATHLEEN M./FREEMAN, WILLIAM R./ROGERS, JOE: *Paraloid B72 as a structural adhesive and as a barrier within structural adhesive bonds: evaluations of strength and reversibility*, in: JAIC (Journal of the American Institute for conservation) online, 2001, vol. 40, no. 1.
- PODOLA, TORE: *Abdichtung von Natursteinelementen mit verspritzbaren Dichtstoffen*, in: HINTERWALDNER, RUDOLPH: *Kleben, Leimen, Befestigen und Dichten im Hoch- und Tiefbau*, München 1993, S. 55.
- POHORILJAKOVA, IDA/MOY, SARA A.: „A Re-evaluation of Adhesives Used for Mending Ceramics at Kaman-Kalehöyük: A final assessment”, unpubliziertes paper für das Japanese Institute of Anatolian Archaeology.
- RONG, BO; LAN, DESHENG/ 容波; 蓝德省: *Erste experimentelle Studie zu einem Terrakotta Reparaturklebstoff/秦俑修复粘接剂实验初步研究*, 2003, Artikel online unter: <http://lib.cnki.net/cjfd/WEBO200302012.html>.
- „*Qin shi huang di ling yuan kao gu bao gao (1999)*”. Di 1 ban., Beijing. 2000.
- SCHÄUFFELHUT, STEPHANIE: *Klebung archäologischer Keramik*, Abschlussarbeit Fachhochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin 2000, 232 Seiten.
- SCHINDEL-BIDINELLI, EDUARDO: *Strukturelles Kleben und Dichten*, Bd. 1, München 1988.
- STEINHILPER, WALDEMAR/SAUER, BERND: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1*, Berlin 2012, S. 447.
- RICCARDELLI, CAROLYN; WHEELER, GEORGE; MUIR, CHRISTINA et al.: „An examination of pinning materials for marble sculpture”, unpublished paper, 2011.
- UTZ, RUPERT: *Stabilisierung von Lösslehmoberflächen in Archäologischen Grabungen am Beispiel der Terrakottaarmee des Qin Shihuangdi*, Dissertation, LMU München, 2004.
- YOUNG, CHRISTINA: *Predicting practical properties of unfilled adhesives from thermomechanical data*, CCI Symposium Ottawa, 2011.

Anhang

Tabelle: Klebemittleinsatz und -techniken für großformatige Keramik-/Steinfiguren weltweit
Anforderungskatalog (Bucher 2010, Kurzfassung Zachmann 2011)

Tabelle: Klebemittelliste Überblick

Tabelle: Fragmentgewichte

Dokumentation der Farbfassung

Information: Use of MowitalB30H

Übersetzung: Informationsblatt chinesisches Epoxidharz

Tabelle: Brenntemperaturen von Prüfkörpern aus Sektor T23G9 (Grube 1),
durchgeführt von Rong Bo

Informationen zum Chinesischen Epoxidharz

Überblick: Festigkeitsmessungen chinesischer Klebstoffe

Grube 1: Lageplan: Fundsituation Terrakottafigur im Sektor 23

Tabelle: Klebemittleinsatz und -techniken für großformatige Keramik-/Steinfiguren weltweit

Land/Name/Institution	Klebstoff	zusätzliche Bemerkung	Techniken	Beispiel/ Literatur
Deutschland/Tell Halaf-Projekt/Vorderasiatisches Museum Berlin/Restaurator Stefan Geismeyer	<ul style="list-style-type: none"> • Klebung mit Epoxidharz (Reckli®-Bauharz EP „schnell“) • belastende Ergänzungen: Epoxi-Feinbeton Typ 3 (Reckli) • abschließender Ergänzungsmörtel: Mowilith D340, ca. 45% verdünnt mit Basaltkörnungen, Quarzsand, Kaolin 	Ausgehärteter Klebstoff ist mit Wärme lösbar; Wirtschaftlichkeit, Verarbeitungsmerkmale und Hersteller für Auswahl entscheidend	Verschiedene Spachteltechniken	<ul style="list-style-type: none"> • Monumentale Steinskulpturen (Cholodis, Nadia: „Die geretteten Götter aus dem Palast von Tell Halaf“, Staatliche Museen zu Berlin, 2011)
Deutschland/Römisch Germanisches Zentralmuseum Mainz/Restauratorin Frau Jasmin Munir	Meist: Mecosan LCR für mittelgroße Objekte	Klebkraft von Mowital B30H (50%ig in Ethanol) wird als zu niedrig angenommen; Paraloid B44 gilt als zu spröde		<ul style="list-style-type: none"> • Keramik
Deutschland/Pergamonaltar/Antikensammlung Berlin Wolfgang Maßmann	<ul style="list-style-type: none"> • Primer (Paraloid B72, 5%ig in Aceton) • Epoxidharz AKEPox von AKEMI (bei Bedarf zähflüssiger durch Aerosil) • Einkleben von Edelstahl-Dübeln bei Steinerergänzungen/Klebung von Marmor: Kalloplast R (Acrylharzkleber) 	Primer dient hauptsächlich als Sperrschicht, sollen dadurch aber auch reversibel sein	<ul style="list-style-type: none"> • Neuzusammensetzung mit Stahldübeln, meist in die alten Dübellöcher 	<ul style="list-style-type: none"> • 10 monumentale Marmorreliefs (Schraudolph, Ellen, „Die Restaurierung des Telephosfrieses“ in: Der Pergamonaltar, Die Präsentation nach Restaurierung des Telephosfrieses, Staatliches Museen zu Berlin, 1997, S. 121-143)
Deutschland/Archäologische Staatssammlung München/Restauratorin Dr. Barbara Jändel	<ul style="list-style-type: none"> • häufig Mecosan • seit kurzem Paraloid B48 (in Ethylacetat oder Aceton) • Polyesterharz Akemi Marmorkitt 1000 (schwere Steinobjekte) 	Es werden kaum Terrakottakunstwerke geklebt		
Deutschland/Staatliche Antikensammlungen München/Restauratorin Lena Rintelen	<ul style="list-style-type: none"> • häufig Mecosan • Acrylharze 	Nur mittelgroße Keramiken		
Deutschland/Hochschule für Technik und Wirtschaft (Restaurierung und Konservierung/Grabungstech	<ul style="list-style-type: none"> • Grundsätzlicher Keramikkleber der Hochschule: Paraloid B72, 40-50%ig gelöst in Ethylacetat mit Primer: 5-10%ig 	An der Hochschule kaum lebensgroße Figuren		<ul style="list-style-type: none"> • Klebungen von frisch gegrabenen Amphoren in Osteuropa (Bulgarien): Acrylharze versagen wegen Feuchte und Hitze

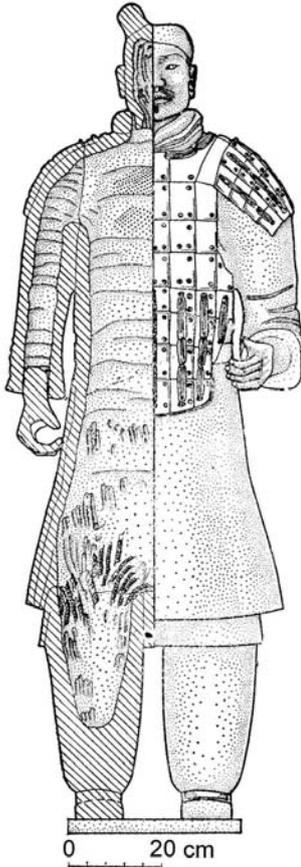
<p>nik) Berlin/Restaurator Stephan Puille</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Gelegentlich: Mowital B30H in Ethylalkohol ohne Primer; in wärmeren Gegenden Paraloid B48 • Brüchige Scherben: Zuerst Festigung mit B30H: 0,1 - 0,5%ige Lösung • bei großen/schweren/dichten Keramiken: Epoxidharze 			
<p>Deutschland/Bayerisches Nationalmuseum München/Daniel Jöst (Steinrestaurator)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • reaktiver Methacrylatklebstoff (Olaf Pung) für schwere Steinskulpturen/platten • Füllungen mit z.B. kieselgebundenen Anböschmassen (Köstrosol, Quarzsande/-mehle) 	<p>Seltener auch Terrakottaklebung</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Steinskulpturen, Grabplatten usw.
<p>Deutschland/ AfR - Atelier für Restaurierung Köln GbR Dipl. Restauratoren Brinkmann & Verbeek/Christina Verbeek</p>	<ul style="list-style-type: none"> • punktuelle Klebung mit Epoxidharz <p>Festigung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schollen: Injektion von Acryldispersion Primal AC 33 1 RT : 1 RT in dest. Wasser • Strukturelle Festigung: Kieselsäureester Funcosil Steinfestiger 300 (Fa. Remmers) • Schalenhinterfüllung mit Ledan® <p>Ergänzungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Feine Risse und Fehlstellen erfolgte mit dispergiertem Weißkalkhydrat und feinem Marmormehlzuschlag • Größerer Partien und plastische Ergänzungen wurden hingegen mit Funcosil, Restauriermörtel Spezial (Fa. Remmers) 	<p>Lebensgroße Terrakottafiguren (Außenbereich)</p>	<p>Dübelsystem mit Spannschloss und Gewindestangen parallel zur Oberfläche (nach Vorbild im Chinaprojekt); Zusätzlich bei stark fragmentierten Bereichen im Inneren: Glasfasergitter mit Mörtel</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Lebensgroße Terrakottagartenfiguren im Außenbereich; seit 8 Jahren bis auf Rissbildungen durch Quellen und Schwinden, die in den geklebten Bereichen vorkommen können, stabil; Dübelsystem für dünne Terrakottascherben als „sehr geeignet“ eingestuft
<p>Österreich/Naturhistorisches Museum Wien/Restauratorin Gergana Kleinecke</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mowital B 30H 15, 25%ig in Ethanol • als schlechtere Variante wird noch Uhu hart verwendet 		<ul style="list-style-type: none"> • Abflammtchnik (vor 30 Jahren: Technik in der Ausbildung von Keramikrestauratoren in Sofia, Bulgarien): Anzünden der 2mm dicken beidseitige aufgetragenen Klebeschicht durch einen Spiritusbrenner, nach 2-3 Sekunden kurz zusammendrücken. Durch den thermoplastischen Klebstoff können Klebungen auch später 	

			(Versuch: 8 Jahre altes MowitalB30H) durch erneutes Erwärmen wiederangelöst werden	• Keramikvasen im Naturhistorischen Museum Wien
Italien/Restauratorin Elisabeth Huber/ Laboratorio Restauro Ceramiche, Vetri e Smalti Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro	Grundsätzliche Klebung von Keramik im ISCR: • Primer (Paraloid B72 in Aceton oder Mowital B60HH in Alkohol; je nach Porösität: 5-10%ig, mehrschichtig) • Epoxidharz Uhu plus (großes Gewicht) • Paraloid B72, ca. 25%ig • Mowital B60HH ca. 25%ig	• Der Primer dient hauptsächlich der Reversibilität • Mowital B60HH wird statt Mowital B30HH genommen, da es laut des dortigen Chemikers eine größere Klebekraft aufweist	• Wieder Öffnen einer Klebung: mit Lösungsmittel und Hitze; • Verstärkungen mit Glasfaserstiften (GFK-Stäbe); • Ergänzungen mit pigmentiertem Polyfilla, Dentalgips (nur die Basis)	• Lebensgroße Statue von Athen
Italien/Restaurator Carlo Usai/Musei Capitolini	• Epoxidharz Uhu plus (Passgenaue Brüche) • Araldit BY 158 (Fugenfüllender Klebstoff); Aerosil als Füllstoff, Paraloid B72 (20%ig in Aceton) als Primer	• Der Primer dient der Reversibilität des Araldits; Uhu plus wurde nur einmal mit Paraloid B72 (25% in Aceton) für eine Klebung verwendet • Araldite BY158 wird aufgrund seiner niedrigen Viskosität, Transparenz und Modifizierbarkeit der Viskosität und Stärke gewählt (die wohl niedriger als die Terrakotta ist) • mehrer Jahre Erfahrung, Klebmittel für schwere Terrakotta-, Glas- und Steinobjekte sollten gleich stark oder stärker sein als das Material; Kleine, sensitive Materialien (Holz, Elfenbein) können mit Acryl- oder Vinylharz geklebt werden	• Anstückungen/ kurze Dübel aus Araldit BY 158, auf bereits abgerundete Bruchflächen aufgeklebt, verbessern die mechanische Verbindung zu ergänzenden Gipsfüllungen 	• Lebensgroße Terrakottastatuen (Usai, Carlo: "Relazione tecnica di restauro" in: Gli dei di Terracotta, Rom 2002, S. 122-126): seit 10 Jahren zeigt sich keine Probleme mit der Klebung, die Figuren sind dauerhaft ausgestellt
Spanien/Univerisitat de Barcelona, Secctio de conservation/ Restauratorin Restaurierungsabteilung Núria Flos	• Epoxidharze (Araldite 2020; Hxtal NYL-1) • Klebstoffe auf Cellulosenitratbasis (spanisches Produkt: Imedio; Uhu hart) • Paraloid B72	Hxtal NYL-1 wird wegen der Infiltrationstechnik (eher für kleinere Objekte) eingesetzt		
Portugal, Lissabon/Selbständiger Restaurator André Varela Remígio, Kollege von Augusta Lima	• Araldite 2011 oder 2020 mit dünnflüssigem Primer Paraloid B72 • Paraloid P72		• bei großen/schweren und vertikal gebrochenen Fragmenten: Dübel/Nägel aus rostfreiem Stahl	• Monumentale polychrom gefasste Terrakotta Figuren (60 Heiligenreliquiare, 30 Altarfiguren "Saint Bernard Transit" des Monastery of Santa Maria de Alcobaça) (REMIGIO, ANDRÉ VARELA: <i>Two monumental polychromed clay sculptures of Alcobaça</i> , in: ICOM Newsletter

<p>England/Restauratorin Sofia Marques/ Victoria and Albert Museum London</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Paraloid B44 (1:1 Aceton, 0,4 Gewichts% pyrogene Kieselsäure) • Primer: Paraloid B44 (2maliger Auftrag 1:0,125 in Aceton) • für Dübel: Paraloid B44 (1:0,5 mit pyrogener Kieselsäure bis eine Paste erreicht ist) <p>• keine Verklebung der Terrakottabestandteile: Montage mit eingeklebten Dübeln auf ein Hexlite® Bord</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Paraloid B44 wurde B72 wegen des höheren Tg von 60°Grad vorgezogen 	<ul style="list-style-type: none"> • Carbondübel ersetzen alte Stahldübel • Aluminiumstreifen (2mm dick 3cm breit, leicht, stabil, biegsam, an Oberfläche anpassungsfähig) für die zusätzliche Verstärkung auf der Rückseite: Baumwollmusselin mit Paraloid B44 (1:0,5) als Sperrschicht, darauf Araldite SV427/HV427 zum Befestigen der äußeren Enden der Aluminiumstreifen.  <p>Diese Verbindung soll fester als die untereinander verklebten Terrakottastücke sein.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fehlstellen wurden mit Plastazote® und Pollyfilla® gefüllt. Fehlende Abstände zum Hintergrund wurden mit Araldite 2015 gemischt mit pyrogener Kieselsäure ausgeglichen • Dübellöcher wurden mit 10% und 25%igem Paraloid B72 (in Aceton) abgedichtet, Eisenstäbe (überzogen mit mikrokristallinem Wachs) wurden mit Araldite 2015 befestigt 	<p>2/2008-11, Sculpture, Polychromy, and Architectural Decoration, p.16-18)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 12 Terrakottatondos (MARQUES, SOFIA: “<i>Twelve Panels by Luca della Robbia: Conservation Issues</i>” in: Glass and Ceramic Conservation, Interim Meeting ICOM-CC, Slovenia 2007, S. 130-140; MARQUES, SOFIA: “<i>Glazed terracotta roundels by Luca della Robbia: conservation issues</i>”, online unter: http://www.vam.ac.uk/res.cons/conservation/journal/number_54/luca_della/index.html; • Terrakottaaltar (COON, CAROLIEN: “<i>The Conservation and Installation of a 16th Century Tin Glazed Terracotta Altarpiece. The Annunciation by Giovanni della Robbia 7235-1860</i>”, unpublizierter Bericht und Poster)
<p>Niederlande/Restauratorin Renske Dooijes/ Rijksmuseum van Oudheden</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Paraloid B72 (50%ig in Aceton) • Primer: Paraloid B72 (3-10%ig in Aceton) <p>• Epoxidharze Araldite 2020 oder Fynebond (großes Gewicht) mit Primer aus verdünntem Epoxidharz oder Paraloid B72 (3-10%ig in Aceton); Für bessere Verarbeitung: Aerosil als Füllstoff</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Fehlstellen werden mit eingefärbten Gips und Modostuc (Calciumcarbonat mit Polyvinylacetat) ergänzt 	<ul style="list-style-type: none"> • Keramiktöpfe (H: 80cm) der Uruk-Zeit des Museums (Aufsatz in: Leiden Journal of Pottery Studies)

Anforderungskatalog: Klebstoffe

Klebstoffe und Klebtechnik zur Restaurierung von zerbrochenen Figuren der Terrakottaarmee, Xi'an China



Ansicht und Schnitt eines Terrakottakriegers



Kontakt:

	
Dipl. Restauratorin Univ. Linda Zachmann	Technische Universität München Fakultät für Architektur Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft China-Projekt Oettingenstrasse 15 80538 München / Germany Tel +49.89.21124-195 Fax +49.89.21124-554 l.zachmann@rkk.arch.tu-muenchen.de www.rkk.arch.tu-muenchen.de

BMBF-Projekt:

Deutsch-chinesische Zusammenarbeit im Kulturgüterschutz: Forschungen zum Erhalt ausgewählter Denkmäler in der VR China



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Einführung

Bei der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Zusammenarbeit der Technischen Universität München mit dem Museum der Terrakottaarmee des Ersten Chinesischen Kaisers Qin Shihuang in Lintong (Provinz Shaanxi) sollen für ausgewählte Fragen der Konservierung Lösungen entwickelt werden. Dabei stellt die Klebung der geschätzten 7300 lebensgroßen, meist noch farbig gefaßten Terrakottafiguren eine wichtige Aufgabe dar. Durchschnittlich sind sie in bis zu 70 bis 80 Scherben zerbrochen. Seit 1974 wurden ca. 1000 der ausgegrabenen Figuren wieder zusammengeklebt. Meist wurde dafür ein chinesisches Epoxidharz verwendet. Inzwischen wird zusätzlich auch ein Primer eingesetzt (z.B. Acrylharz Paraloid B-72 von Rohm and Haas), um die Anforderung der Reversibilität (Erneutes Lösen der Einzelteile) zu gewährleisten. Seit 1999 kann auch die Farbigkeit mit der *qi*-Lackgrundierung erhalten werden. Die Ausgrabungen dauern an, so daß ein großer Bedarf besteht weitere Figuren anderer Gruben zu konservieren und kleben.

Ziel ist die Auswahl eines geeigneten Klebemittels, evtl. zusammen mit Hilfskonstruktionen oder mechanischen Verbindungen, um die restaurierten Terrakottafiguren vor Ort in den überdachten Grabungsarealen und dem dort herrschenden Klima auszustellen. Im folgenden finden sich die Anforderungen an ein optimales Klebemittel. Bei der Suche müssen sicherlich Kompromisse eingegangen werden.

Ausgangslage

Terrakottafiguren

Größe (Höhe):	180 – 202 cm
Gewicht:	120 – 200 kg
Scherbendicke:	durchschnittlich ca. 3 – 6 (bis 12) cm
Scherben allgemein:	große und kleine Scherben passen nicht immer perfekt zusammen, evtl. müssen Fugen von 1 – 5 mm ausgeglichen werden; teilweise fehlen auch größere Scherben
Aussehen der Terrakotta:	Graue und (durch den zweiten Brand verursachte) rote Terrakotta, erstere teilweise mit Resten von Bemalung und Grundierung aus Ostasiatischem <i>qi</i> -Lack
Brandtemperaturen:	Reduktionsbrand bei ca. 950-1000°C
Bemalung:	Pigmentschicht aus Beinweiß, Bleiweiß, Kaolin, Zinnober, Azurit, Malachit, Chinesisch Violett (Bariumkupfersilikat), Beinschwarz, rote und gelbe Eisenoxide; Hauptkomponente des Bindemittels ist Ei

Terrakottamaterial

Gefüge:	durchgehend sehr homogen, ohne Materialfehler; 70% der Matrix besteht aus Schichtsilikaten und Eisenhydroxiden, 30% aus feinem Quarz
Hauptkomponenten:	5 – 10% Quarz, Plagioglas, Mikroklin
Porosität:	30 Vol-%; Porengrößen: 0,08 - 1,6 mm; (die Terrakotta ist frostbeständig)

Zugfestigkeit: zwischen ca. 2,2 N/mm² senkrecht zu Tonmineralschichtung und ca. 1,2 N/mm² parallel (Durchschnitt: 1,70 N/mm²)

Klima

Temperaturen: von ca. 0°C (manchmal auch – 4°C) bis ca. 36°C

Luftfeuchtigkeit: rel. Luftfeuchtigkeiten zwischen 40% - 95%

Allgemeine Anforderungen an den Klebstoff

- Hohe Alterungsstabilität (im Idealfall mehrer hundert Jahre)
- Ausreichende Haftung auf den beschriebenen Terrakottaoberflächen, evtl. Vorbehandlungen der Klebflächen mit Primern sind möglich
- Ein farb- und alterungsstabiles (Pre)polymer als Rückgrat-Bindemittel (*backbone binding agent*), gegebenenfalls Füllung mit inerten, anorganischen Füllstoffen
- Möglichst keine Zugaben von Weichmachern
- ph-Wert: neutral bis alkalisch
- Der Klebstoff soll auch Fugen mit 1 – 5 mm füllen können
- Der Klebstoff kann durchsichtig, weiß, grau oder auch gelblich sein
- Zugfestigkeit: um 1,7 bis 2,2 N/mm²
- Geringe Schrumpfung
- Glasübergangstermperatur über 50°
- Topfzeit: mindestens 15 min bei Reaktionsklebstoffen
- Abbindezeit: je nach Wiederanlösbarkeit spätestens nach 48 h

Spezielle Anforderungen

- Die Klebefestigkeit und die mechanischen Eigenschaften des Klebstoffes sollten der Terrakotta angepasst sein, d.h. im Idealfall möglichst eine Festigkeit gleich oder leicht unter der Terrakotta haben.
- Ein Bruch sollte möglichst in der Klebefuge und nicht im Original entstehen.
- Der Klebstoff sollte nach Möglichkeit **reversibel**, d.h. der Klebeverbund zwischen den Bruchstücken wieder lösbar sein, z.B. durch Hitze, Feuchtigkeit, Seifenlauge etc., auch evtl. Reste in den Porenräumen sollten entfernenbar sein
- Das Material muss unter den klimatischen Bedingungen **stabil** bleiben (Temperatur in der Grube steigt bis zu 36°C, hohe Luftfeuchtigkeit).
- Die Abbindezeit des Klebstoffs sollte noch Korrekturen während des Zusammensetzens ermöglichen (5 – 10 min).
- Die Alterungsbeständigkeit muss gewährleistet/geprüft sein.
- Aufgrund der hohen Anzahl zu klebender Figuren ist eine einfache Handhabung und effiziente Arbeitsweise mit dem Klebemittel wünschenswert.
- Der Klebstoff sollte möglichst gesundheits- und umweltverträglich sein (frei von organischen Lösemitteln und toxischen Dämpfen).

Klebstoffliste Überblick

Handelsname	weitere Handelsnamen oder vergleichbare Produkte	Chemische Gruppe	Hersteller	Vertrieb	Handelsform	Literatur/Info/Bild	Vorteile	Nachteile	Ausschlussgrund
AKePox2000		Epoxidharz mit Polyaminhärtner	AKEMI	J. König G m b H + C o .	Flüssig				Extrem hohe Festigkeiten (50-60N/mm ²)
Aquazol®200		In Wasser oder organischen Lösungsmitteln lösliches, thermoplastisches Kunstharz; Poly (2-ethyl-2-oxazolin),	Polymer Chemistry Innovations, Inc., Tuscon/USA	Kremer	Harz (weißer Feststoff)	SDB 	Wasserlöslich; Tg: 70°C; Heißsiegelfähig; reversibel	Geringe Säure- und Basenbeständigkeit	Zu geringe Klebekraft; Klebekraft lässt mit der Zeit nach
Araldite 2011	AW 106 / HV 953U	Epoxidharz	Ciba Geigy, Huntsman	Kremer;	Pastöser Zweikomponentenklebstoff (A:100 : B:80GT)	SDB 	100min gebrauchsfähig; beste Klebefestigkeiten: 0,05-0,10mm; Biegefestigkeit : 60 MPa E-Modul: 1904 MPa; Tg: 45°C; Härtungsdauer für ZSF über 10N/mm ² : 36h; ZSF bei Metallen: über 25N/mm ²		zu pastös für gut passende Scherben; lange Härtungszeit von 15h bei 20°

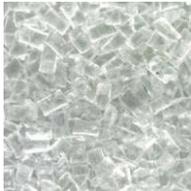
Araldite 2020	XW396/XW379	Epoxidharz	Ciba Geigy, Huntsman	Kremer	Flüssiger Zweikomponentenklebstoff für die Glasklebung		Verarbeitungsz eit (23°C): 40 -50min; Härtungsdauer: 23 Stunden; ZSF auf Glas: 25 N/mm ² Tg: 39,5 °C E Modul: 2467,9 MPa Biegefestigkeit : 2467,9 MPa; wiederanquell- bar		Für Glasklebung, zu niedrigviskos für senkrechte Flächen
Araldite AY 103 /HY991		Epoxidharz Bisphenol-A Epichlorhydrinharze; Härter: Triethylenetetramine (3-7%) 2,4,6-Tris(dimethyl- aminomethyl)phenol (7-13%) Bis((dimethylamino) methyl)phenol (1- 3%)	Huntsman	Kremer	Transparenter, niedrigviskoser , leicht gelblicher Zweikomponen- tenklebstoff in Dosen oder Kartuschen mit hoher Kontakthaftung ; (A:100 : B:40GT)		Seit den 1970er in der Restaurierung in Gebrauch; Gebrauchs- dauer: 90min; beste Festigkeiten bei 0,05- 0,1mm Klebefuge; Härtungsdauer: 12h; hitzeresistent bis 50°C Zugscherfestig- keit (DIN 53283): > 15N/mm ²	Hohe Klebekraft, Härtungsdauer: 16h/40°C	
Chinesisches Araldite 6030	AY 103 / XW396 bzw. Araldite 2011 Europa	China: Epoxidharz + “polyamide gum (=Ketimin)	Ciba Geigy		Zwei Komponenten in Dosen (China), in Kartuschen (Europa)	Informationsblatt Araldite, Ciba-Geigy (Pedeli); Jahresberichte Analysiert 1998 von Stefan Simon; Nicht mehr produziert	bei Raumtemperat ur aushärtender, transparenter, flüssiger Allzweck- Zweikomponen- tenklebstoff mit hoher	Leicht gelblich	Wird nicht mehr produziert

							Kontakthaftung ; Gebrauchsdaue r: 90min bei 25°C		
Araldite 2015	AV 5308 / HV 5309-1	Epoxidharz	Ciba Geigy, Huntsman		Pastöser Zweikomponen -ten Kleber	Sicherheitsdatenblatt			Zu pastös; für Verbundwerkstoffe, Metall
Araldite SW 419-1 Härter HY2419	RenGel SW 419-1 RenHY2419	Epoxidharz: Bisphenol A (20- 28%) Bisphenol F (6-12%) Härter auf Basis eines Amins Trimethylhexa- methylendi-amin (15-23%) Triethyltetraamin (10-18%) Benzylalkohol (14- 20%)	Ciba Geigy; Huntsman		Zweikomponen -ten Klebstoff auf Epoxidharzbas is, schwarz flüssig (A:100 : B:13GT) flüssig	Sicherheitsdatenblatt 		Shore-Härte: 85-90	Modellpastensysteme für Formen/Blechumformwerkze uge, sehr hart; Gebrauchsdauer: 15-20min
Araldite SV427 Härter HV427		Epoxidharz	Ciba Geigy; Huntsman		Pastöser Zweikomponen -ten Klebstoff auf Epoxidharzbas is, braun (A:100 : B:100GT)		E-Modul aus Druckversuch: 950 N/mm ² , Biegefestigkeit 20-25 N/mm ² , Verarbeitungsz eit: 40min	Druckfestigkeit : 20-25 N/mm ² ,	Modellpastensystem, für Holzergänzung, hohe Festigkeit, teilweise unbekannte Zusammensetzung
Calde Trowel HQ 82 U, Feuermörtel		Wasserglasgebun- dener Mörtel	Calderys	Calderys					Produkt muss bei mindestens 400°C aushärten. Bei der Ofenrestaurierung also nur bei Wiederbenutzung vorstellbar. Das Produkt ist wasserglasgebunden, weshalb sich eine aufgebrachte Mörtelschicht von ca. 1mm bei Versuchen mit Probekörpern mit Wasser/Feuchte komplett

									auflöste/zerbröselte. Dies bedeutet zwar eine gute Reversibilität, laut Calderys kann sich aber ohne Aushärtung Schimmel bilden
Chinesisches Epoxidharz: Epoxy Resin 6101 (E44)/Hardener 650	aktuell eingesetzter Klebstoff in Lintong; entspricht laus Chinesen dem Uhu plus endfest 300 (30 N/mm ²)	Binder: Phoenix Epoxy Resin 0174/WSR6101 und Polyamidharz 650	Wuxi Resin Factory of Blue Star (Wuxi Bluestar Epoxy Co.), New chemical Materials Co., Ltd. Wuxi Resin Factory P.R. China, Guangrui RD Wuxi Jiangsu Tel: 0510-82401334 oder 82401921	Bezug bei www.epoepresin.com.cn; Auskunft: China National Chemical Corporation	Leicht gelblicher Zweikomponenten Allzweckklebstoff in Dosen (A: B = 70% : 30% bis 50% : 50%) Scherfestigkeit ≥ 13 mpa (chin. Messung; Anhang)	Allgemeines Informationsblatt der Firma (chin., Übersetzung im Anhang); Fax von China National Chemical Corporation zu Inhaltsstoffen (Anhang) 			Zu wenig Information über das Epoxidharz, zu hohe Festigkeit
3M-Scotch-Weld™ DP 610	Polyurethanklebstoff	2-Komponenten Konstruktionsklebstoff auf Polyurethanbasis	3M Deutschland GmbH, Carl-Schurz-Str. 1, 41453 Neuss		Mischungsverhältnis: A:1 : B:1	Besonders für Glas und Metall geeignet, in der Restaurierung im Kunsthandwerk eingesetzt 	Gute Einsetzbarkeit zwischen -55 und +80°C, gute Witterungsbeständigkeit	Zugescherfestigkeiten (Aluminium, DIN: 53283): 8,7N/mm ²	10min Verarbeitungszeit; genaue Zusammensetzung unbekannt
Montageklebstoffe 209 und 328 (BASF)	Wässrige Dispersion eines Polymers auf Basis eines Acrylsäureesters sowie eines Methacrylsäureesters		BASF				Modifikationen wurden speziell für vorliegende Zwecke verändert (Zusammensetzung genau bekannt); umwelt- und gesundheits-	Schlechte Haftungseigenschaften auf Terrakotta (ohne Primer)	Viel zu geringe Festigkeit

							verträglich; auf Wasserbasis, reversibel durch z.B. Einweichen in Wasser (auch Nachteil!)		
Mowital B30H	Polyvinylbutyal	Polyvinylbutyal	Ehemals Wacker, Kuraray	Kremer; Kuraray	weißes Pulver; in der Industrie für Haftmittel, Bindemittel, Schmelzkleber	Sicherheitsdatenblatt Kuraray; Gespräch mit Techniker von Kuraray; Besuch Keramikrestauratorin Gergana Kleinecke Naturhistorisches Museum Wien; Mowitalbroschüre engl.; Wurde bei Wacker als Laminierfolie zwischen Gläsern als Sicherheitglas eingesetzt 	Reversibel (Thermoplast) durch Erwärmen oder Anlösen mit Ethanol; Gesundheits- und umweltverträglich (verbrennt restlos zu CO2 und H2O); E-Modul: 2523 N/mm2 (B 30 H); Tg: 68°C seit den 1970 in der Keramikrestaurierung und der Archäologie eingesetzt, gute Alterungseigenschaften; mit Paraloid verträglich		
Mowital B60H	Polyvinylbutyal	Polyvinylbutyal	Ehemals Wacker, Kuraray	Kuraray		Sicherheitsdatenblatt, siehe Mowital B30H, nur anderer Acetalisierungsgrad und Molekulargewicht	Tg: 70°C; seit langem in der Restaurierung eingesetzt, gute Alterungseigenschaften		Spröder, geringer Feststoffgehalt als Mowital B30H
Früher Mowilith 60, jetzt	Vinnapas UW 2 (Wacker), AYAT (Union-Carbide),	Polyvinylacetat Homopolymer, Feststoffpulver	Ehemals Hoechst, Wacker	Kremer	Feststoffgranulat	Sicherheitsdatenblatt	Erweichungspunkt: 160-180°C, gute	Trocknungsverlust: max. 1%	Tg.: 35-45°C; bzw. 42°C

Vinnapas B60Spezial	Rhodopas H (Frankreich)						Alterungseigenschaften (z.B. Keramikrestauratorin Agnini: angesetzte Lösungen =15 stabil), Mischungen aus 50/60 1:1 in Aceton sind fester als Paraloid B72), kein Quervernetzen Zugfestigkeit > 15N/mm ² ; keine Additive		
Mörtel KP 1090 unilijm	Rein mineralischer Mörtel			Jahn Deutschland/Niederlande	(1VT Wasser : 2VT Kleber), Vorleimen (verdünnte Mischung)		Datenblatt Jahn		Zu schwache Festigkeit
Mecosan L-TR		auf Basis von Cellulosenitrat, Weichmacher	Kissel u. Wolf GmbH, 69168 Wiesloch Tel.: 06222-5780	Kremer; Kissel und Wolf GmbH	gelöst in Ethanol, Methylacetat, Propanol, Naphta und Dibutylphtalat	Sicherheitsdatenblatt Kissel und Wolf GmbH; 	Klebstoffentwicklung für archäologische Keramikklebungen; Lösungsmittel-verdünnbar	Versprödung; laut Literatur: schlechtes Alterungsverhalten (Selwitz, Charles: The Use of Cellulose Nitrate as an Adhesive for Ceramics S. 41-47: Lebensdauer: „more than 25, not more than 200 years“ (S.41)	Starke Schrumpfung, Weichmacher nötig
Paraloid B72	Acryloid B 72 (Röhm & Haas);	festes Copolymer aus MA (30) und EMA	Röhm	Kremer	Feststoffgranulat oder 15%ig	Sicherheitsdatenblatt Kremer 1996	Reversibel, gute, viel	Niedriger Tg: 40°C, bricht	Niedriger Tg-Wert, kalter Fluß?, zu geringe

	vergleichbar mit Plexigum N 80	(70)			als Lösungsmittelharz	Down 1986 Down 1996 Koob in: Ambers 2009 	geteste Alterungseigenschaften; langer Einsatz in der Restaurierung; Tukonhärte: 2,9 (nach 30min bei 180°F)	nicht in der Klebefuge	Klebekraft?
Paraloid B44				Kremer	Feststoffgranulat oder Lösungsmittelharz		Tg: 60°C; Tukonhärte: 6,5 (nach 30min bei 180°F)	Härter als Paraloid B72	
Pattex PA700 Total Fix (bzw. Formulierung AH 312 ähnlicher Zusammensetzung)		Silanvernetzendes Polymer (sog. „Flextec®“-Präpolymere: Polymerkette mit reaktiven Silangruppen an den Enden)	Henkel		Einkomponentiger Kleb- und Dichtstoff	Buch: Stotten, Thomas/Majolo, Martin: Montageklebstoffe in der Praxis, Henkel; Düsseldorf 2010.	Sehr flexibel, bis 20mm spaltüberbrückend; Zugscherfestigkeiten: 3,0-3,6 N/mm ² ; Aushärtung: 2mm/24h; auch für Außenbereich geeignet	Abstand der Klebeteile: min. 1mm; Verarbeitungszeit: 15min	Abstand der Klebeteile: min. 1mm; Verarbeitungszeit: 15min; Zusammensetzung; keine Erfahrungswerte
Pattex Contact adhesive transparent	Pattex Contact Kraftkleber Transparent (Germany) 	Polyurethan	Henkel (China)		Einkomponenten Klebstoff in Tube oder Dose		Verarbeitungszeit: 60min; Endfestigkeit nach 3 Tagen	Festigkeit vom Anpressdruck abhängig	In China für kleine Bruchstücke eingesetzt; genaue Zusammensetzung nicht bekannt

									
Pattex extra stark, jetzt Pattex super power		wasserbasiert	Henkel		Einkomponent allzweckenklebstoff		umweltfreundlich	Anfangshaftung von (nur) 350kg pro m ² , also nur 0,00343 N/mm ²	Zu geringe Klebkraft
SK-138 Epoxidharz A mit Härter B/ SK-138 环氧树脂胶 (chinesisch)		Epoxidharz und Härter	Magpow		Zweikomponentenklebstoff in Dosen; Aushärten: bei 25°C: 24h; Zugscherfestigkeit: 8MPa				
Steinkleber (Pung)		MMA (Methmethacrylat)-Reaktionsharz	Olaf Pung (Restaurator)				Speziell für die Steinrestaurierung entwickelt; Zusammensetzung bekannt und einstellbar; reversibel	Muss jedes mal neu angesetzt/genau abgewogen werden	Sehr hart

							durch Anteil von Paraloid		
Uhu plus Endfest 300	Chin. Version: 合众 AAA 超能胶 („Superglue AAA“)	Duroplastisches Epoxidharz: Diglycidylether auf Bisphenol A Basis Härter: Triethylentetramin	Uhu-Werke	Uhu-Werke	Zweikomponentenklebstoff in Tuben (A:100 : B: 100VT bzw. Härte: 50-150 je nach Härtewunsch) Endfestigkeit: 24h, Topfzeit: 90min; Klebefestigkeit ist abhängig von Temperatur	Sicherheitsdatenblatt Gebrauchsanweisung , Gesprächsnote Elisabetta Brunaf  		30N/mm ² (Zugscherbeanspruchung von Alu nach Aushärtung bei 180°C) Zugscherfestigkeit (nach 1 Monat aushärten; DIN EN 1465): 17N/mm ² ; Zugescherfestigkeitsangaben der Chinesen vor 10 Jahren gemessen: 10N/mm ² auf Stahl	Wird in China für Ergänzungen mit Terrakottamehl gemischt eingesetzt
Uhu hart		Auf Basis von Cellulosenitrat, (Acrylester, PVC-Copolymer) mit Weichmacher DBP (Dibutylphthalat)	Henkel	Uhu-Profishop	Einkomponentenklebstoff, schnellhärtend	Datenblatt Uhu Profishop 	Einfache Anwendung	Schlechter reversibel als Mecosan LTR	Nach 10min handfest; Nachteile Celluloseklebstoff (siehe Mecosan)

Weitere Materialien

Handelsname	weitere Handelsnamen oder vergleichbare Produkte	Chemische Gruppe	Hersteller	Vertrieb	Handelsform	Literatur/Info	Vorteile	Nachteile
Acrylatmörtel Trockenmischung: Z 1 Ziegel hellrot			Romstedt	Romstedt	1kg	Zugabeempfehlung : 130 ml Acrylatdispersion; für Ergänzungsmassen einsetzbar		
Arbocell	Cellulosefasern unterschiedlicher Länge	Reine Cellulose		Kremer Pigmente		Kremer Pigmente		
Bindemittel AC		Wässrige Reinacrylat- dispersion	Remmers	Remmers	1l	Empfohlen für Acrylatmörtel- System (Trockenmörtel- mischung AC)		
Jahn M 100 Ersatzmörtel für Ziegelstein			Jahn International Restaurierungste- chnik	Jahn Internation- al Restaurieru- ngstechnik	5kg	Mörtel für Terracottaergän- zung; mit Wasser leicht anzurühren, innerhalb 30min verarbeiten; kann zu dünnen Schichten verstrichen werden	Schrumpfarm, rein mineralisch, kann an Terrakottafar- ton angepasst werden	
Köstrosol 0830 AS		Kiselsol: kolloide Dispersionen aus Siliziumdioxidpartik- eln in Wasser	Chemiewerk Bad köstritz GmbH, Heinrichshall 2, 07586 Bad Köstritz; www.cwk-bk.de	Chemiewer- k Bad köstritz GmbH	1l	Als Bindemittel für Mörtel/Terracotta- ergänzungsmassen (z.B. im BNM), in der Industrie für Getränkeklärung		
Moltofill, Spachtelpulver innen		Spachtelmasse auf Naturgipsbasis		Kuster- mann	500g (1Teil Wasser : 2Teilen Gips)	Als Terracottaergän- zungsmasse		Sehr hart, schlecht wieder zu entfernen
Omega-Sil XL		Steinkohlenflugasche (100% mineralisch)	Omega Minerals Germany,	Omega Minerals		Feinteiliges grauschwarzes	niedrige Oberfläche,	Setzt sich am Boden ab

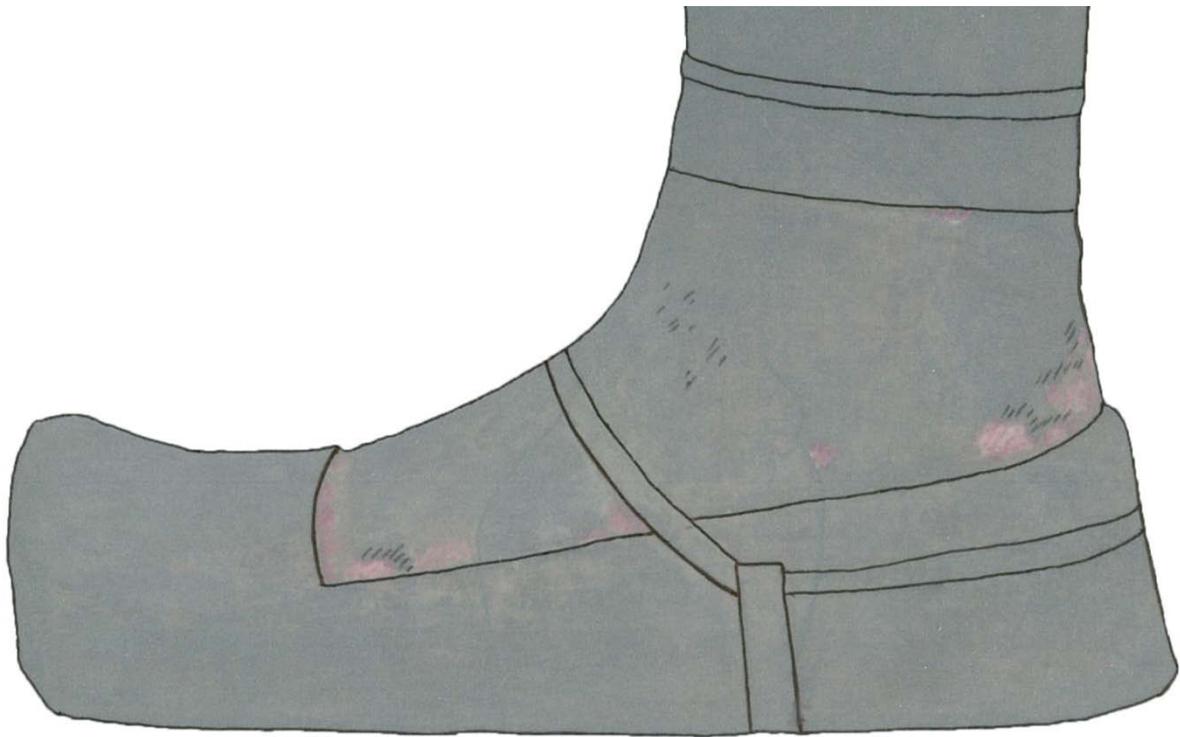
			Rugenbarg 63a 22848 Norderstedt, http://osthoffomegagroup.com	Germany, Rugenbarg 63a 22848 Norderstedt , http://osthoffomegagroup.com		Pulver; Aluminium- Silikat- Mikrovollkugel als Füllstoff	hohe Härte, Kugeleffekte, geometrisch optimale Form einer Kugel erhöht die Packungsdichte eines Klebstoffes	
Syton X30		Wässrige Kieselsäure- dispersion	Kremer Pigmente		1kg	Als Bindemittel für Mörtel/Terrakotta- ergänzungsmassen		

Gewichte der einzelnen Fragmente

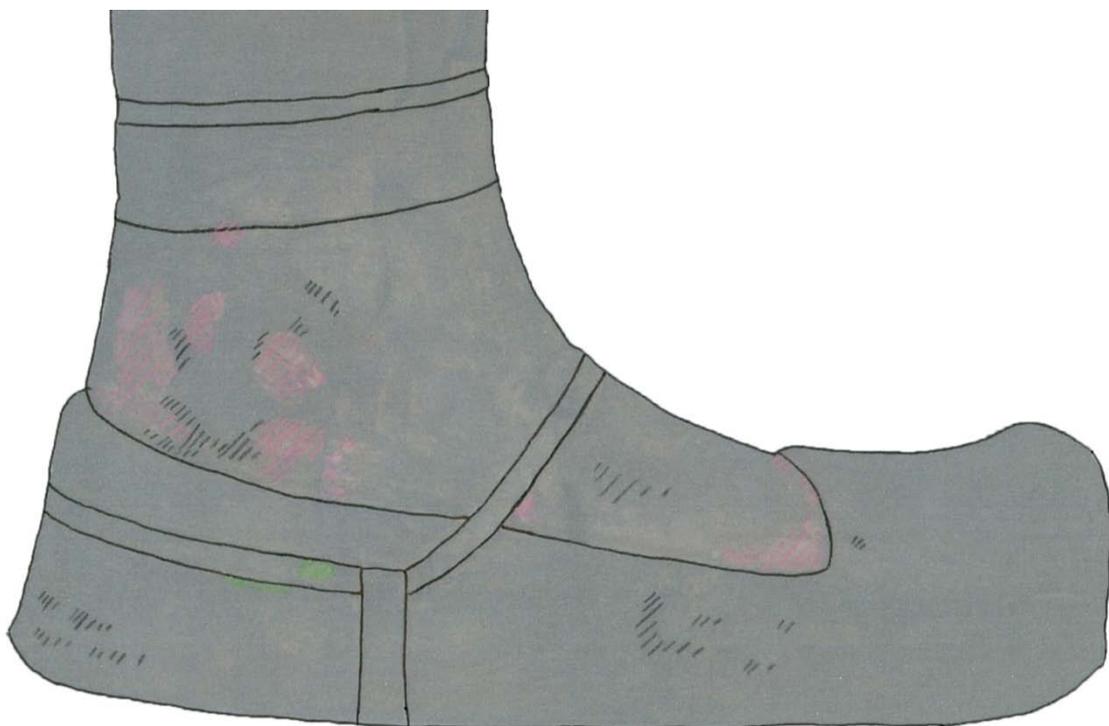
teilweise Dokumentation der chin. Restauratoren

Fragmentnummer	Gewicht (in kg)	Fragmentnummer	Gewicht (in kg)	Fragment	Gewicht (in kg)
1	23,5	42	1,447	83	0,424
2	16,5	43	0,824	Kopf	5,49
3	4,785	44	0,276	neu zugeordnete Fragmente	0,474
4	5,835	45	0,296		0,195
5	5,435	46	0,654		0,278
6	2,087	47	0,138		0,179
7	4,665	48	1,028		0,836
8	8	49	0,318		0,867
9	5,015	50	2,247		0,261
10	1,372	51	2,552		2,169
11	1,283	52	1,576		1,261
12	0,641	53	0,53		0,246
13	1,211	54	0,732		0,134
14	0,595	55	0,51		0,601
15	1,217	56	0,234		0,621
16	0,88	57	0,282		0,71
17	0,718	58	0,932		0,627
18	1,61	59	0,323		0,313
19	0,584	60	0,248		0,069
20	0,398	61	0,205		1,005
21	0,673	62	0,103		0,694
22	0,905	63	0,312		0,224
23	1,129	64	0,117		0,083
24	1,501	65	0,062		0,981
25	0,444	66	0,039		0,747
26	0,415	67	0,07		2,527
27	0,303	68	0,111		0,344
28	0,385	69	0,086		0,314
29	0,637	70	0,22		0,869
30	0,315	71	1,759		0,458
31	0,251	72	5		1,366
32	0,338	73	0,712	1,384	
33	0,315	74	3,819	linker Arm (Hand fehlt)	4,909
34	0,2	75	5	rechter Arm	5,127
35	0,225	76	0,439	Daumen	0,218
36	0,924	77	0,182	Mittelfinger	0,009
37	0,351	78	0,061	Bodenplatte	7,785
38	0,532	79	0,281	Gesamt: 176,865 kg	
39	0,281	80	0,333		
40	0,255	81	0,027		
41	0,842	82	0,428		

Dokumentation der Farbfassung



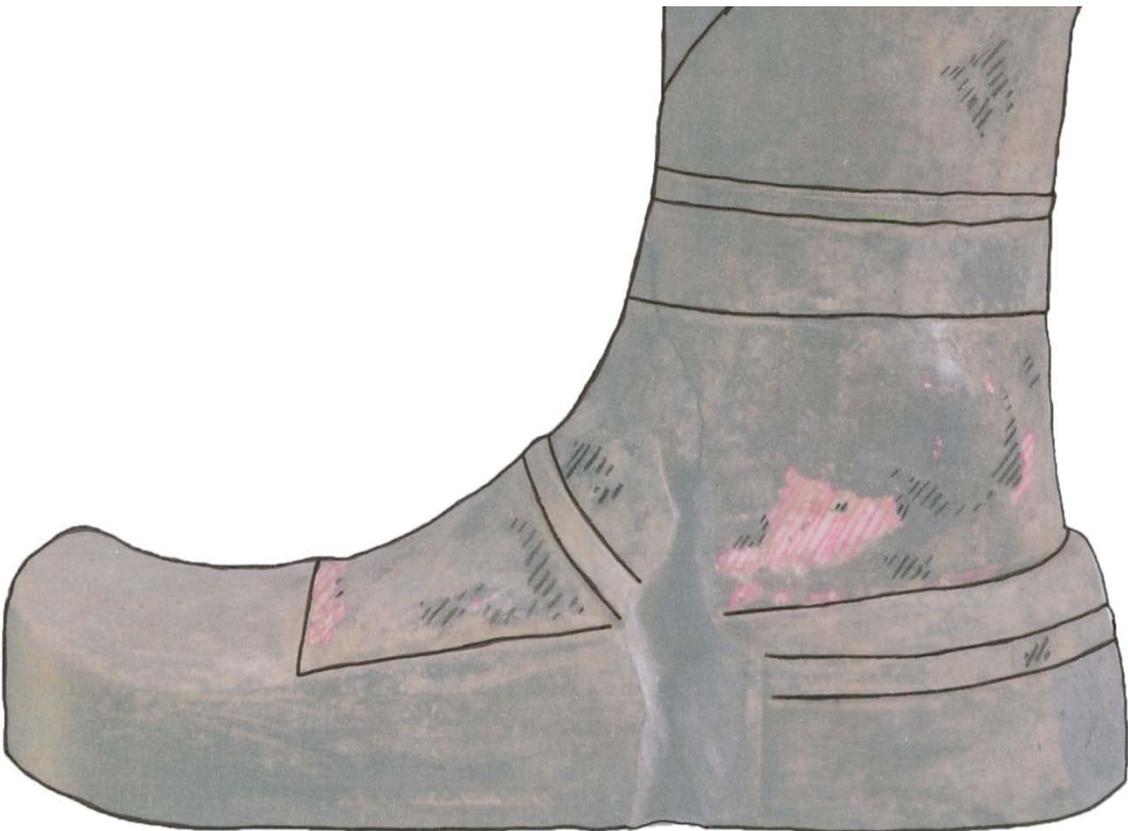
Linker Fuß, linke Seite



Linker Fuß, rechte Seite



Rechter Fuß, rechte Seite



Rechter Fuß, linke Seite



Unterseite Rock/Torso

Use of Mowital B30H as an adhesive

General Information

Mowital B30H is a thermoplastic Polyvinylbutyral made by the company Kuraray.

“B” means: based on butyraldehyde. Compared to other Mowital types (for example Mowital B60H) it has a middle degree of polymerization (30) and a middle degree of acetylation (H). The high glass transition temperature is quite high with 68 °C. It is a fine-grained, white, free-flowing powder.

It is used for conservation since the 1960s and studies demonstrate, *that it is fairly stable, oxidizes yellow little, degrades slowly to become brittle, and does not cross-link significantly below its glass transition temperature* (HORIE, VELSON: *Materials for Conservation*, Oxford 2010, p. 146).

If you heat Mowital above 120°C, it will decompose and cross-link, the reversibility will decrease.

Mowital is available in China from Kuraray too: Unit 2207, 2 Grand Gateway, 3 Hongqiao Road, Xuhui District, Shanghai 200030, China.

Preparation of a solution in ethyl alcohol

Shown is the preparation of a standard mixture of Mowital B30H for terracotta fragments for a 25% solution and an amount of 50g Mowital B30H glue (12,5g Mowital and 37,5g Ethanol).

The higher the concentration the better: it is possible to produce a 30% solution, then also the shrinkage of the gluing layer will decrease, but it depends on your application: for small fragments 25% is good.



Necessary tools:

- a glass bottle (minimum: 50ml) with a tight closing lid to preserve the glue-solvent from evaporating
- a stirrer with a magnet (maybe with heating function)
- a tool/tweezers to remove the magnet from the solvent
- Ethanol (99%)
- Mowital B30H powder



Weigh out 12,5g Mowital B30H powder in a glass.



Fill in 37,5g Ethanol, with a pipette towards the end



Put a glass (with lid) with the ethyl alcohol on a Stirrer and add the magnet for mixing



Add Mowital B30H powder in little portions. Close the lid during the waiting time.



It will need a little time. You can use heat for better dissolving, but not more than 50°C because of the Ethanol. You don't need heat for the later application.

For a higher solution or if you don't have a stirrer you can also put the powder in a gauze bag in a glass over the alcohol and close the lid tightly. It will dissolve after a while. Or you open the lid of a lower solution for a while and the solution will evaporate down.



You can store the glue as long as the lid is closed tightly and no ethanol will dissolve. For a perfect concentration prepare a new solution.

Application

I use a hard brush to put the solution on both terracotta surfaces. It has to wet the surface sufficiently. If the solution is too viscous (because you didn't use it for a long time), add a little amount of alcohol. Or you can use a primer of a thinner concentration (e.g. 10-15%) as a first layer on your surfaces; this is an advantage if you have a very porous material.

Before you stick the pieces together you have to wait a little until some alcohol is evaporated. If you glue a lot of pieces at one time, you have to work more quickly before the alcohol evaporates.

The bonding reaches its strength after a few minutes, try to press the parts during this time together or fix it; but for curing (depends on the bonding thickness) wait for longer time, up to 24 hours and don't move it during this time.

Übersetzung chin. Informationsblatt: Chinesisches Epoxidharz

(in Zusammenarbeit mit Wang Dongfang und Li Bin, Stand: 2012-8)

Phoenix 6101 Epoxy resin

- Toller Klebstoff, synthetisches Polymer und Härter (thermosetting) mit hoher Klebkraft, widerstandsfähig gegen Chemikalien, hitzebeständig, hohe mechanische Widerstandskraft, dient als Isolator bei Elektrizität, geringe Schrumpfung, niedrige Wasseraufnahme.
- Breiter Einsatz für Metalle und Nichtmetalle, in Überzugsmaterialien bildet es nicht korrodierende Schichten (als Zugabe zu Farbe)
- Einsatz für Abgüsse, zum Laminieren, für Panele und Rohre, für Schleifpapiere, in der Lichtindustrie, Maschinerie und Raumfahrt
- Erhältlich mit 2 verschiedenen Molmassen
- Allzweckklebstoff
- Gute Filmbildungseigenschaften, säurebeständig, keine Salzkorrosion
- Exakter Name: 0174/WSR6101 (E44)
- Pro 100g Harz: 0,41 – 0,47 Epoxid gruppen
- Gehalt *unhydrolytic Chlorine* $\leq 0,001$
- Dynamische Viskosität ist mittel
- Trocknet transparent wie Glas (trifft nicht zu: Gelb!!)
- Empfehlung: 100g Epoxyharz mit 5 – 15% Tertiary amine Härtern und 1-3% *anhydrite*

Kosten: 1kg Harz: 20.50 Yuan (= ca. 2 €, inclusive Härter: ca. 50 Yuan = ca. 6 €)

Bestellung durch Wang Dongfang bei www.epoxyresin.com.cn

Tabelle: Brenntemperaturen von Prüfkörpern aus Sektor T23G9
(Grube 1),
durchgeführt von Rong Bo

编号	Dichtevolumen 体积密度(g/cm ³)	Wasseraufnahme 吸水率 (%)	Porosität 显气孔率(%)	Druckfestigkeit 抗压强度(MPa)	Brenntemperatur: 烧成温度/°C (±20)
1	1.81	17.3	32	69.9	860
2	1.86	17.1	32	43.6	920
3	1.91	14.6	28	76.3	990
4	1.81	18.0	33	64.1	980
6	1.79	17.2	31	67.2	950
7	1.82	17.8	32	26.6	860

Informationen zum Chinesischen Epoxidharz
Phoenix Epoxy resin 6101/Hardener 650 (China National Chemical Corporation)

中国化学工业公司
China National Chemical Corporation

南通星辰合成材料有限公司
质量证书

客户名称: 中蓝国际化工有限公司
产品名称及描述: 环氧树脂\0174\WSR6101\桶装(kg)\1\工业级
产品编号: 1180041309
交货单号: 80304381
发货日期: 2012.04.21
检验日期: 2012.04.20
批号(罐号): 1242451310
执行标准: Q/320601NHS401-2010

检验项目	单位	检验指标	检验结果
外观		无明显机械杂质	符合标准
环氧当量	12/mol	210~240	220
无机氯值	%	≤0.018	0.001
水解氯	%	≤0.50	0.32
挥发物	%	≤1.0	0.1
色泽	Hazen	≤200	22
软化点	°C	14~23	20

备注:

检验员: YANGWEI

审核:

董勇



声明

南通星辰合成材料有限公司保证: 上述结果是基于特定的生产地点与特定的采样时间进行采样检测所得到的。

无锡市硕华环保新材料有限公司检验单

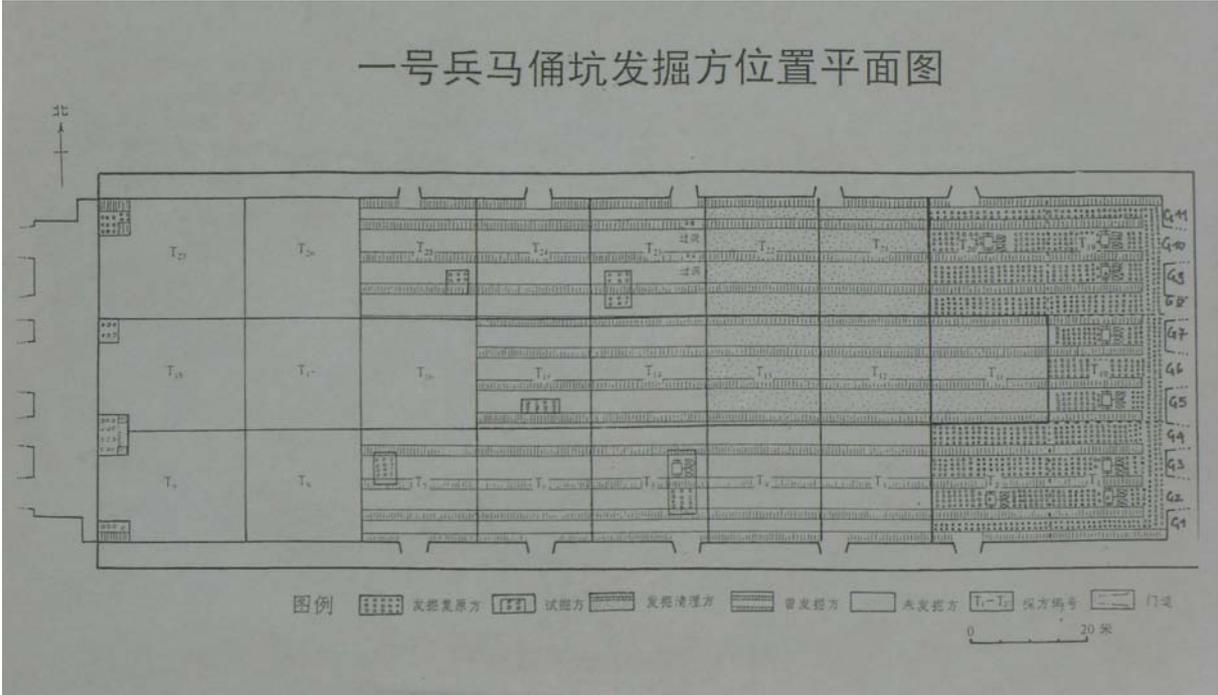
型号 B50 批号 2011.10.27 检验日期 10.16

检 验 项 目	检 验 结 果	结 论:
外观,		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">合 格</div>  检验员: <u>07</u>
粘度, 25℃ mPa·S	<u>26000</u>	
比重, 25℃ g/cm ³		
胺值, mgKOH/g	<u>213</u>	

Überblick: Festigkeitsmessungen chinesischer Klebstoffe
Angaben vom Museum der Terrakottakrieger und Pferde, Lintong

参数 种类	邵氏硬度 (zso)	抗压强度 (mpa)	抗拉强度 (mpa)	剪切强度 (mpa)	剥离强度 (N/m)	不均匀拉离 (kg/cm)	冲击强度 (kj/m)
德邦 3461	85	110	20	30			
德邦 3411	70			≥20			
中蓝晨光 DG-3S				≥15 铝-铝	39.2N/CM		
JC-311				17.9		34	2
康达超强结构胶			≥15	27.1			
康达 WD3620	70			≥15.9			
神力铃 sk-138				11.9 钢-钢			
东风 E44			36.8				34
东风接缝胶				≥7 铝-铝			
高级 504 万能胶			20.9				
凤凰 6101				≥13			
东风环氧树脂				≥11.8 铝-铝	≥1.3KN/m		

Grube 1: Lageplan: Fundsituation Terrakottafigur im Sektor 23



Reiseberichte 2011-2013

- Reisebericht Lintong 2011-03-21 bis 2011-04-01
- Reisebericht Lintong 2012-08-28 bis 2012-09-12
- Reisebericht Lintong 2013-04-1 bis 2013-04-26

Reisebericht: Lintong 21.3.2011-1.4.2011

Teilnehmer: Linda Zachmann (Protokoll), Mathias Kocher, Rupert Utz, Ulrich Meinhardt

Mo, 21.3.2011

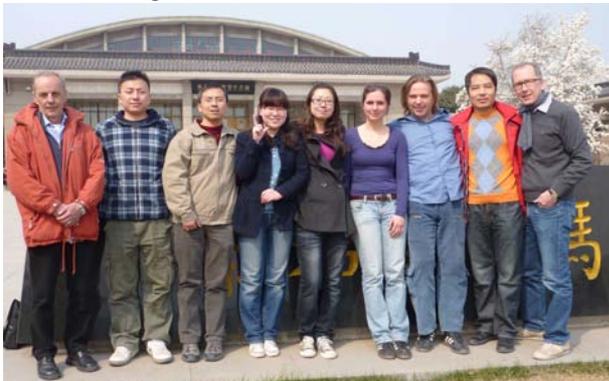
Abflug 19.40 in München

Di, 22.3.2011

Ankunft in Xí'an, Abholung durch Li Bin und Fahrt nach Lintong; Unterkunft und Abendessen im Hotel in Lintong mit Li Bin.

Mi, 23.3.2011

Besprechung der Arbeitsziele mit Rong Bo, der seit letztem Sommer als Leiter der Abteilung für die Laborarbeiten auch für die Klebetechnik und Farbfassungsproblematik zuständig ist, sowie mit Li Bin, Xi Na und Shang Yi.



Grundsätzlich ist geplant, in Grube 2 verschiedene Erdfeuchtemessungen für die Berechnung des 3-D-Modells vorzunehmen. Linda Zachmann soll die Situation und Vorgehensweise beim Reinigen und Kleben der Terrakottabruchstücke in der Grube 1 kennenlernen. Anschließend soll es eine Diskussion über die aktuelle Klebesituation mit Lan Desheng und den zuständigen Mitarbeitern geben. Es folgen zusammen im Labor praktische Versuche mit mitgebrachten Materialien. Der Jahresbericht 2007-09 wird nochmals an die Kollegen verteilt.

Auf chinesischer Seite wird berichtet, dass der Park inzwischen bis auf ein paar Pflanzungen fertig gestellt ist und die Elektroautos eingesetzt werden. Im Museumsgebäude finden bis auf den Keller weitere Baumaßnahmen statt.

Mittagessen in der Kantine mit Prof. Zhou Tie und Werkstattleiter Zhao Kun.

Nachmittags findet auf Wunsch eine Führung mit Li Bin durch die Grube 1 statt. Es folgt eine Führung durch das Museum, sowie die Grube 2 und 3, welche von Frau Zachmann und Herrn Meinhardt zum ersten Mal besucht werden.

Do, 24.3.2011

Messungen von Herrn Utz, Herrn Meinhardt, Herrn Kocher, Li Bin und dem Archäologen Zhang Jun in Grube 2.

Kontrolle des deutschen Materialschranks (2 Lampen, Paraloid B 72 und 44 ca. 100 g, quadratische Probenbehältnisse 2x2cm, Epoxidharz XY, Leertuben für Kleber 3 große, 4 kleine, Dosierhilfen, Plan von Henan Provinz und Shaanxi mit Xian, Spritzen, Private Pflegeprodukte.

Treffen von Frau Zachmann mit Lan Desheng in Grube Nr. 1: Diskussion über die aktuellen Klebemittel und Klebesituation, Beobachten der Arbeitsschritte beim Reinigen der Bruchstücke.

Der Zugang zur aktuellen Ausgrabung ist nicht gestattet, deswegen wird nachmittags mit Shang Yi von außen über die archäologischen Ausgrabungen diskutiert.

Fr, 25.3.2011

Weitere Meßarbeiten in der Grube, sowie gleichzeitige Auswertung der Messungen im Labor.
Nachmittags: Ausflug und Wanderung auf dem Lishan Berg in Lintong.

Sa, 26.3.2011

Ausflug mit Rong Bo, seiner Frau Mingming und Tochter Mali nach Dafosi, zum Tempel des Großen Buddha im Kreis Binxian in Xianyang.

Im Anschluß Besuch des Grabes der Prinzessin Yongtai, eines der Nebengräber des tangzeitlichen Qianling Grabes der Kaiserin Wu Zetian und ihrem Ehemann Li Zhi auf dem Liangshan-Berg mit anschließender Besichtigung.



So, 27.3.2011

Ausflug nach Xi'an: Radtour vom Südtor aus auf der gesamten Mauer.

Mo, 28.3.2011

Weitere Messungen in Grube 2. Praktische Versuche (Verarbeitungsmöglichkeiten und Lösungsversuche) in der Werkstatt von Lan Desheng mit mitgebrachtem Mowital B 30 H und eigenen, sowie chinesischen Testkörpern und dem chinesischen Epoxidharz.

Eine in der Werkstatt zusammengebaute Figur lässt erkennen, dass der Kleber (oft eingefärbt mit Pigmenten oder/und einem grauen Pulver immer noch auch zur Stabilisierung, bzw. Sicherung der geklebten Scherben dient, indem er dick über die Fuge hinaus und im Innenraum der Figur verteilt wird.

Di, 29.3.2011

Besuch des Geländes und der Baustelle für den Museumsbau über die Beamten-Grube K0006 (1358 qm²). Zusammenschreiben der Ergebnisse, Besuch des Teehauses bis 15.00, Mitarbeit von Frau Zachmann in Grube 2 bei der Probenentnahme (Bohrung).



Fotos: Uli Meinhard

Mi, 30.3.2011

Abschlußbesprechung mit Rong Bo, Li Bin, Shang Yi und Xi Na, bei der Rupert Utz die gewonnenen Ergebnisse vorstellt. Die Daten des 3-D-Modells sollen später an die deutsche Seite übergeben werden.

Fahrt zum Flughafen in Xi'an und Ankunft in Beijing um 15.00, wo Mr. Yi Wang uns abholt und zum CTS Hotel bringt. Abendessen mit Direktor Qinglin Ma, Prof. Wang, Zhiguo Zhang, Prof. Dr. Heinz Bercke und Mr. Wang.

Do, 31.3.2011

Ausflug mit Mr. Wang zur großen Mauer in Badaling, anschließend Fahrt in die Innenstadt mit Stopp vor der verbotenen Stadt.



Abendessen mit dem pensionierten Zhang Ting Hau, Prof. Wang und Mr. Wang.

Fr, 1.4.2011

Um 11.00 Aufbruch zum Flughafen, Ankunft in München um 17.40.

Reisebericht Lintongaufenthalt 2012-08-19 bis 2012-09-24 (Linda Zachmann, Charlotte Höpker)

Montag, 2012-08-20

Flug von München (2012-08-19; 14.15 Uhr) über Peking nach Xi'an, Ankunft: 2012-08-20; 11.00 Uhr, Abholung durch Li Bin vom Flughafen, Fahrt ins Huaqing Aegean International Hotel nach Lintong; Mittagessen im Hotel (Li Bin, Fahrer Wang Qiang, Zachmann, Höpker); Nachmittag zur freien Verfügung

Dienstag, 2012-08-21

Vormittags: Besprechung mit Ruppert Utz (letzter Tag), Rong Bo und Li Bin.

Li Bin erhält den Auftrag alle 2 Wochen den Grundwasserspiegel an Messpunkt B1, B2, und im Brunnen zu messen und die Ergebnisse an Ruppert Utz schicken.

Besichtigung der Grube 2 (Li Bin, Utz, Mr. Yang (Archäologe), Zachmann, Höpker), letzte Messungen der Erdfeuchte von Ruppert Utz und Einweisung Li Bin in die Grundwasserspiegelmessung.

Mittagessen in Museum (Li Bin, Rong Bo, Ruppert Utz, Mrs. Yang, Zachmann, Höpker)



Nachmittag: Besichtigung der Akrobatengrube K9901 und des „gläsernen“ Workshops (auf der Abb. rechts oben). Nicht einsehbar ist ein dazwischen gelagerter Raum, in dem die Fragmente nach Gruppen gelagert sind. Es stellt sich trotz der bisherigen Planung heraus, dass keine passenden Terrakottabruchstücke einer Figur zum Kleben vorhanden sind.

Bei der anschließenden Besprechung (Rong Bo, Xia Yin, Ruppert Utz, Zachmann, Höpker) werden Ruppert Utzs Anliegen (benötigte Daten bis nächstes Jahr zur Projektabschluss) geklärt und eine Besprechung für die Lösung des Klebproblems für Mittwochmorgen vereinbart.

Abendessen im Museum mit Li Bin und Xia Yin.

Mittwoch, 2012-08-22

Vormittags Besprechung mit Rong Bo, Zhou Tie, Xia Yin, Frau Zachmann und Frau Höpker:

Die PowerPoint Präsentation von Frau Zachmann soll den Stand der Dinge und die Planung der ersten Woche zeigen. Außerdem sollen die mitgebrachten Arbeitsmaterialien vorgestellt werden (Vakuum Kissen der Firma Polypad, Zwingen [in China sind inzwischen Plastikmodelle verfügbar], Klebstoffe). Aufgrund des großen Interesses an der Funktion des Vakuumkissens wird der Vortrag vorzeitig beendet.

Geplant für den Aufenthalt ist nun von dt. Seite:

- die Klebung einer Figur aus Grube Nr. 1 statt aus der Akrobatengrube (dafür muss eine schriftliche Genehmigung beantragt werden)
- Ansetzen von Primern und Klebstoffen in verschiedenen Konzentrationen; Xia Yin hat vor Originale als Testkörper zu besorgen, die auch passend zugesägt werden sollen.
Evtl. zusätzlich messbar: Schichtdicke der Klebstoffe durch Zusammenkleben der Prüfkörper

Von chinesischer Seite zusätzlich:

- Herstellung von mit Farbstoffen versetzten Primern, um die Eindringtiefe in die Terrakotta zu bestimmen
- Zugfestigkeitsmessungen in der Universität

Allerdings können von den Chinesen keine passenden Prüfkörper während des Aufenthalts besorgt werden, so dass auch keine Zugfestigkeitsmessungen vorbereitet werden können. Die Erlaubnis für die Klebung des Kriegers T23G10-26 wird von Zhou Tie nach einer Woche erteilt und soll im Workshop stattfinden, wo die Figur auch gelagert ist.

Nachmittags findet eine erste Besichtigung der Grube 1 bei Wang Dongfang mit Li Bin statt, wo im letzten Monat 2 Figuren fertiggestellt wurden, seit dem letzten Jahr 2011 24 Figuren. Es wird die aktuelle Klebemethode besprochen und geplant bei der Klebung der bereits bis zum Rockansatz geklebten Figur in der Grube zusehen zu

können. Außerdem werden die Arbeitsbereiche der Archäologen besichtigt, in dem die Figuren momentan aufgestellt sind.

Donnerstag 2012-08-23

Die Fragmente, die heute zusammen geklebt werden sollten, sind bei Ankunft in der Grube 1 bereits geklebt. Aufgrund der Aushärtungszeit des chinesischen Epoxidharzes wird die Klebung des nächsten „Rings“ für den Nachmittag festgesetzt.

Es wird eine Liste für das Probenmaterial zur Eindringtiefe für Xia Yin erstellt, damit er diese von Zhou Tie genehmigen lassen kann. Zudem ein Plan für Zhou Tie, in dem beschrieben wird, wie an der Figur mit welchem Material geklebt werden soll (Verwendung Mowital oder Epoxidharz etc.).



In den langen Mittagspausen werden in den nächsten Wochen Fotos sortiert, eine Fotoliste von Frau Höpker erstellt und weiteres Vorgehen geplant.

Nachmittags erscheint ein Fernseheteam aus Shanghai (Shanghai media group), das ein Interview und anschließend Aufnahmen in Grube 1 beim Planen der Klebung machen möchte. Aufgrund der Dauer wird das Kleben des nächsten Ringes auf den nächsten Tag nachmittags verschoben, da vormittags eine Team-Wochenbesprechung der Mitarbeiter stattfindet.

Freitag 2012-08-24

Eine Besprechung mit Xia Yin klärt Fragen zu

- alten Dokumentationen/Berichten, die als pdf-Dateien erhalten werden
- Brenntemperaturen und Zugfestigkeitsmesswerte (neue Untersuchungen an Originalterrakotta werden aufgrund der Materialzerstörung nicht veröffentlicht)

Nachmittags wird in Grube 1 die Klebemethode der Chinesen angesehen, fotografiert und diskutiert.

Samstag 2012-08-25



Fahrt nach Xi'an mit dem Bus: Treffen mit Jan Min vom Technischen Zentrum sowie Catharina Blänsdorf, Stefan Demeter und Daniel Scherzer. Gemeinsamer Ausflug nach Han Yang Ling, 20km von Xi'an entfernt. Besuch des vollständig verglasten Untergrundmuseum mit den Gruben, dem Mausoleum des Liu Qi (Han Dynastie), des angeschlossenen Museums mit der „kleinen Terrakottaarmee“ und des Südtores. Mittagsessen im Restaurant auf dem Weg nach Mao Ling.

Danach Besuch der Grabanlage Mao Ling des Kaisers Liu Che und des angeschlossenen Museums: Highlights sind die Steinskulpturen (nationales Kulturgut, Foto).

Abendessenseinladung in Xi'an mit zwei Freunden von Xia Jin auf dem wiederaufgebauten Han-zeitlichen Marktplatz in einem „bayerischen“ Lokal (Bierzapfsäulen) mit anschließendem Tanz. Übernachtung im Hotel in Xi'an.

Sonntag 2012-08-26

Sightseeing in Xi'an (Demeter, Scherzer, Zachmann, Höpker): Trommelturm und muslimisches Viertel, Frau Blänsdorf arbeitet im Hotel. Mittagessen im muslimischen Viertel. Abends Rückfahrt nach Lintong per Bus.

Montag 2012-08-27

Im Labor: Abwiegen und Beschriftung für sämtliche Klebstoffe (Gläser müssen erst bestellt werden); Nochmaliges Erstellen einer Besorgungsliste für die Chinesen, da auch Pinsel und anderes Werkzeug fehlen. Organisation der nötigen Lösungsmittel.

Nach dem Mittagessen werden moderne Ziegel (22cm x 11cm x 6cm) als Terrakotta-Testkörper ausgewählt, die in der Struktur grob an die Originale heranreichen: Anzeichnen der Schnitte (Planung die Ziegel Dienstag zu zersägen: mit Wang Weifang und Wang Dongfang)

Dienstag 2012-08-28

Die Versuche die Ziegel in passende Prüfkörper zu zersägen, konnten nach größerem Aufwand nicht durchgeführt werden-> Es wird nachgefragt, ob die Ziegel in einer Firma gesägt werden können. Dies stellt sich später als nicht möglich heraus. Anfrage ob vom kleineren und leichter zu sägenden Probematerial, das Rong Bo und Li Bin mit nach München gebracht haben, noch Reste vorhanden sind: ja, 2 Stück, die aber erst in der 3ten Woche im Labor aufgefunden werden.

Nachmittags wird in Werkstatt verbracht. Li Bin erklärt die offiziellen, im Museum entwickelten Dokumentations-Standards. Es werden die sehr gut gemachten Dokumentationsfotos der zu klebenden Figur und ein Informationsblatt (auf Chinesisch) für das chinesische Epoxidharz an Frau Zachmann übergeben; Absprache: Ab Mittwochmorgen können die Fragmente der ausgewählten Figur zusammen mit Wang Dongfeng und den Arbeitern aus Grube 1 trocken zusammengefügt werden.

Frau Zachmann übersetzt mit Li Bin das chinesische, leider wenig aussagekräftige Informationsblatt zum All-purpose adhesive (Epoxidharz); es gibt keine weiteren Informationen der Firmenseite im Internet. Frau Höpker führt die Fotoliste und den Arbeitsbericht weiter.

Mittwoch 2012-08-29

Vormittag: Einrichten des Arbeitsplatzes für die zu klebende Figur G10:26 aus dem Sektor T23 aus 84 Fragmenten und mehreren hundert undokumentierten Reststücken.

Begonnen werden soll mit dem trocknen Zusammenbau der Torsofragmente ab den Oberschenkelstümpfen.

Nach dem Essen Diskussion mit Li Bin zur Notwendigkeit des Einsatzes eines geeigneten Primers und Überlegungen zum Einsatz des Vakuumpads um den Innenraum zu füllen und nach außen zu stabilisieren.

Donnerstag 2012-08-30

Fortsetzen des Zusammensuchens und Zusammenfügens des Torso mit Schultern und einer allseitigen Fotodokumentation.

Freitag 2012-08-31

9.30: Besuch von Stefan Demeter, Daniel Scherzer und Frau Gao Yeng (Zentrum) aus Shuiluan: Besichtigung der Acrobaten- (Foto) und der Beamtengrube (die aufgrund des starken Regens große Pfützen aufweisen: undichtes Dach), der Workshops mit dem momentanen Arbeitsplatz und der zu klebenden Figur.

Danach gemeinsames Mittagessen in der Kantine. Anschließend 1h freie Zeit, um die Grube 1,2 und 3 und das Museum anzusehen. Um 13.15 Abfahrt der Gäste zum Flughafen.

Am Nachmittag werden höhere Mowitalkonzentrationen (15-17%ig) angesetzt, da sich in Versuchen an einem gebrochenen Prüfkörper 10% als zu niedrig erwiesen hat. In der verbleibenden Stunde wird eine Zuordnung kleiner Teile zur Figur versucht, bzw. die Kleinsteile vorsortiert. Ein Teil davon muss noch gereinigt werden.

Samstag 2012-09-01

Ausruhen und Nachholen von Arbeiten (Schadenskartierung für die dt. Seite). Anhaltender Regen.

Sonntag 2012-09-02

10.00: Fahrt mit dem Bus nach Xi'an: Einladung zu Li Bin und seiner Frau Mang Mang nach Hause zum Mittagessen mit anschließendem Sightseeing.

Montag 2012-09-03

Ansatz von Paraloid B44 und Mowital B30H in höheren Konzentrationen. Einige unnummerierte Fragmente können dem zu klebenden Abschnitt (1ter Ring) zugeordnet werden. Eine Liste mit neu gefundenen und neu nummerierten Fragmenten wird angelegt. Dokumentation der Klebstoffe und Primer auf einer Durchzeichnung (rot für Mowital B30H, blau für chinesisches Epoxidharz). Anschließend wird der Torso auseinandergelöst und die einzelnen Nummern der Fragmente in die Dokumentation eingezeichnet.

Dokumentation des Kopfes durch Zusammensetzen auf dem Vakkumpad. Mit Mowital B30H können die kleinen Fragmente des ersten Rings eingeklebt werden.

Dienstag 2012-09-04

Überlegungen zum Markieren für die Bruchkanten auf denen nicht geklebt werden darf, bzw. für Ausbrüche. Anschließend folgt die Klebung der ersten 3 Teile (1ter Ring).

Aufgrund des Aushärtens wird am Nachmittag nach Füllstoffen und Verdickungsmaterialien geforscht (Materialschrank, mitgebrachte Füllstoffe), um die nächsten schlecht sitzenden Fragmente besser kleben zu können. Wang Dongfang besorgt für den nächsten Tag braunes Terrakottamehl, das normalerweise unter das Epoxid gemischt wird. Außerdem werden zusammen Versuche mit Mischungen von Mowital mit Marmormehl feinst, Holzglaskügelchen, Arbocell und Aerosil 200 an den in Stücken gebrochenen Probekörpern getestet. In Zukunft wird Aerosil 200 eingesetzt

Mittwoch 2012-09-05

Am Vormittag Zuordnen von Kleinteilen, Festigen eines Oberflächenfragments und Vorbereiten kleiner Klebungen mit Mowital B30H. Es wird erklärt wie eine 25%ige Mowital-Lösung am besten anzusetzen (siehe: „Use of Mowital B30H“)

Am Nachmittag Reversibilitätsversuche und Zuarbeiten eines Scherbens für bessere Passgenauigkeit.

Donnerstag 2012-09-06

Kleben des zugearbeiteten Fragments und des Nachbarstückes mit Mowital B30H.

Am Nachmittag: Unterstützung von Frau Zachmann und Frau Höpker bei der fälligen zweiwöchigen Messung von Li Bin und Prof. Yang (Archäologe) in Rupert Uts Auftrag in Grube 2.

Danach bleibt noch Zeit durch Frau Höpker weitere Kleinteile zuzuordnen und durch Frau Zachmann die beiden Tu-Schränke auszuräumen (2 Dosen Cyclododecan und eine älteres Mowital werden an die Chinesen zum baldigen Verbrauch gegeben, Reste von Frau Blänsdorfs Materialien werden mit nach Deutschland genommen)

Freitag 2012-09-07

Ansetzen einer neue Menge mit Aerosil verdicktem Mowital B30H. Kleben und Einspannen der übrigen, bereits gepimten Ringteile mit Mowital B30H. Fotografieren des geklebten Zustandes.

Am Nachmittag Zuordnen von kleineren und größeren Fragmenten

Samstag 2012-09-08

Regenwetter und Magenverstimmung zwingen im Hotel zu bleiben

Sonntag 2012-09-09

Regenwetter und Magenverstimmung zwingen im Hotel zu bleiben

Montag 2012-09-10

Besuch durch eine örtliche Journalistin, die auch den eingespannten Torso fotografiert.

Zusammensetzen des nächsten, sehr schlecht passenden Rings mit anschließender Suche nach passenden Fragmenten. Allerdings können nur 3 Außenflächenstücke zugeordnet werden, deshalb wird mit Lan Desheng und Li Bin diskutiert, ob die Archäologen übrige Fragmente/Bruchstücke nebenliegender Figuren zum Ausprobieren bringen könnten. Problem: Die Archäologen geben ausgewählte Figuren, die sie bereits grob einmal zusammengesetzt haben vor der Reinigung mit all ihren Teilstücken bei den Restauratoren ab. Mit diesen Teilen müssen die Restauratoren auskommen, auch wenn etwas fehlt. Oft finden sich auch wirklich ganze Köpfe oder Oberkörper nicht, wie Beispiele (alle aus T23G9 und G10) zeigen. Trotzdem soll es mit Photographien der Fehlstellen versucht werden.

Bis dahin wird mit dem Zusammensetzten des Kopfes von der Schädeldecke her begonnen. Das Vakuumkissen dient als Unterlage.

Am Nachmittag kann das Haupt des Kopfes als erster Ring geklebt, mit einem flexiblen Gurt fixiert und im Vakuumpad über Nacht trocknen gelassen werden, wobei die nachfolgenden Scherben auch mitaufgesetzt und fixiert werden.

Dienstag 2012-09-11

Besuch des Technischen Zentrums in Xi'an: Führung durch die Werkstätten und Labore mit der Biologin Dr. Wang sowie dem Fotografen. Dr. Ma erklärt die Auswertungen von Rissmessungen an Steinskulpturen und das Thermolumineszenzgerät. In Labor für Steinuntersuchungen findet sich ein Feinstrahlgerät, wie es auch im Museum in Lintong fertig ausgerüstet werden könnte.

Anschließendes Essen mit Li Bin, seiner Frau Mangmang, Mr. Wang in der Nähe des Lantianmarktes.

Am Nachmittag: Besuch des Archäologischen Instituts mit Führung durch die Werkstätten: Metallrestaurierung mit Frau Huang und Textilrestaurierung mit Frau Zhang Jing. Die gut ausgestatteten Räume und die Aufbewahrung beeindrucken.

Momentan befinden sich auch die deutschen Kollegen aus dem Römisch Germanischen Zentralmuseum für drei Wochen dort (Sonja Filip, Dr. Florian Ströbele).

Rückfahrt nach Lintong um 17.00 Uhr.

Mittwoch 2012-09-11



Besuch der Restaurierungswerkstätten und des Depots im Xianyang Denkmalschutzzentrum (Xianyangshi wenwu baohu zhongxin/咸阳市文物保护中心) in Xianyang City, 24km von Xi'an entfernt: Führung durch Prof. Yang Jing Long in der Stein- und Wandmalereiwerkstatt. Zu sehen sind mit Epoxidharz gefestigte Wandmalereifragmente der Tangzeit und Steinskulpturen mit Fassungsresten.

Im Depot finden sich Metall- und Keramik Kunstwerke, unter anderem Eisvogelschmuck, im Garten eine große Sammlung Pfähle mit Fabelwesen.

Mittagessen mit Prof. Ge Hong des Xianyang Denkmalschutzzentrums und dem Restaurator Prof. Ang Jing Long, sowie einem weiteren Restaurator. Da sie Mowital B30H als Klebstoff für ihre vielen Terrakottafiguren einsetzen könnten, wird eine Probemenge und eine Anleitung zur Herstellung durch Li Bin an Prof. Ge Hong geschickt.



Nach einem Stopp an einem Fischersee besuchen wir das Zhaoling Museum, in dessen 2 Ausstellungshallen die Funde der Nebengräber ausgestellt sind: bemalte Terrakottafiguren mit teilweiße Silbergoldauflagen sowie 42 steinerne Erinnerungstafeln.

Nach dem Museum die Bergfahrt zum Zhaoling, Mausoleum des Li Shimin (398- Tang-Dynastie) selbst, Aufstieg bis zum Gipfel. 18.00 Rückfahrt nach Lintong.

Donnerstag 2012-09-13

Morgens findet eine Besprechung mit Wahlen für die Mitarbeiter des Museums statt.

In der Werkstatt werden die Gesichtsteile am Kopf mit Mowital B30H geklebt. Nach der Mitteilung, dass es von den Archäologen keine weiteren Bruchstücke zu dieser Figur geben wird, kann die Klebung am Torso fortgesetzt werden. Zuvor sollten die Teile noch durch Mitarbeiter vermessen und gewogen werden (Ms. Kong). Beginn des Primers der Teile am Torso für den nächsten Ring.

Frau Höpker setzte neues Mowital B30H 10%ig als Primer an.

Rerestaurierung eines mit Sekundenkleber schief eingeklebten Fragments. Danach filmt erneut das Shanghaier Filmteam vom 2012-08-23 während des weiteren Nachmittags die Arbeiten, auch Lan desheng, der etwas zur Festigung der Malschicht erklärt.

Die Klebung des Kopfs mitsamt dem Hals wurde am Nachmittag vollendet. Vor dem Abendessen wurde noch ein Interview mit Frau Zachmann gedreht.

Freitag 2012-09-14

Weitere kleine Teile, die zugeordnet werden konnten, werden eingeklebt. Der Kopf wird von allen Seiten fotografiert.

Die Besprechung mit Lan Desheng führt dazu, dass der Torso nicht "höher" weiter geklebt werden soll, damit er nicht zu schwer ist, um ihn auf die Füße zu heben bzw. zu kleben. Am besten sollte mit der Bodenplatte und den Beinen/Füßen weitergemacht werden. Es wurde diskutiert, ob die Bodenplatte und die Füße mit dem deutschen

Araldite statt dem chinesischen Epoxidharz geklebt werden. Die Entscheidung wird von Xia Yin auf Montag verschoben.

Samstag 2012-9-15

Um 7 Uhr Abholung vom Hotel von Mr. Wang: Wandertour auf einen Berg des Niubeiliang National Forest Parks, ein Naturreservat im Osten der Qinling Mountains der Provinz Shaanxi, in dem es noch wilde Tiere gibt und das als Wasservorsorge für Xi'an Stadt gilt mit Picknick und frisch gekochtem Essen der Chinesen auf der Bergspitze. (Zachmann, Höpker, Li Bin, Mr. Wang)

18 Uhr: Rückfahrt

Sonntag 2012-09-16

12 Uhr: Bus nach Xi'an: Besuch des Historischen Museums in Xi'an (Zachmann, Höpker).

Rückfahrt um 19.15 Uhr; zuvor Fußmarsch durch die gesamte Innenstadt, da aufgrund der Unruhen wegen den Dyouan Inseln kein Bus mehr zum Bahnhof fährt.

Montag 2012-09-17

Aufgrund der Nachricht die Bodenplatte mit Araldite kleben zu können, wird diese vorbereitet, gereinigt und geprint.

Kleben der Bodenplatte mit Araldite AY 103-1.

Die beiden Beine werden bearbeitet, dabei stellt sich heraus, dass ein Beinabschnitt zu einer anderen Figur gehören muss, es können Bruchstücke zugeordnet werden. Bei einem der Beine stellt sich heraus, dass zu viel Material fehlt, so dass die Stelle verstärkt bzw. gefüllt werden muss. Normalerweise wird das (was oft vorkommt) laut der Restauratoren mit Gips gemacht. Als erstes wird die entstehungszeitliche Klebung, die eine passgenaue Klebung verhindert restauriert.

Li Bin erhält alle Arbeitsfotos, da für die Regierung in Peking ein Kurzbericht abgegeben werden muss.

Dienstag, 18-9-2012

Der Torso wird flach auf eine passend gearbeitete Unterlage gelegt, wozu insgesamt 4 Leute gebraucht werden. Nun können die Füße angepasst werden.

Eine Problemfindung für den ausgebrochenen Fuß ist in diesem Aufenthalt nicht mehr möglich, auch aufgrund zu langer Wartezeiten bei mehrmaligem Einbringen eines Füllstoffs. Zusammen wird die Entscheidung getroffen, die Füllung in einem zweiten Aufenthalt vorzunehmen, damit können auch noch Versuche in München vorgenommen und Alternativen herausgefunden werden. Für die Bearbeitung in Deutschland wird eine genaue Fotodokumentation erstellt.

Nachmittags gemeinsame Messung mit Li Bin in der Grube 2. Danach nochmalige Klebung des Fußes.

Mittwoch, 19-9-2012

Vorläufiger Test mit Gipsfüllungen an einem Prüfkörper. Reinigung der Fußteile. Einsortieren aller kleinen Bruchstücke in kleinere Plastikboxen nach ihrem strukturellen Aussehen.

Vorbereiten und Beschriften von 5 großen Plastikkisten, um die geklebten und restlichen Fragmente bis zum nächsten Aufenthalt aufzubewahren.

Donnerstag 2012-09-20

Fertigstellung (Versiegeln) der 5 Aufbewahrungskisten für das Depot. Aufräumen des Labors und der Werkstatt.

Mittagessen mit Zhou Tie, Xia Yin und Li Bin zusammen.

Eigentlich sollte morgens der Transport des Torso und der Kisten ins Depot erfolgen, danach soll die bereits länger angesetzte Besprechung stattfinden. Aufgrund des fehlenden zweiten Depotschlüssels und des Nichterscheins der Verantwortlichen ist bis 16.00 nicht klar, ob die Figur in der Werkstatt liegen bleiben muss. Um kurz vor 17.00 erfolgt der Transport, die Figur wird statt Umliegen auf das Vakuumpad auf dem bereits vorbereiteten weißen Ethafoamplatten belassen und mit diesen und zusätzlich einem grünen Strick um den Rumpf (an der stabilsten Stelle) auf einen Wagen gehievt (4 Helfer aus Grube 1). Im Depot gibt es einen Raum für unfertige Figuren, in dem sowohl die Kisten als auch die Figur im Liegen mit Seidenpapier Abdeckung gelagert wird.

Eine Besprechung findet nur noch mit Li Bin statt: Klären der Aufgaben und des nächsten Aufenthaltes: Li Bin möchte die Vorteile von Paraloid B44 zu Paraloid B72 als Primer testen.
Letztes reichliches Abendessen mit Li Bin in der Mensa.

Freitag 2012-09-21



Abholung vom Hotel: 7.00. Besuch der Tagung in Xi'an: *International Conference on Modern Chemical Technology in the Protection of Cultural Heritage*, ausgerichtet von der Jiaotong Universität im Nan Yang Hotel (siehe Tagungsunterlagen), unterstützt von Prof. Stefan Simon vom Rathgen Forschungslabor Berlin, Prof. Christoph Herm von der Akademie der bildenden Künste Dresden und Prof. Erwin Emmerling. Anwesend ist auch Zhou Tie.

Mittags Rückeinladung im Namen des Archäologischen Instituts zum Mittagessen mit der

Übersetzerin Frau Hou und dem Kollegen Dr. Florian Ströbele.

Samstag 2012-09-22

Besuch der Tagung in Xi'an mit Mittagessen im dortigen Hotel, 16.00 Heimfahrt nach Lintong.

Sonntag 2012-09-23

Letzter Ausflug nach Xi'an zum Shopping und Sightseeing, Besuch der Moschee im Muslimischen Viertel. Letztes reichliches, gemeinsames Abendessen mit Li Bin zusammen im Hotel in Lintong.

Montag 2012-09-24

8.00 Abholung vom Hotel durch Mr. Wang und Li Bin, Abflug um 10.20 in Xi'an, Ankunft in Frankfurt um 18.20 und Heimfahrt mit dem Zug nach München Hauptbahnhof: Ankunft: 0.30.

Reisebericht Lintongaufenthalt 2013-04-1 bis 2013-04-26 (Linda Zachmann, Charlotte Höpker)

Montag, Dienstag, 2013-04-1/2

Flug von München (14.15 Uhr) über Peking nach Xi'an, Ankunft: 11.00 Uhr,
Abholung durch Li Bin vom Flughafen, Fahrt ins Huaqing Aegean International Hotel nach Lintong; Mittagessen im
Hotel (Li Bin, Fahrer Wang Qiang, Zachmann, Höpker); Nachmittag zur freien Verfügung

Mittwoch, 2013-04-3

Vormittags: Besprechung mit Xia Yin und Li Bin.
Einrichten des Arbeitsplatzes.

Donnerstag 2013-04-4

Feiertag in China, Spaziergang durch Lintong, Abendessen im Hotel, statt dessen Arbeiten am Samstag.

Freitag 2013-04-5

Feiertag in China, Supermarktbesuch, Vorbereitung im Hotel (Datenblätter in Englisch, Bücherliste für Xia Yin,
Gastgeschenke verpacken), Protokoll für Li Bin der Besprechungen in Englisch

Samstag 2013-04-6

In Lintong werden Füllungen laut Lan Desheng immer noch mit dem chin. Epoxidharz 合众 AAA 超能胶
(„Superglue AAA“), dass dem dt. Uhu plus endfest 300 entsprechen soll, mit verschiedenen Terrakottapulvern
(grau und rot) im Verhältnis 3:2 hergestellt.

Verschiedene Vorversuche zu Ergänzungsmassen für die Beinergänzung/füllung aus Mowital B30H, Araldite 2011
und Moltofil.

Zusätzlich müssen folgende Fragen für die weiteren Arbeiten geklärt werden:

- Verfügbarkeit von Balsaholz: kann durch Wang Dongfang besorgt werden
- Sollen die Löcher/fehlenden Stellen grundsätzlich gefüllt oder leer gelassen werden: Da weder
ästhetische noch konstruktive Notwendigkeit besteht, wird entschieden sie nicht zu füllen.
Ergänzungsmassen sollen statt dessen zusammen in Deutschland bei nächsten Besuch getestet werden
- Treffen mit Archäologen
- Zutritt zur Akrobatengrube klären (mit Kollegen von Li Bin)
- Auf Nachfrage stellt sich heraus, dass die Transportdokumentation von Terrakottafiguren ein DIN A4
großes Übergabeprotokoll ist, das fast keine Informationen enthält
- Es wird das Besprechungsprotokoll der Anfangssitzung und die Information „Use of MowitalB30H“ auch
zur Weitergabe übergeben. Ebenso Probemengen an Paraloid- und Mowitalpulver
- Bei den Arbeiten in Werkstätten und Gruben unterstützen uns die Arbeiter Liu Yuan, Wang Xiang, Yang
Zhen, Wang Ji sowie He Xiao Di beim Tragen, Reinigen, Fassungsfestigung und Erstellen von Hilfsmitteln

In Deutschland soll Literatur zu Ergänzungen für die Chinesen herausgesucht werden, für Xia Yin Literatur zur
Restaurierung von Keramik für die Erstellung eines Standartwerkes für Studenten

Sonntag 2013-04-7

Zwei Ergänzungen werden als konstruktiv tragende Teilstücke im Bein hergestellt.

Ein weiteres konstruktiv wichtiges Fragment wurde zugeordnet und macht eine der beiden Füllungen unnötig,
stattdessen soll eine zu gießende Füllung verwendet werden.

Die Füllungen sollen mit Paraloid B44, 15%ig in Aceton geprimed werden und je nachdem mit Araldit AY 103 oder
Mowital eingeklebt werden.

Außerdem werden Vortests mit dem Moltofil auf Hostaphan-Polyesterfolie vorgenommen, um die Verarbeitung
bei dem Klima und für die Füllungen einschätzen zu können.

Montag 2013-04-8

Weiterarbeit an den Beinen: Es werden zwei Beutel mit Kleinstfragmenten, die zu dieser Figur gehören gebracht,

ein Teil davon passt zu den breiten Rissen in den Füßen. Teilweise muss noch nachgereinigt werden, dadurch kann erst am nächsten Tag geklebt werden. Es werden genaue Fotodokumentationen vorgenommen. Außerdem wird festgelegt wo welcher Primer aufgetragen werden soll und entsprechend markiert.

Dienstag 2013-04-9

Die Beine werden nach dem Primern mit der Ergänzung aus Moltofil und den Kunststoffergänzungen gefüllt und in der richtigen Reihenfolge verklebt und eingespannt.

Gleichzeitig werden ein Teil der nachgereichten Kleinstfragmente bei der Bodenplatte zugeordnet und eingeklebt, dazu müssen allerdings zwei Fragmente um ca. 1 mm zugeschliffen werden, da sie sonst nicht nachträglich eingepasst werden können. Es wird entschieden für die 1-2 cm langen Fragmente die Bodenplatte nicht nochmals zu öffnen.

Mittwoch 2013-04-10

Nachreinigen und Dokumentation der geklebten Beine und Füße per Foto.

Einpassen der mit Fassung nachträglich gebrachten Fragmente an der Unterseite der Figur zwischen den Beinen. Die Beine und Unterseiten müssen vor dem Aufstellen noch geprimed werden.

Mit einiger logistischer Vorarbeit wird zusammen (4 Personen) der bisher liegende, trotzdem bereits sehr schwere Terrakottatorso in dem für ihm eingestellten Metallgestell mit Abpolsterungen und Bändern gesichert.

Donnerstag 2013-04-11

Heute soll der linke Fuß mit Araldite AY103 an den Körper geklebt werden. Die Klebestellen wurden bereits am Tag zuvor mit Primer Paraloid B44 15%ig behandelt, da es schwer ist von unten an die Fußstümpfe zu gelangen. Verschiedene Wagenheber werden probiert und mit passenden Zulagen versehen als Einspanneinrichtung zwischen Fuß und Boden getestet.

Das zweite Bein soll getrennt vom anderen angebracht werden, da ihre Positionen verschieden und nicht planparallel zum Boden sind.

Außerdem wurden die Fragmente der Schulterpartie und der Arme in ihrer zu klebenden Position auf dem Tisch bereitgelegt, so dass fehlende Teile ausgeschlossen werden konnten bzw. kleinere Lücken mit passenden kleinen Fragmenten zusammengefunden werden können.

Aufräumen der Werkstatt, da morgen Regierungsbesuch angekündigt wird. Aufbauen einer Absperrung um die Figur, die in der Raummitte positioniert ist.

Freitag 2013-04-12

Aufräumen der Werkstatt durch die Chinesen.

Am Körper der Terrakottafigur darf nicht gearbeitet werden, da die Figur dadurch zu sehr bewegt wird. Lediglich das Einkleben von kleineren Rückenteilen ist möglich.

An die Hand werden der Daumen und ein Finger angeklebt. Kontrolle des Armes im Ärmel. Einige Kleinteile werden mit einem Alkohol-Wassergemisch gereinigt. Die Füße und ihre Unterseiten werden vor dem Ankleben auf Risse und Farbfassung kartiert.

Am Nachmittag Besuch durch Delegation aus Beijing: Minister für Kunst und Wissenschaft.

Samstag 2013-04-13

Einladung zu Hochzeit von Li Bins Bruder mit über 300 Gästen in Xi'an, welche von 12.00 bis 14.00 dauert. Danach Besichtigung des Trommelturms und Shopping.

Sonntag 2013-04-14

Treffen mit Barbara (), die mit uns auf dem Lishan-Berg in Lintong wandert und den taoistischen Tempel zeigt.

Montag 2013-04-15

Kleben des zweiten, rechten Fußes an den Körper. Unterstützung des linken mit Holz und Ethafoam.

Testen der Armfragmente auf Passgenauigkeit. Trockenes Zusammensetzen Zurechtlegen der Reihenfolge für das Kleben. Primern der Armfragmente.

Dienstag 2013-04-16

Vormittags wird die Unterstützung unter der Figur entfernt und die Figur auf die Beine gestellt bzw. auf dünnes Ethafoam. Neubefestigung der Figur am Gestell.

Nachmittags werden die Armfragmente aufeinander geklebt und an den Arbeitstisch zum Aushärten eingespannt.

Mittwoch 2013-04-17

Vorbereiten der Klebung von Armen und Schultern. Versuch der Zuordnung von 7 Beuteln Kleinteilen unter 5cm, die von den Archäologen übergeben werden und nicht mehr nachvollziehbar ist, woher sie genau stammen.

Außerdem gibt es die Erlaubnis in Grube 1 nach passenden Scherben zu suchen. Vom Sektor G10 sind mehrere Kisten übrig gebliebener Fragmente von 0,5mm bis 30cm zu sichten. Um die fehlenden Stücke zuordnen zu können, wurden Fotos der Fehlstellen erstellt, ausgedruckt und mit in die Grube genommen.

Bei der Suche wird systematisch vorgegangen, die größeren Fragmente brauchen nur gesichtet werden (z.B. 5 Hände, spezielle Teilstücke mit Fassung usw.). Die restlichen Fragmente werden systematisch nach Oberflächen, Größe oder erkennbarer Partie (z.B. Fußteile, Haarteile, Nähte, Finger, Außenseiten usw.) auf Ethafoamplatten sichtbar ausgelegt. Ca. 50 Schleifen können teilweise anhand der Bilder ausgeschlossen werden, nur ein kleiner Teil wird zum Testen mitgenommen. In der Grube 1 können insgesamt 11 wichtige Fragmente gefunden werden, die tatsächlich zur Figur gehören, was beweist wie wichtig diese Maßnahme auch bei allen anderen Figuren wäre.

Donnerstag 2013-04-18

Morgens findet eine Diskussion um die Bodenplatte statt: Die Restauratoren können sich nicht für oder gegen das Kleben der Füße auf die Bodenplatte einigen. Von deutscher Seite werden die Vor- und Nachteile vorgebracht. Da die Figur nach Fertigstellung in der Grube 1 aufgestellt werden soll und somit erst mal nicht weiter bewegt werden. Oft werden die Figuren aber beim Umsetzen unter dem Rock mit Seilen versetzt, so dass die Bodenplatte an den Füßen halten muss. Besser wäre eine Unterstützung von unten: Als zukünftige Möglichkeit wurde vorgeschlagen, eine Metallplatte mit zwei Ösen an zwei Seiten herzustellen, durch die dieselben Bänder bei Bedarf gezogen werden können und mit der die Figur ansonsten berührungsfrei versetzt werden kann, die Platte kann mit einem weniger starken Klebstoff geklebt werden, bzw. eine Sollbruchstelle (bei z.B. verkante) besitzen, so dass sie abfällt, bevor die Beine brechen, was der kompliziertere Bruch wäre und mehr Schaden anrichtet.

Da die Platte an den Seiten höher ist als in der Mitte und die Fußunterseiten auch nicht perfekt plan sind, sollen sie unterlegt werden. Außerdem steht die Figur auf ihren Beinen so, dass sie sich stark zur ihrer linken Seite neigt. Wang Dongfang hat Balsaholzplatten 2mm und 1,5mm dick besorgt. Diese können anhand der aufgenommenen Fußgrundrisse kleiner ausgeschnitten werden und sollen die kleinen Unebenheiten ausgleichen, ein zweiter noch kleinerer Zuschnitt soll die stärker zu Mitte hin abfallende Schräge ausgleichen.

Li Bin misst am Nachmittag die Werte in Grube Nr. 1.

Freitag 2013-04-19

Die Ethafoamplatte unter den Füßen der Figur wird entfernt und anhand der Tiefe und Umrisse der Abdrücke Balsaholzunterlagen zugeschnitten und perforiert. Je nach Höhenprofil wird noch eine weitere Schicht aufgebaut/verklebt. Für die genaue Anpassung und das spätere Absetzen auf die Bodenplatte wird die Figur nochmals mit 4 Personen in ihr Gestell gehoben und stabilisiert. Auch die Bodenplatte wird nun im richtigen Abstand der Füße anhand der Balsaholzschablonen vorgezeichnet und geprint.

Bevor die vorbereitete Platte an die Füße geklebt werden kann, gibt es eine Diskussion auf welche Weise dies passieren soll (Gabelstapler und Anpressen von unten; Absetzen auf die Platte, die auf dem Gabelstapler liegt, damit sie noch anders positioniert werden kann: zu gefährlich, außerdem ist der Abstand zwischen Füßen und Boden zu gering). Zum Schluss wird eine neue Lösung mit einem umgebauten Wagenheber nach einer Idee von Wang Dongfang entwickelt.

Samstag 2013-04-20

Der rechte Arm mit den entsprechenden Fragmenten der Schulter und des Halsausschnittes, die gleichzeitig eingefügt werden müssen, werden mit unterschiedlichen Klebstoffen zu dritt zusammengeklebt. Dabei muss ständig einer bereits geklebte Fragmente fixieren, während die anderen fehlende Teile einstreichen. Als Fixierung und Unterstützung des Armes wurde bereits am Tag zuvor ein passender Holz-T-Träger mit weicher Polsterung zugearbeitet.

Abends: Abflug Charlotte Höpkers nach Peking/München

Sonntag 2013-04-21

Besuch von Hou Gailing in Xi'an und Treffen mit Miriam Schanz und Judith Regensburger

Montag 2013-04-22

Die letzten Klebungen kleiner Fragmente am Panzer werden vorgenommen.

Außerdem wird das größere Fragment (ca. 2 x 5 x 12cm), welches an die linke Hüfte unter dem Arm gehört und nachträglich in der Grube gefunden wurde durch Schleifen in seine Position gebracht. Ein Wiederanlösen der umgebenden Fragmente könnte praktisch, aber nicht mehr zu diesem Zeitpunkt und an dieser Stelle durchgeführt werden.

Die inzwischen gereinigte Hand wird durch Lan Desheng an einen chinesischen Arbeiter zu Festigung abgegeben, da sie in diesem Fall sehr gut erhaltene Fassung aufweist, die dringend gefestigt werden muss. Sie wird mit PEG 30% gefestigt und mit MC 76 10% immer wieder eingestrichen, das aktuelle Vorgehen für Fassungsfestigung wie berichtet wird.

Dienstag 2013-04-23

Die Klebungen des Arms und der Beine werden kontrolliert, teilweise können Befestigungen gelöst werden, um an den frei werdenden Stellen noch fehlende Fragmente anzukleben, teilweise bleiben die Sicherungen noch einen weiteren Tag an der Figur.

Obwohl die Hand aufgrund der Festigungsmaßnahmen noch nicht endgültig durchgehärtet ist, werden die Finger angeklebt, um am nächsten Tag an die Figur geklebt zu werden.

Aufgrund eines Besuches wird die Grube 1,2 und 3 besichtigt. Nachmittags wird zusammen mit dem Archäologen Jiang Wenxiao die Beamtengrube K0006 und Akrobatengrube K9901 besucht.

Mittwoch 2013-04-24

Morgens werden die letzten Nähte am Körper angeklebt, gereinigt und fotografiert. Die linke Hand wird mit zwei Gurten wie bei einer medizinischen Armschlinge unter Spannung gesetzt und angeklebt.

Beim Mittagessen mit Lan Desheng und Rong Bo wird berichtet, dass in der Akrobatengrube zwei Akrobaten fast fertig ausgegraben und die Fragmente so vollständig sind, dass sie im Sommer traditionell geklebt werden sollen (dh. kleine Teile mit Mowital B30H)

Am Nachmittag weitere Stellen nachgereinigt und nochmal letzte Zuordnungsversuche von Kleinstfragmenten unternommen. Danach wird entschieden, welche restlichen Klebematerialien in der Werkstatt verbleiben (Mowital B30H, Araldite AY103, Paraloid B44 und 72) und bis wann sie verwendet werden sollten. Letzte Anweisungen wie die Figur in der Werkstatt aufbewahrt werden sollte (Abdeckung vor Schmutz z.B. durch Seidenpapier; Sicherung vor Stößen durch bessere Standortwahl und kein Einpacken in Frischhaltefolie).

Donnerstag 2013-04-25

Am letzten Tag wird noch einmal die linke Hand kontrolliert, bevor die Schlinge zum Anfertigen abschließender Dokumentations- und Gruppenfotos abgenommen wird. Danach wird sie auch aus Sicherheitsgründen, weil die Hand am weitesten vom Körper absteht und sich in der Mitte des Raumes befindet, wieder angelegt. Sie sollte auch da bleiben wenn die Figur an ihren neuen Standort (wahrscheinlich Grube 1) versetzt wird.

Außerdem werden mögliche weitere Themen angesprochen an denen in China weitergeforscht werden kann.

Freitag 2013-04-26

Abflug nach Shanghai 12.00

Samstag 2013-5-3

Ankunft in München

Report

Project: Lintong, Museum of the Terracotta Army,
Investigations and protection measures for the polychrome
terracotta fragments, embedded in the drying earth of pit II

Titel: Continuation of the investigations on the drying kinetics and the
possibilities for remoistening - investigations for the development
of an integral risk mapping



Meinhardt 2011

Place	Lintong, Peoples Republic of China
Principal:	Technical University, Munich, Lehrstuhl für Restaurierung, China Projekt
Study time:	2011-2013
Laboratory studies:	January - february 2011
Field season:	March 2011
Authors:	Dr. Rupert Utz Dipl.-Geoök. Clara Mödl Dipl.-Geogr. Ulrich Meinhardt
Report delivery:	July 2011

Dedication:

Principal (2-fold)
ProDenkmal GmbH

Contents:

1. Introduction

The subproject “Investigations and protection measures for the embedded polychrome terracotta fragments” of the Lintong project is interested in the conservation of a certain moisture in the soil. Moisture ascertains soil structure, and hence, the coloured surfaces on the figures hidden in the loamy soil may be preserved. As a part of the working schedule for this subproject, preliminary tests were to be carried out concerning the measurement of the water content on the Lintong excavation site without any disturbance of the soil surface. For this, test specimens were produced, and a choice of non destructive measurement equipment was tested.

In a second step, soil moisture was measured on the excavation site in March 2011. Then, also the moisture data mined by three sensors equipped with data loggers were collected. These sensors were installed on the site in august 2008 by the Chinese German cooperation team

2. Laboratory pre-tests

2.1. Production of test specimens

Twenty test specimens were produced using a local loess loam from Bavaria, dried to a moisture of about 13%. The loam was homogenized and stones >1cm were removed by hand. Estimating a bulk density of the Lintong loam to 1,6 g/cm³, 1120 g of soil were weighed and stamped into a 700 ml plastic container. To ensure constant density throughout each specimen, soil was filled in four steps into the container. The specimens were dried in a 60°C oven to achieve a test series with moisture between 0 and 13%. After drying, specimens were weighed, named and packed into plastic bags. All specimens were stored in exsiccators at 20°C in the laboratory. Before use, the specimens were weighed again, because drying effects could not fully be prohibited.

2.2. Choice of test equipment

The first and most important precondition for all equipment was a non-destructive testing procedure. Second, it should be easy to handle and transport. For this, mainly tools for the assessment of moisture in building materials like walls, floors and ceilings were used. Soil scientific equipment is mainly destructive and therefore not suitable for the Lintong excavation site.

We used measurement equipment based on microwave technique (moist, hf-sensor), on resistance (Gann Hydromette equipped with electrodes M6; UT601-2) and capacity (UT601-2), and an instrument based on the dielectric constant/ high frequency measuring principle (Gann Hydromette - B50). Furthermore, we tried to use the characteristic curves of wood and other building materials in equipment for our purposes e.g. using Testo 606, Testo 616, and Protimeter Mini.

Because the specimens of different moistures were different in colour, we compared their colours with the NCS colour charts (Figure 1).



Figure : Test specimens of different moisture. Test specimen size: 13cm:13cm:6cm

2.3. Results

Microwave measurement was not satisfactory, as results were the same for all adjusted moistures between 2 and 13%. Partly for the same reason the high frequency measurement using Gann Hydromette equipped with B50 was rejected, because resolution of the moisture series was too low. The results gained with Testos characteristic curves were highly variable as well as too low in resolution. This is attributed to the fact that non of the materials used for the calibration of the curves seems to fully meet the loam used.

Most promising, were the measurements based on electrical resistance or electrical capacity of the specimens. Using equipment limited to resistances below 20 M Ω was not successful, as resistance in soils with moistures below 4% exceeded this limit (Figure 2).

Figure : Resistance using a tool limited to $R < 20 \text{ M}\Omega$

Figure : Resistance measured using UT601-2. Note the logarithmic y-axis.

We managed to measure the electrical resistance for even dryer soils (down to 0% moisture) using the UT601-2 system (Figure 3). Here, values drifted during measurement, making it difficult to standardize the measurement conditions. The best performance of all tested resistance procedures showed Gann Hydromette, equipped with M6 electrodes (Figure 3). The distance between the electrodes was 25 mm.

Figure : Resistance using Gann Hydromette equipped with electrodes M6.

Although Hydromette systems are designed for measurement of moisture in building systems, the hard- and software of this equipment seems to be able to reproduce water content of lintong soil in a satisfying way.

The drift during the measurement – especially rising in moist soil specimens is a problem when measuring the electrical resistance.

More precise values are achievable measuring the electrical field capacity.

Figure : Electrical capacity (nF) measured with UT601-2. Note the logarithmic y-axis.
(nF =nano Farad)

Electrical capacity could be measured throughout the whole moisture series (see Fig. 5.). Be aware of the fact that the span of values is great, and y-axis in figure 5 had to be logarithmed. In our laboratory, it proved to be fairly independent of the analyzer, making it suitable for use under field conditions.

Figure : Moisture (m. %) as a function of the electrical capacity (nF). Note the logarithmic x-axis

2.4. Conclusions

Equipment using the electrical resistance for measurement had some difficulties with the high-moisture samples. Reliable user-independent analyses could be carried out in the laboratory using UT601-2 measuring the electrical capacity (see figure 7). Therefore, we decided to use this system during the field studies in Lintong in March 2011.



Figure 7: test measuring on artificial specimens using UT601-2 in the ProDenkmal lab. The conditioned test specimens were packed in plastic foils and stored in conditioned glass desiccators.

3. Field study in Lintong March 2011

From march 22 to march 30 we had a workstay at the museum of the terracotta army in Lintong.

In the lab- and fieldwork on site were involved following experts:

Members of the conservation department of the museum: Prof. Zhou Tie, Mr. Rong Bo, Mr. Li Bing, Mrs. Zhang Yi, and Mrs. Xi Na

Members of the archaeological Department of the museum: Mr. Zhang Xi, Mr. He

Members of the Emmerling Group in Munich: Dr. Mathias Kocher, Mrs. Linda Zachmann

Employees of ProDenkmal GmbH Bamberg-Berlin: Dr. Rupert Utz, Mr. Uli Meinhardt

Within our work stay we were able to perform several items of our working program:

- superficial capacity measuring with UT601-2 was calibrated to the watercontent of superficial soil in pit No.2
- non destructive measuring of the superficial moisture content at 77 positions within four representative areas in pit 2
- reading, evaluation and reprogramming of the three sentec probes for continuous moisture monitoring in the top 50cm of the ground
- removal of one half of the poultice applied in 2008
- drilling of two holes in the pit down to the groundwater table
- new measuring of the ground water level in the well

3.1. Measuring of superficial moisture on the archaeological surfaces in pit 2

3.1.1. Calibration of equipment on site

For the fieldworks we developed some simple improvements for the sensor unit of UT601-2. The sensibility of the capacity measuring to small changes in the distance of sensor tips and the load on the tips required a high stability of these parameters during the field measuring. Therefore the tips were fixed in a granite block (Fig. 8). For the measuring, the sensor has to be arranged perpendicularly on a horizontal surface line. The peaky sensor tips will slightly penetrate into the soil surface, forced only by the defined load of the sensorblock (Fig. 9). The penetration depth depends on the water content / hardness of the superficial soil material.

427g

1,5 mm

Sensor parameters for the 2011 measuring in pit 2:

Shape of round sensor tips (figure on the right>>)

Diameter of round sensor tips: 1,5mm

Distance between the tip peaks: 41mm

Complete Sensor load: 427g

41 mm

Second, the equipment had to be calibrated on the rammed earth material in the pit. For this, on 16 places electrical capacity was measured *in situ*, and samples between 45 and 60 g each were taken to analyse soil moisture gravimetrically (Fig.10 and 11). The depth of the sampling was 1,5 to 2,0cm from the (Fig. 11).

As capacity value on each position the average of four to five single measuring has been taken. The calibration positions and values are shown in the supplements.



Fig.8: UT601-2 with enhanced sensor unit

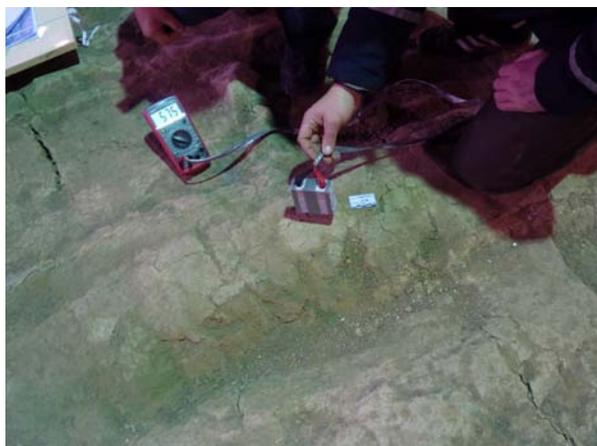


Fig.9: measuring technique on site



Fig. 10: brushed measuring area



Fig. 11: sampling for on-site calibration

In figure 12 the values of the new on-site calibration curve are plotted in one diagram with the laboratory results of our pre-tests in Bamberg. Both curves have about the same function in the range from 0,02 to 7,0nF and in the end of the graphics with values higher than 50nF. The divergence in between this ranges can be explained by the difference of the soil material resp. its compaction, or by the systematic difference between the homogenous moistened test specimen and **the graduated moisture conditions in the superficial soil**. Estimating a penetration depth of the electrical field up to 4cm into the ground, the higher water content underneath the maximum sampling depth of 2cm could cause a higher capacity value, than a homogenous ground with the moisture of the taken sample.

Unknowing the defined reasons for the gap between the lab and the on-site correlation curve, we choose the on-site curve for the calculation of the moisture contents by the capacity measuring, taken in pit 2 (Fig. 13 and Table 1). But we should keep in mind, that higher moisture values could be estimated with capacity values above 6.5nF.

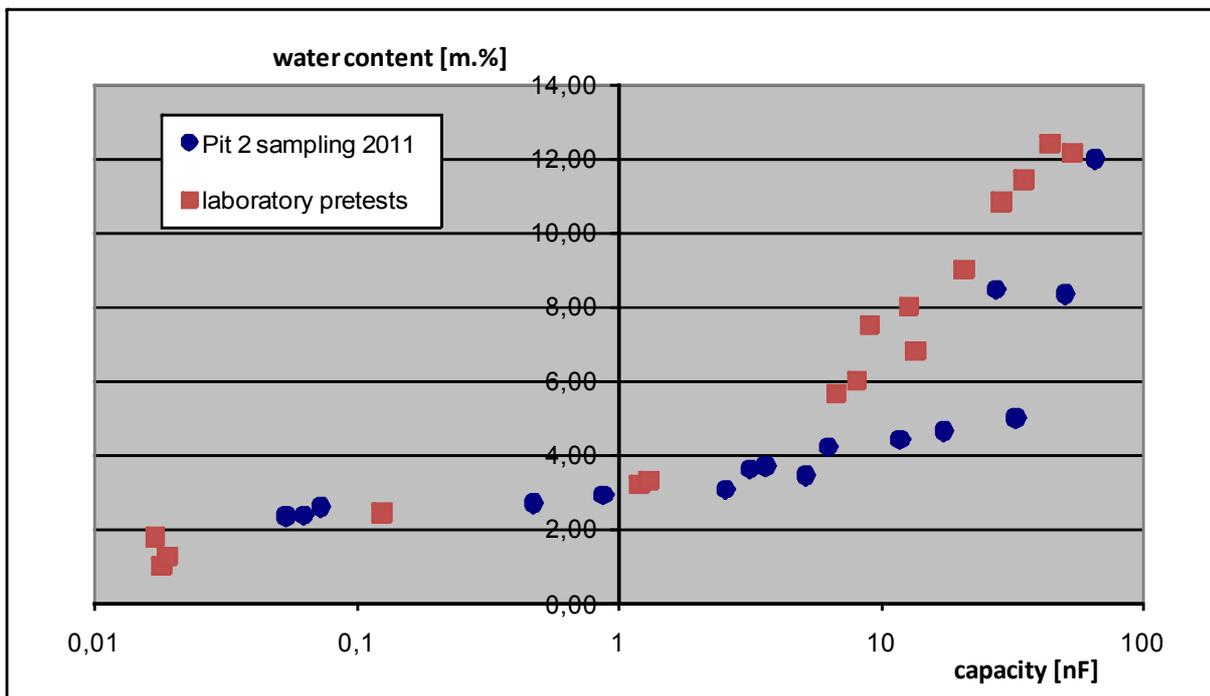


Fig. 12: comparison of the calibration cuves of the laboratory test specimen with on site calibration values.

Figure 13: field calibration curve as measured on the rammed earth of pit 2. Note the logarithmic x-axis.

3.1.2. Measurements on the soil surface

Superficial moisture was measured by the method explained above on areas 1, 2 and 3 and in the poultice area (P) (Figure 14, table 1).

The measuring positions are spots of 10 to 10 cm without superficial cracks. The soilsurface was cleaned by brush before the measuring. On each spot four to five measuring are combined to an average value. The precise positions of measuring spots are mapped on high resolution photographs (see. supplements).

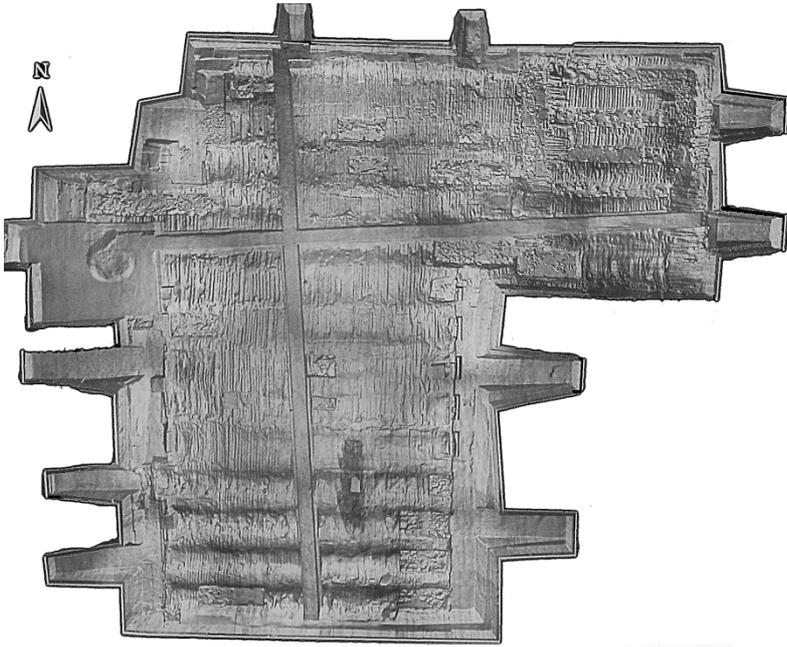


Fig. 14: Pit 2 with investigation areas

Table

Area 1
Area 2
Area 3
Poultice
Sample name
C [nF] ¹
Moisture [%] ²
Sample name
C [nF] ¹
Moisture [%] ²
Sample name
C [nF] ¹
Moisture [%] ²
Sample name
C [nF] ¹
Moisture [%] ²
SH1
0,054
2,4
SH 13T
0,063
2,4
SH 27 BL
9,600
4,2
1
0,145
2,6
SH2
0,068
2,5
SH 14
2,300

3,1

SH 28BL

1,375

3,0

2

28,000

5,0

SH3

0,113

2,5

SH 15

0,700

2,8

SH 30 F

44,000

7,7

3

29,750

5,0

SH4

0,063

2,4

SH 16

2,575

3,1

SH 29 SF

70,250

12,3

4

29,750

5,0

SH6

0,054

2,4

SH 17

1,550
3,0

SH 31 BL
1,825
3,0

5
0,288
2,7
SH7
0,046
2,4

SH 18
65,125
11,5

SH 32 TL
0,143
2,6

6
17,000
4,6
SH8
0,049
2,4

SH 19
65,500
11,6

SH 33 FL
9,000
4,2

7
27,000
4,9
SH1m
2,050
3,0

SH 20
27,500
5,0

SH 36 TL
0,525
2,8

8
32,250
4,6
SH1f
11,875
4,4

SH 21
50,250
9,0

SH 35 TL
0,340
2,7

9
2,050
3,0
SH2f
2,775
3,4

SH 22
5,200
3,8

SH 34 M
2,975
3,4

10
0,450
2,8
SH3f
17,500
4,6

SH 23

0,875

2,9

SH 37 BL

1,700

3,0

11

0,850

2,9

SH4m

4,750

3,7

SH 24

0,128

2,6

SH 38 BL

1,375

3,0

12

1,825

3,0

SH6f

5,650

3,9

SH 25

1,175

2,9

SH 39 BL

0,900

2,9

13

0,140

2,6

SH7f

6,375

3,9

SH 26

0,475

2,8

SH 42 M

0,095

2,5

14

17,750

4,7

SH8f

3,650

3,6

SH 18f

32,750

4,8

SH 41 M

0,108

2,5

15

65,500

11,6

SH9

0,051

2,4

SH 40 M

0,300

2,7

16

35,750

5,6

SH9m

0,925
2,9

SH 43 M
0,155
2,6

17
15,250
4,6
SH10
0,073
2,5

SH 44 M
0,080
2,5

SH10m
3,175
3,5

SH 45 M
0,123
2,6

SH11
0,049
2,4

SH 48 BL
0,190
2,6

SH11m
1,000
2,9

SH 47 BL
0,130
2,6

SH12
0,063
2,4

SH 46 BL
0,423
2,8

SH12m

2,450

3,1

¹: Mean of 4 measurements (see table A1)

²: Calculated as follows: $C < 2,6 \text{ nF}$: $m = 0,17 \ln(C) + 2,91$

$2,6 \text{ nF} < C < 32 \text{ nF}$: $m = 0,69 \ln(C) + 2,67$

$C > 32 \text{ nF: } m = 9,88 \ln(C) - 29,7$

covered by plastic foil, or poulitice

3.2. Reading and evaluation of time records (sentec-probe 1 to 3)

Data mined by sentec data-loggers were read-out during the field campaign in March 2011. The new digital recordings combined with the data of the last work stays are shown in figure 16 to 18.

The sentec sensors are recording since October 2008. They were read out once in September 2009 and now in March 2011. Because of unloaded batteries and other technical problems, there are several gaps in the graphs. Nevertheless all three sentec probes have recorded a repeated seasonal change in soil humidity. This

Seasonal sinus has an amplitude of about 5 mass percent. Its slope has turning points around May and November every year. The sinus is visible in all five steps underneath the surface. This seasonal change in the humidity of the soil could be explained by changes in the groundwater table underneath the investigated soil surface. The effect of this natural change is in the range of the effects of our poultice application.

All three sentec positions (1 to 3) belong to the test areas for remoistening and have been covered with plastic foils during the recorded time (P1 and P2 belong to the poultice area, P3 belongs to the "passive moistening area"). The continuous slope of the curves in fig. 16 to 18 could be explained by this covering, that hinders the evaporation of humidity coming up from the groundwater underneath.

The results of the sentec probes are affirmed by the results of the superficial soil measuring (Table 1). All positions that have been covered during the last three years, have a significantly higher humidity in the soil surface.

So far the results confirm the qualitative and quantitative forecasts of the WUFI 2D calculations. The senec probes remain in the same positions. They have got new batteries and free memory units.



Fig. 15:

In the front: Mr. Utz is reading out the data records of the sentec probe P3;

in the back: Mr. Rong Bo is measuring the superficial soil humidity, meanwhile Mr. Kocher notes the data and maps the positions into printed plans.

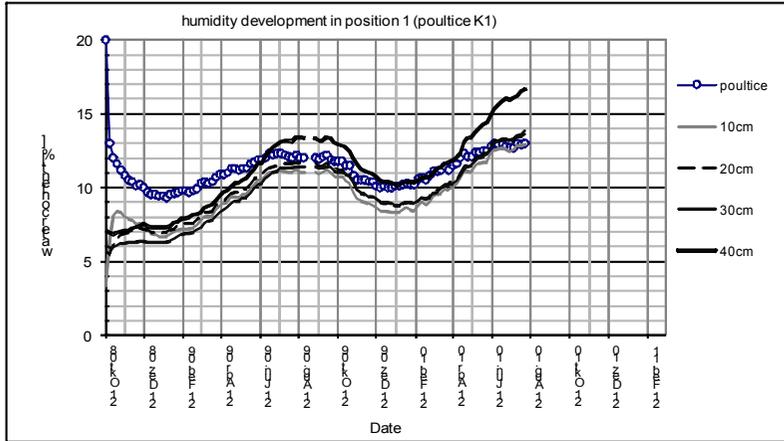


Figure 16: Humidity development in **position 1 (poultice)**

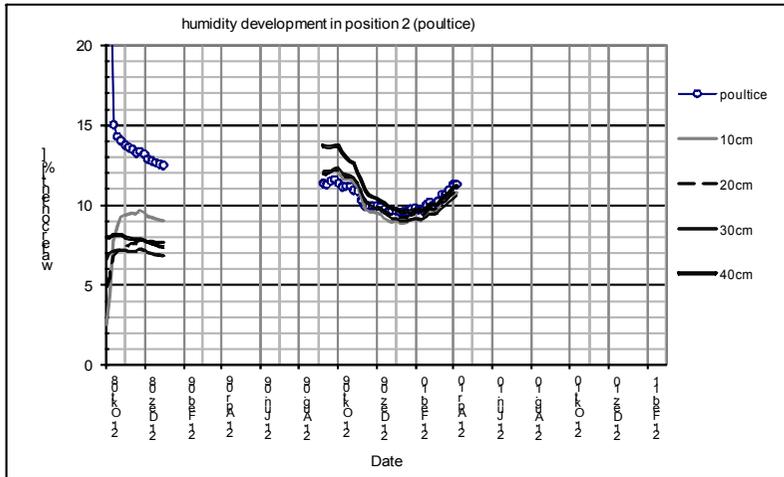


Figure 17: humidity development in **position 2 (poultice)**

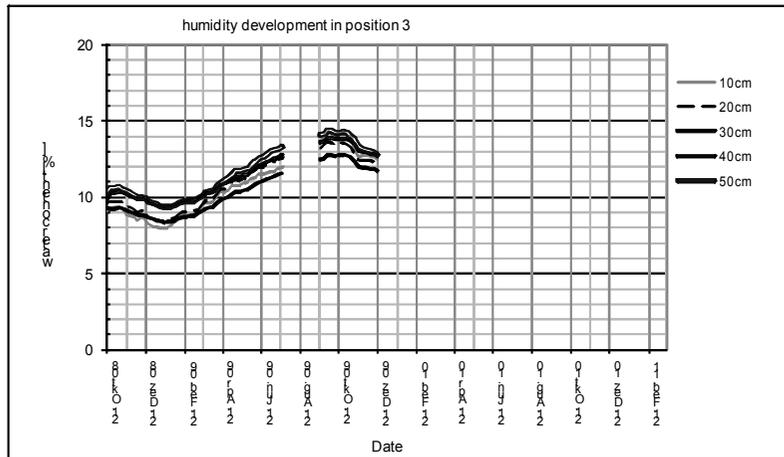


Figure 18: Humidity development in **position 3 (passive moistening)**

3.3. Partial remove of the poultice applied in 2008

The effect of the poultice application has run out at least since one and a half year (fig. 16 and 17). For the verification of a superficial drying process we removed half of the poultice around the sentec sensor P1. After more than two years of covering with the poultice material, there is no visible damage on the archeological surface structures. In the next year, the probe should record the drying dynamics in uncovered surfaces.



Figure 19: partly opened poultrice with uncovered removed plastic foil and protection fabric on the right side. Removed poultrice material on the left.



Figure 20 Cleaning of the archeological surface



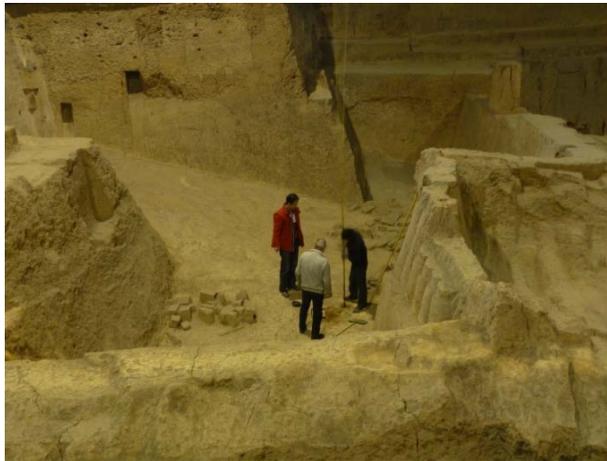
Figure 21: Finished removing of the poultice around the sentec probe P1 (arrow).

3.4. Investigations, concerning the groundwater table

In two points of the pit the colleagues from the archeological department could realize drill holes into the ground of pit 2, that reach the groundwater level. In this holes and in the existing well, investigations on the precise position and the annual oscillation of the groundwater table under pit 2 will be possible.

B 2

B 1



Figure

well



Figure 22: The three points where the distance to the groundwater

Diameter of the drill holes: 5,0cm

Depth of the drill hole:

B1: 7,90m from ground

B2: 6,80m from Brick level

Distances to the groundwater table in the end of March 2011

Well: **8,70m** from the top of the well (**The distance has been 7,7m in 1999 and 7,83 in 2000!**)

B1: 6,70m from ground (measuring in a fresh hole! Further validations are necessary!)

B2: 6,10m from brick level (measuring in a fresh hole! Further validations are necessary!)

4. supplements

Table 2: soil sampling and calibration values

Position/sample

sample weight with box

dry weight with box

box

water content**capacity value (average)**

[g]

[g]

[g]

[m.-%]

[nF]

SH F1 /F1

53,08

52,103

10,75

2,36**0,054****SH F1f /F1f**

52,73

50,947

10,75

4,44**11,88****SH F3f /F3f**

48,42

46,742

10,75

4,66**17,5****SH F7f /F7f**

49,97

48,377

10,75

4,23**6,3****SH F8f /F8f**

46,21

44,94

10,75

3,71**3,65**

SH F10 /F10

45,63

44,742

10,75

2,61

0,073

SH F10m /F10m

54,73

53,191

10,75

3,63

3,175

SH 19 /F19

55,434

50,649

10,75

11,99

65,5

SH F18f /F18f

59,345

57,032

10,75

5,00

32,75

SH F22 /F22

54,75

53,28

10,75

3,46

5,2

SH F26 /F26

55,947

54,754

10,75

2,71

0,475

SH F13 /F13

54,192

53,187

10,75

2,37

0,063

SH F16 /F16

55,487

54,15

10,75

3,08**2,575****SH F20 /F20**

59,911

56,07

10,75

8,47**27,5****SH F21 /F21**

61,198

57,31

10,75

8,35**50,25****SH F23 /F23**

56,723

55,42

10,75

2,92**0,875**

Table 3: capacity measuring in pit 2 (single values, averages – calculated humidity values (m.-%))

area 1	C [nF]				m [m.-%]	
					Mittelwert	Feuchte laut Formel:
SH1	0,054	0,056	0,051	0,055	0,054	2,4
SH2	0,068	0,058	0,058	0,088	0,068	2,5
SH3	0,12	0,066	0,13	0,135	0,113	2,5
SH4	0,051	0,068	0,06	0,074	0,063	2,4
SH6	0,062	0,049	0,055	0,048	0,054	2,4
SH7	0,043	0,042	0,052	0,047	0,046	2,4
SH8	0,047	0,048	0,052	0,049	0,049	2,4
SH1m	3,3	0,9	1,8	2,2	2,050	3,0

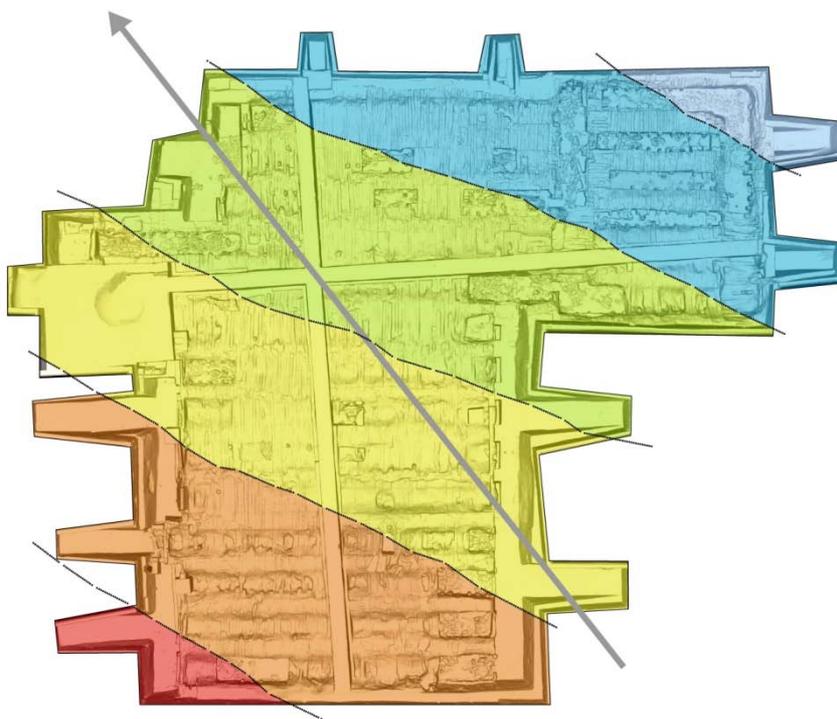
SH1f	12	12	14	9,5	11,875	4,4
SH2f	3	2,8	2,8	2,5	2,775	3,4
SH3f	14	22	19	15	17,500	4,6
SH4m	3,5	4,5	6,5	4,5	4,750	3,7
SH6f	5,5	6,6	6,5	4	5,650	3,9
SH7f	9	3,2	8,5	4,8	6,375	3,9
SH8f	4	2,1	4	4,5	3,650	3,6
SH9	0,043	0,052	0,065	0,045	0,051	2,4
SH9m	0,6	0,7	1,5	0,9	0,925	2,9
SH10	0,075	0,076	0,075	0,066	0,073	2,5
SH10m	2,9	5	3	1,8	3,175	3,5
SH11	0,048	0,053	0,046	0,048	0,049	2,4
SH11m	1,1	1,5	0,8	0,6	1,000	2,9
SH12	0,06	0,061	0,061	0,068	0,063	2,4
SH12m	4	2	2,6	1,2	2,450	3,1
				C [nF]	m [m.-%]	
area 2				Mittelwert	Feuchte laut Formel:	
SH 13T	0,066	0,056	0,074	0,056	0,063	2,4
SH 14	2	2,6	2,8	1,8	2,300	3,1
SH 15	1,1	0,6	0,6	0,5	0,700	2,8
SH 16	2,3	4,4	1,8	1,8	2,575	3,1
SH 17	1,1	2,4	1,5	1,2	1,550	3,0
SH 18	60,5	55	78	67	65,125	11,5 Folie
SH 19	56	55	83	68	65,500	11,6 Folie
SH 20	25	20	30	35	27,500	5,0 Folie
SH 21	44	60	42	55	50,250	9,0 Folie
SH 22	5,8	3,8	6,9	4,3	5,200	3,8
SH 23	0,9	0,8	1,1	0,7	0,875	2,9
SH 24	0,16	0,11	0,12	0,12	0,128	2,6
SH 25	1,3	1,1	1,2	1,1	1,175	2,9
SH 26	0,4	0,5	0,3	0,7	0,475	2,8

SH 18f	36	39	28	28	32,750	4,8
SH 19f	17	18	13	14	15,500	4,6
					C [nF]	m [m.-%]
area 3					Mittelwert	Feuchte laut Formel:
SH 27 BL	9,5	8,9	14	6	9,600	4,2
SH 28BL	1,6	1,2	2	0,7	1,375	3,0
SH 30 F	34	40	45	57	44,000	7,7
SH 29 SF	80	56	45	100	70,250	12,3
SH 31 BL	3	2	1,2	1,1	1,825	3,0
SH 32 TL	0,17	0,14	0,09	0,17	0,143	2,6
SH 33 FL	6	12	7	11	9,000	4,2
SH 36 TL	0,9	0,5	0,3	0,4	0,525	2,8
SH 35 TL	0,3	0,3	0,3	0,46	0,340	2,7
SH 34 M	2,9	4,2	2,3	2,5	2,975	3,4
SH 37 BL	0,4	1,8	2,7	1,9	1,700	3,0
SH 38 BL	1,3	1,4	1,6	1,2	1,375	3,0
SH 39 BL	0,5	0,6	1,2	1,3	0,900	2,9
SH 42 M	0,1	0,08	0,11	0,09	0,095	2,5
SH 41 M	0,13	0,1	0,11	0,09	0,108	2,5
SH 40 M	0,3	0,4	0,2	0,3	0,300	2,7
SH 43 M	0,12	0,14	0,19	0,17	0,155	2,6
SH 44 M	0,07	0,1	0,08	0,07	0,080	2,5
SH 45 M	0,1	0,1	0,09	0,2	0,123	2,6
SH 48 BL	0,23	0,13	0,18	0,22	0,190	2,6
SH 47 BL	0,23	0,11	0,08	0,1	0,130	2,6
SH 46 BL	0,36	0,4	0,42	0,51	0,423	2,8
					C [nF]	m [m.-%]
Poultice:					Mittelwert	Feuchte laut Formel:
1	0,07	0,19	0,16	0,16	0,145	2,6
2	12	28	32	40	28,000	5,0
3	22	45	32	20	29,750	5,0
4	26	35	23	35	29,750	5,0
5	0,3	0,18	0,27	0,4	0,288	2,7
6	14	18	19	17	17,000	4,6
7	19	34	28	27	27,000	4,9

8	34	30	37	28	32,250	4,6
9	2,7	1,5	1,5	2,5	2,050	3,0
10	0,7	0,4	0,3	0,4	0,450	2,8
11	0,9	0,8	0,8	0,9	0,850	2,9
12	1,7	1,5	2,3	1,8	1,825	3,0
13	0,1	0,16	0,19	0,11	0,140	2,6
14	20	14	20	17	17,750	4,7
15	80	65	66	51	65,500	11,6
16	25	31	42	45	35,750	5,6
17	15	18	13	15	15,250	4,6

Report

Project:	Lintong, Museum of the Terracotta Army, Investigations and protection measures for the polychrome terracotta fragments, embedded in the drying earth of pit II
Title:	Continuation of the investigations on the drying kinetics and the possibilities for remoistening - investigations for the development of an integral risk mapping



Place	Lintong, Peoples Republic of China
Principal:	Technical University, Munich, Lehrstuhl für Restaurierung, China Projekt
Study time:	2011-2013
Field seasons:	March 2011, August 2012
Authors:	Dr. Rupert Utz
Report delivery:	June 2014
Dedication:	Principal (2-fold) ProDenkmal GmbH

Contents:

1. Introduction

The subproject “Investigations and protection measures for the embedded polychrome terracotta fragments” in pit 2 is interested in the drying kinetics of the earthen structures.

Within the years 2012 and 2013, we have continued collecting data of the moisture in the earthen structures on the surface as well as in the ground, down to the groundwater table.

Our data show, that “passive moistening” is a very effective tool for remoistening the earthen structures in the pit, in order to protect the polychromy against suffering from totally dried bedding conditions.

An evaluation of the laser scan has given useful section profiles and mappings, that give us the possibility to connect the different data sets from the pit in a precise three dimensional grid.

After three years of the project, we were able to create a detailed map, that shows the distinct distances between the groundwater table and the fragment layer for every position in the pit. This map is the basic tool for the creation of a risk map for the drying fragment layer.

2. Creation of profile sections across pit 2

In spring 2012 ProDenkmal created three precise profile sections through pit 2 by the use of the software program "Autodesk 3ds Max". It is based on the three dimensional data of the laser scan, provided by the museum of the terracotta army. The successive steps of conversion are shown in cap. 2.1.

In a first step all our measuring positions were plotted into the 3d scan file (77 positions of soil surface measuring, three positions of groundwater drilling and four positions of sentec probes).

In a second step the 3d grid was exported into AutoCAD Architecture 2012. With the CAD software three cuts through the grid of the pits surface were generated and shown as vertical sections. In this sections, we plotted and interpolated the levels of the excavated brick-floors of the corridors. In the created sections, according to the scanned surface of the pit, the precise position of the brick-level is shown as well as the positions of our investigation positions.

2.1. Procedures from 3D –scan to precise profiles

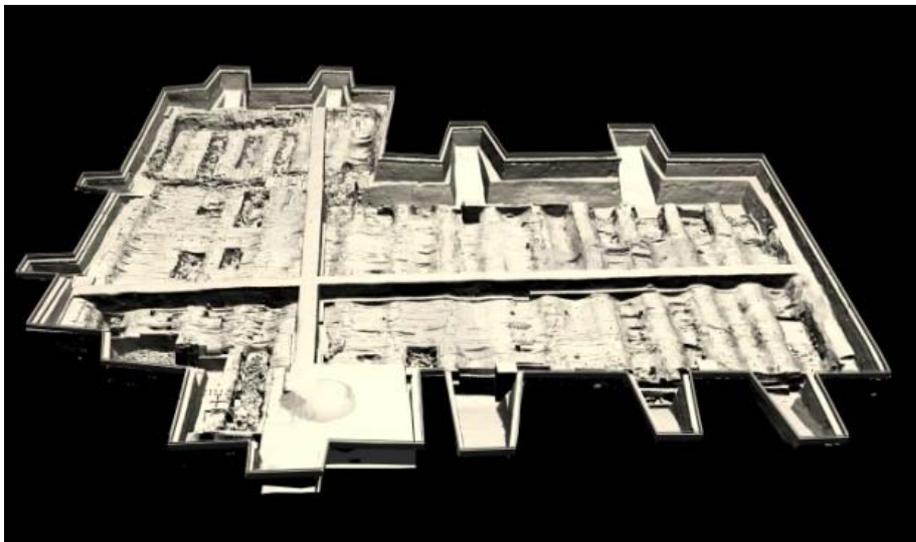


Fig. 1: Autodesk 3ds Max – file of the 3d scan

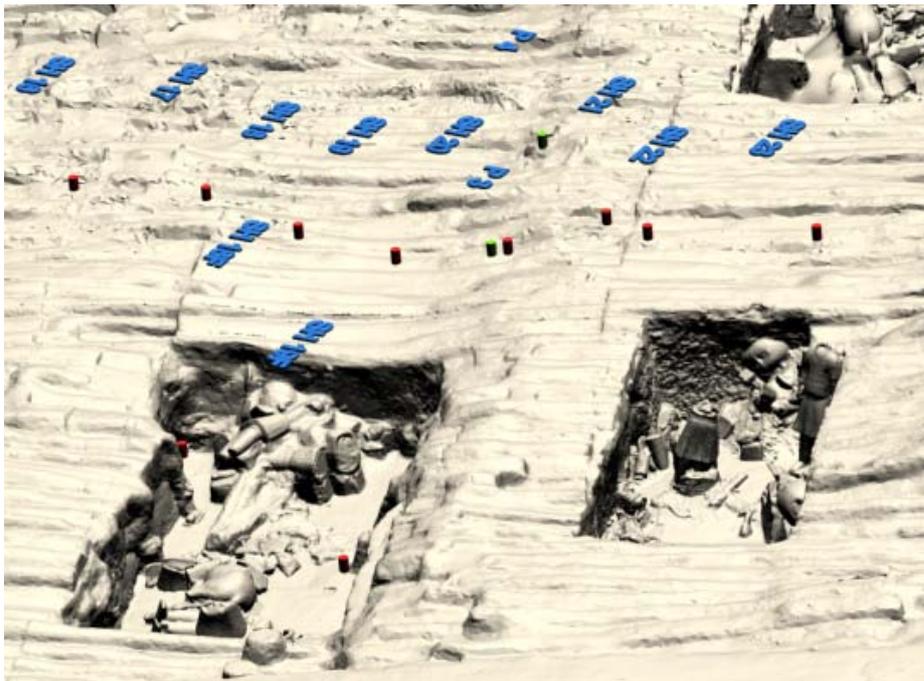


Fig. 2: positions of soil surface measuring are plotted into the 3d-grid

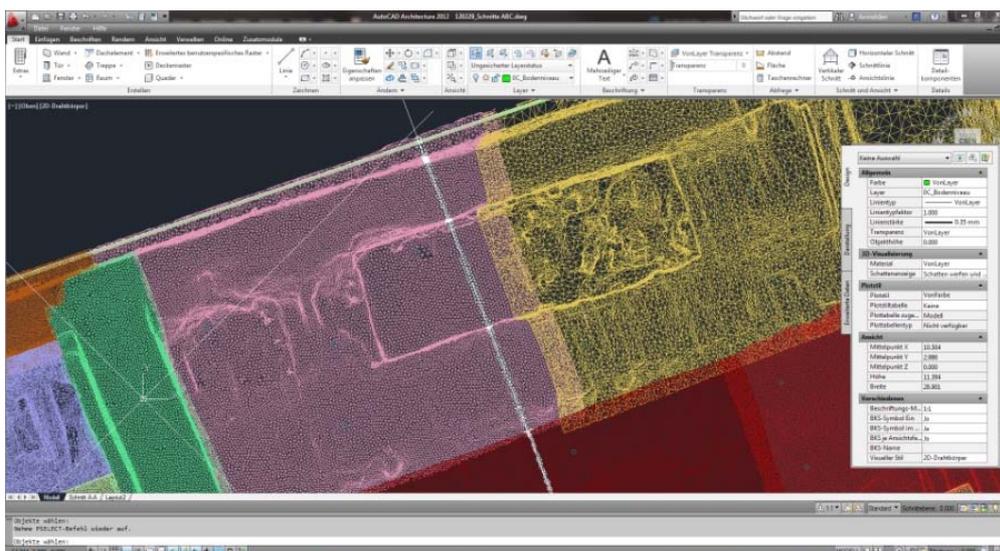


Fig. 3: 3d grid, exported into "AutoCAD Architecture 2012" – software.

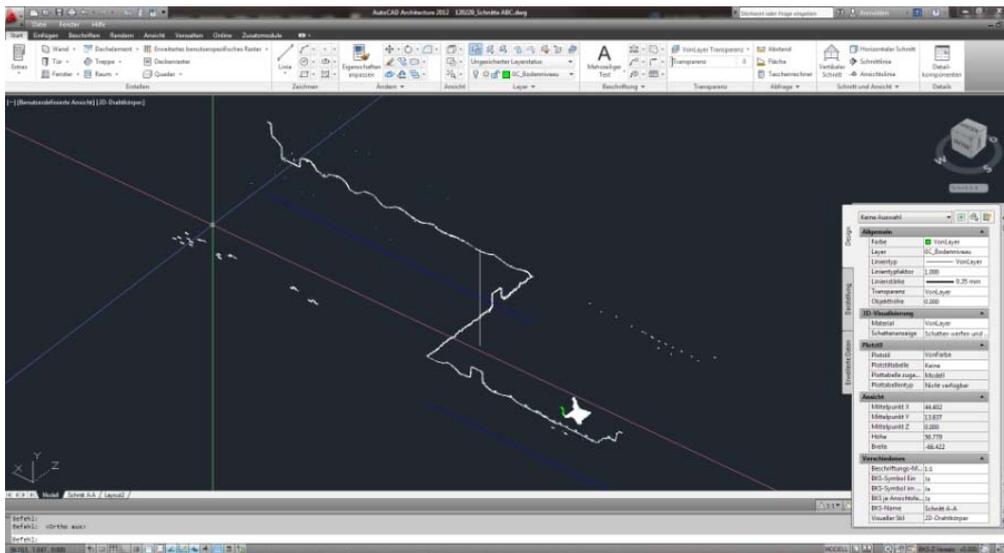


Fig. 4: Extraction of the section line A – A'

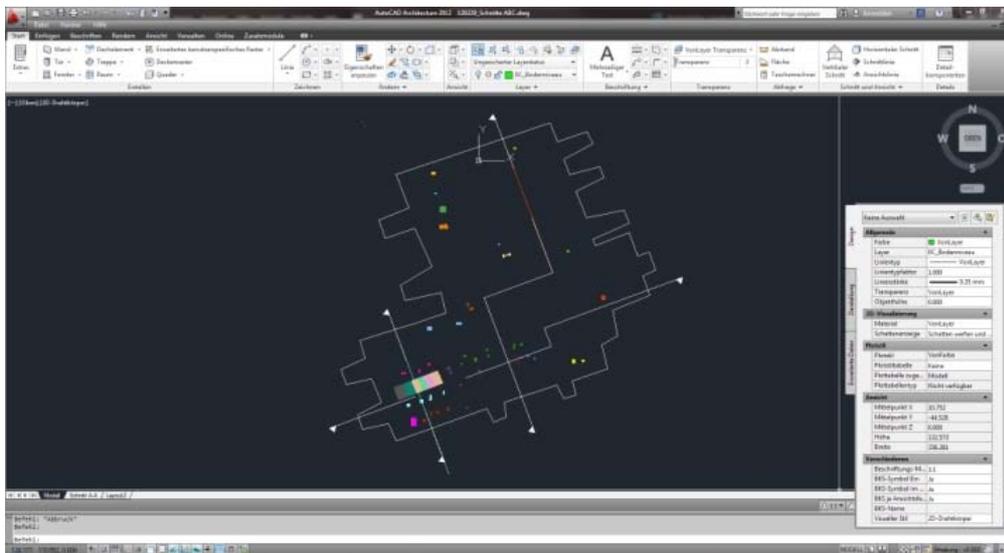


Fig. 5: Three section lines and brick – level measuring positions

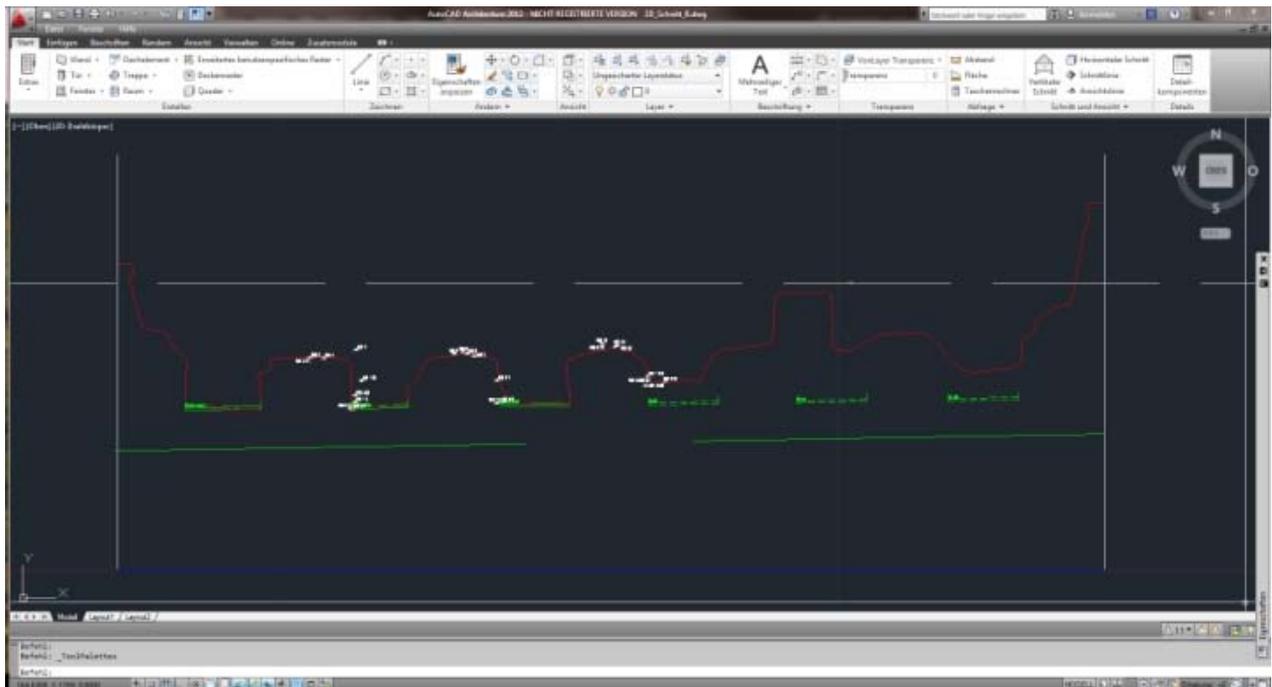


Fig. 6: Interpolated brick levels and measuring points, pasted on the section plane.

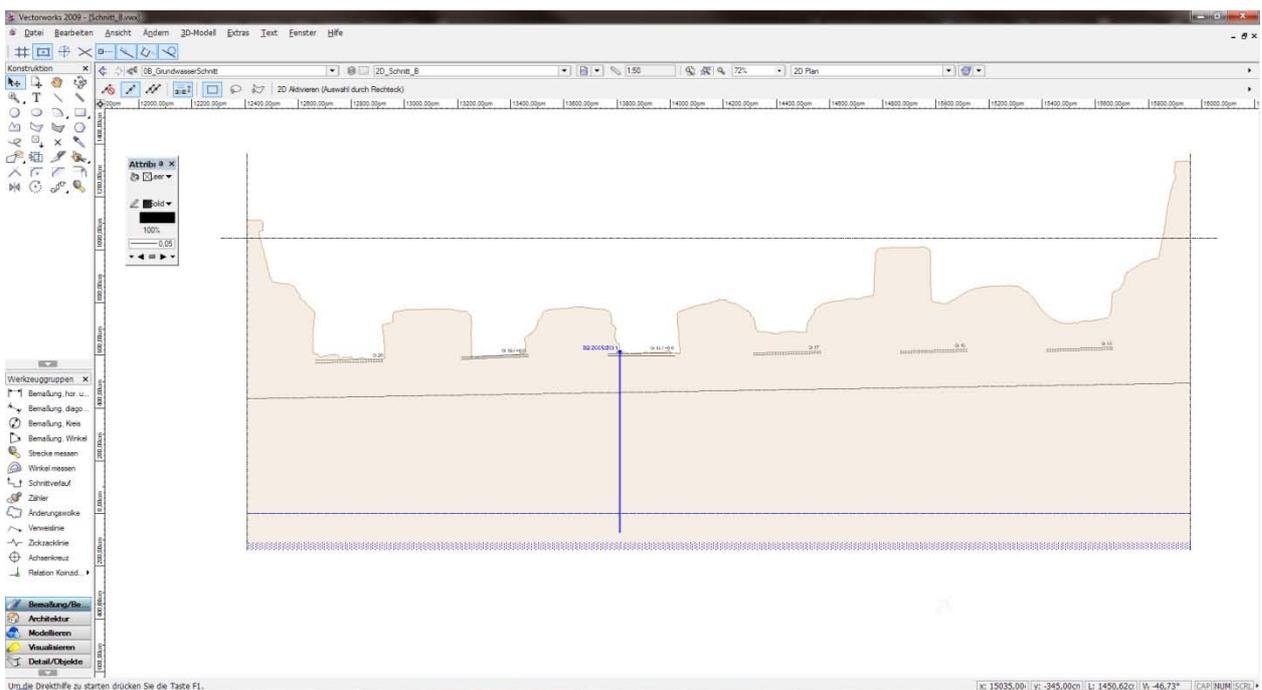


Fig. 7: the finish was designed with the software Vectorworks 2009.

2.2. Results

The evaluation of the laser-scan and the created profile sections show, that the corridor brick floors were arranged parallel to the natural inclination of the landscape, declining from south (Lishan mountain range) to north (wei river valley). In this direction the corridors G1 to G14 get off 2.35m in a distance of 74m in regular steps of 0.168m per corridor. The distance between the corridors is about 5.5m in average.

In the long direction the corridors are built more or less horizontal. There is no inclination to eastern or western direction. Each corridor, in its total length keeps the horizontal level with 10 to 20cm deviation. Obviously, after more than 2000 years, there is no change in this arrangement of the brick levels.

By means of this new created profiles, we further on have a perfect tool to determine the precise distances between the fragment layer and the archaeological surface. In combination with our groundwater measuring points, we even are able to read out the distance of the fragment layer to the groundwater on every position in the pit with a resolution of 10 – 20cm deviation (see cap. 5). This is a fundamental base for precise modelling of the drying kinetics in pit 2.

3. Field study in Lintong August 2012

From august 15 to 22 Dr. Utz had a workstay at the museum of the terracotta army in Lintong.

In the fieldwork on site were involved following experts:

Members of the conservation department of the museum: Prof. Zhou Tie, Mr. Rong Bo, Mr. Li Bing, Mr. Zhou

Members of the archaeological Department of the museum: Mr. Zhang Xi.

Members of the Emmerling Group in Munich: Mrs. Linda Zachmann

Within this work stay, we were able to perform several items of our working program:

- repetition of the superficial capacity measuring with UT601-2 investigating the watercontent of superficial soil in pit No.2
- reading, evaluation and reprogramming of the three sentec probes for continuous moisture monitoring in the top 50cm of the ground
- Inventing the light scale device for measuring the groundwater table in the well, B1 and B2

3.1. Measurements on the soil surface

Superficial moisture was measured with capacity measuring (UT601-2) on areas 1, 2 and 3 and in the poullice area (P) (see Fig. 8 and 9-11; supplements Table 1 and 2).

The measuring positions are spots of 10 to 10 cm without superficial cracks. The soilsurface was cleaned by brush before the measuring. On each spot four to five measuring are combined to an average value. The precise positions of measuring spots were mapped in 2011 so a point fitting repetition of the measuring in 2011 was possible.

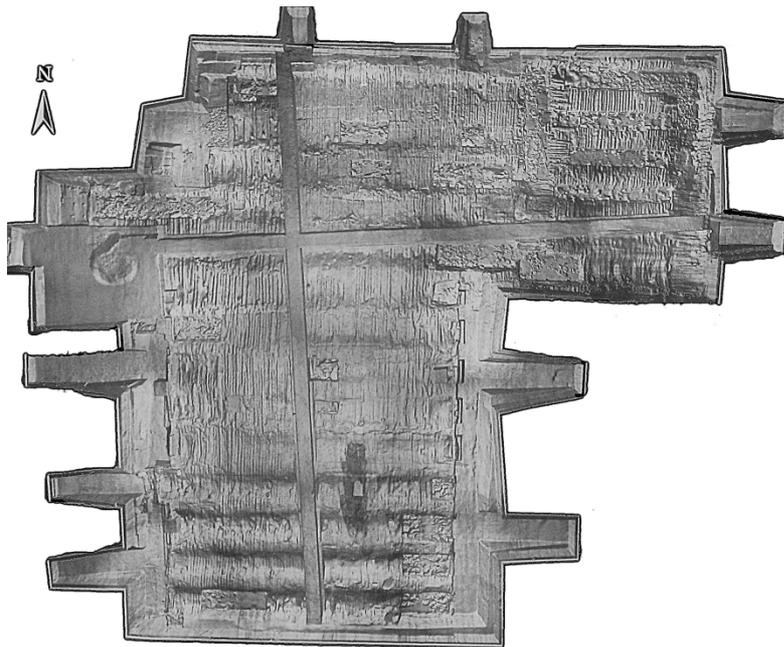


Fig. 8: Pit 2 with investigation areas

3.1.1. Results

The measured surface humidity for all positions was in august 2012 higher than in march 2011. The increased humidity values are particularly high in positions with a low distance to the groundwater table (brick level). Explanations for this finding are mentioned in the ongoing chapters.

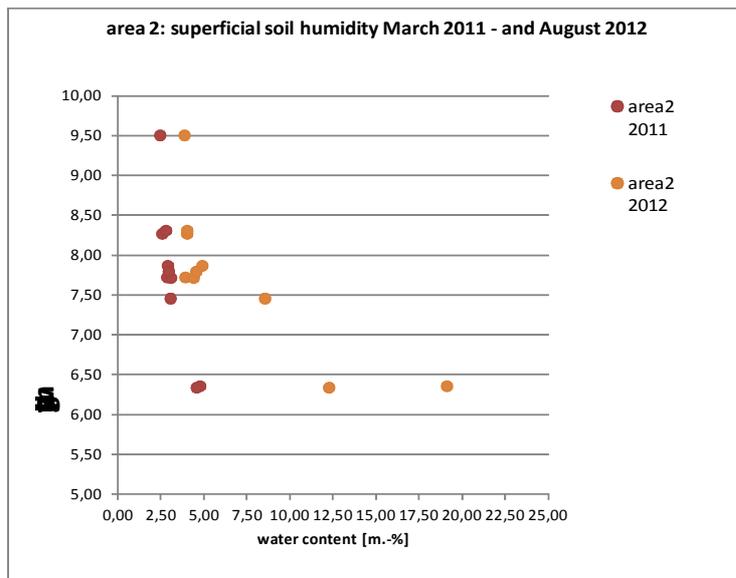
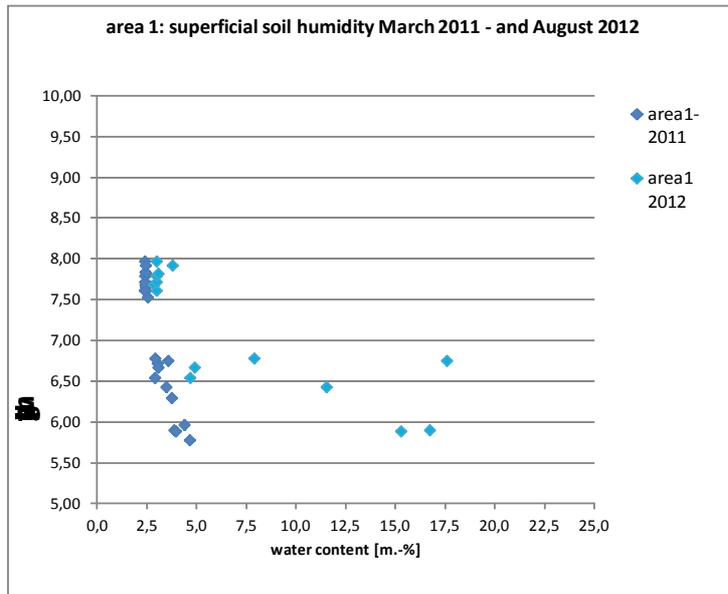
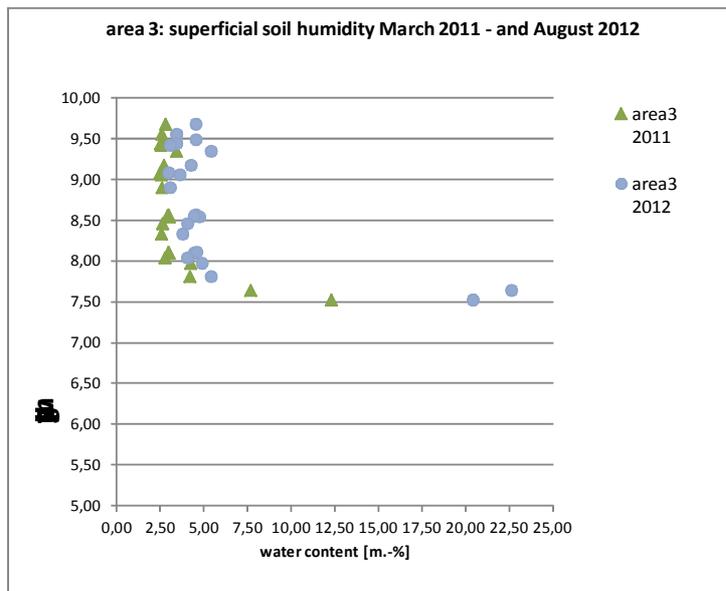


Fig. 9-11: humidity of the soilsurface in the pit, in relation to the groundwater distance of the measuring position. The areas of passive moistening (within area 2) and of poultice area are not included.



3.2. Reading and evaluation of time records (sentec-probe 1 to 3)

Data mined by sentec data-loggers were read-out. The new digital recordings combined with the data of the former work stays are shown in figure 14 to 16.

The sentec sensors are recording since October 2008. They were read out once in September 2009, in March 2011 and in August 2012. Because of unloaded batteries and other technical problems, there are several gaps in the graphs.

All three sentec positions (1 to 3) belong to the test areas for remoistening and P2 and P3 have been covered with plastic foils during the whole recorded time (P1 and P2 belong to the poultice area, P3 belongs to the "passive moistening area" (see. Fig. 13). The poultice, covering the position of P1 was removed in March 2011 (see Fig. 12). Starting from this point, the earth could evaporate its humidity without any restriction, just like in any other normal, non covered position of the pit.

The senec probes remain in the same positions. They have got new batteries and free memory units.
sentec 2

sentec 1



Fig. 12: Finished removing of the poultice around probe 1. Probe 2 remains covered by dried out poultice and plastic foil.

sentec 3



Fig. 13: The humidity in the ground underneath the passive moistening foil has increased continuously up to a rather high level in 2012

3.2.1. Results

The repeated seasonal sinus- in soil humidity in the uppermost half meter of the ground has been reaffirmed now over a period of four years on all three sentec positions (see. Fig.14 to 16). Even within the drying curve in position 1, where the poultice cover has been removed in March 2011, the annual sinus overlays the declining curves of ground humidity (Fig.: 15). So it is proved, that the sinus is not caused by any effects of covering foils or poultices, but occurs in the ground at any place of the pit. The relative high humidities on the soilsurface, measured in august 2012 (see above), are fitting to the results of sentec probes (for example probe 3 and passive moistening area 2 (SH 17 – 21)). The higher values in august confirm the sinus curves with maximum peaks in every summer.

Within the poultice area, P1 shows the drying of the ground after removing the poultice. With that observation we are able to confirm, that the ongoing rise in the humidity records does not follow some technical drift of the device, but is caused by the protection of the earth with plastic foil.

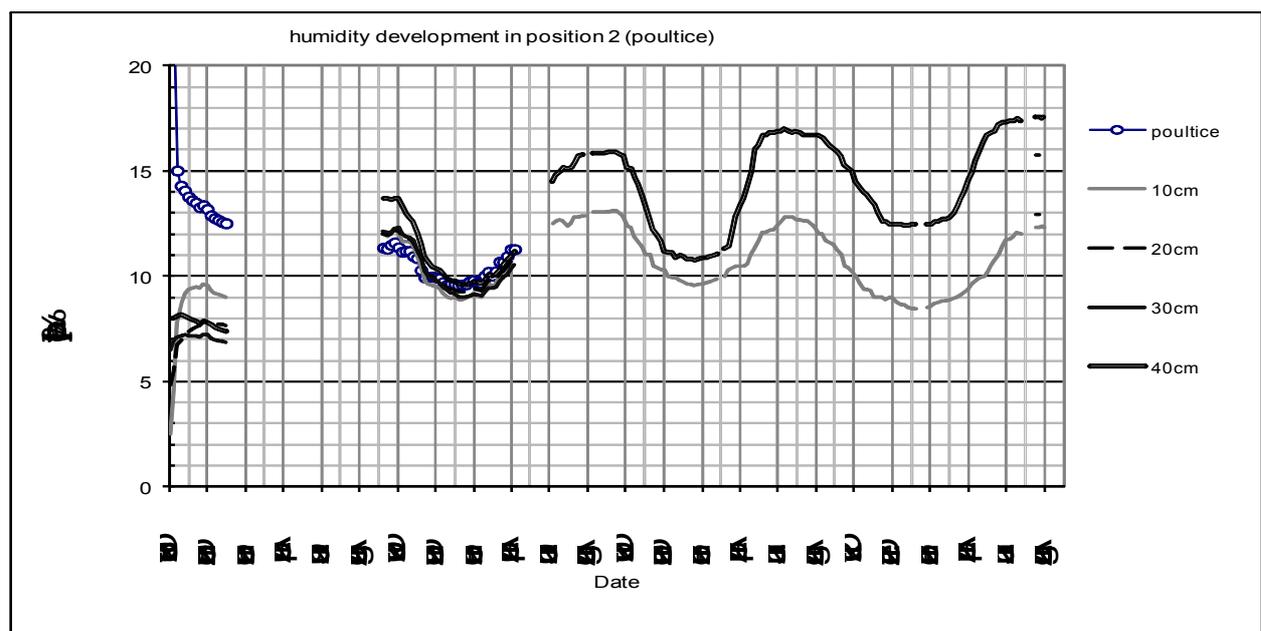


Fig. 14: Humidity development in position 2, covered by poultice during the whole logging time (August 2008 – August 2012).

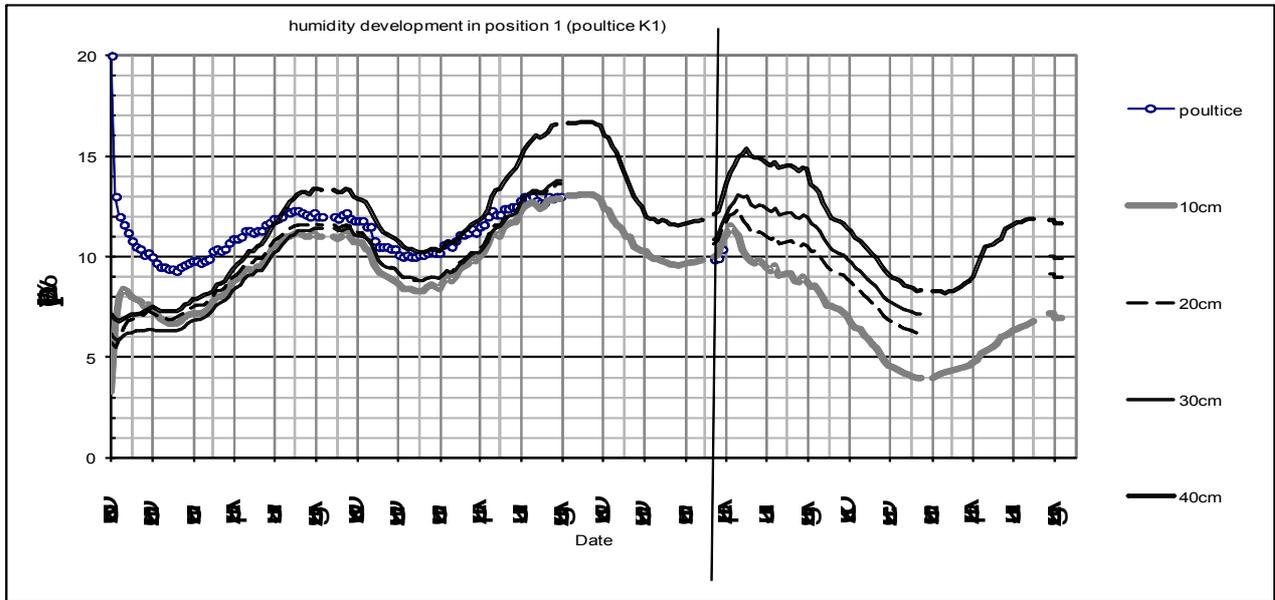


Fig. 15: Humidity development in position 1, covered by poultice until March 2011. After removing the poultice cover - Within one year, the winter humidity in 40cm depth has declined from 12m. % to .9m.%. In 10cm depth, the winter humidity has declined from 9m.-% to 4m. %.

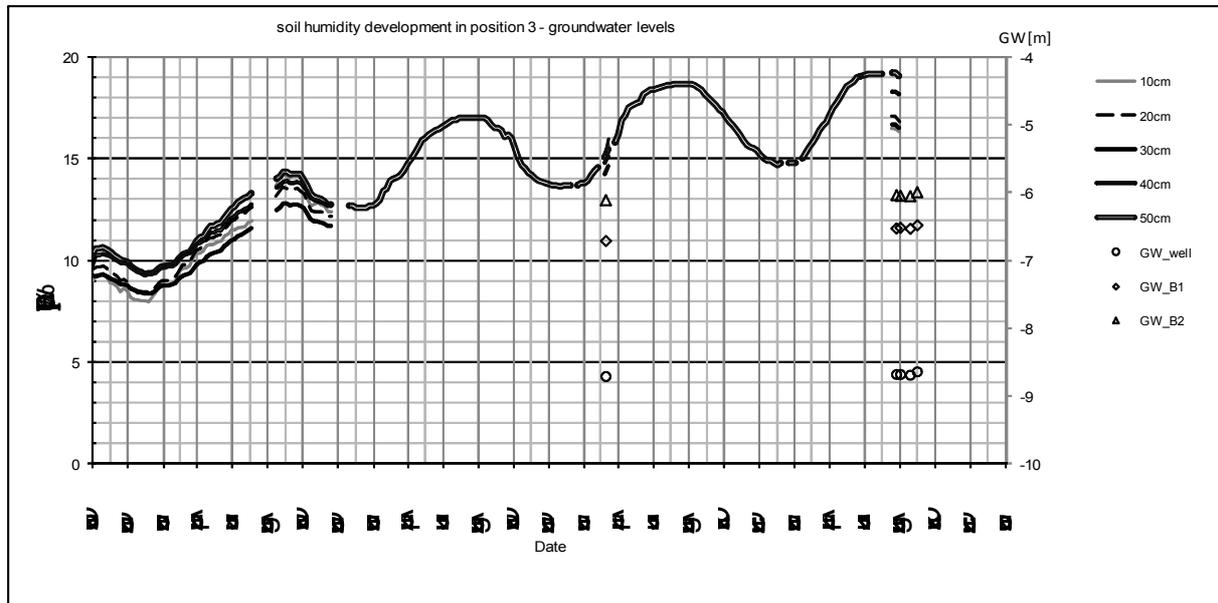


Fig. 16: Humidity development in position 3 (area of passive moistening). In the period of four years recording, the humidity in the ground has climbed up to an annual average between 15 and 20 m. -%).

4. Investigations, concerning the groundwater table

From September 2012 to Mai 2013 our colleague Li Bin collected data of the groundwater – table, using a light scale. The measuring was done once a week, ore mostly every second week on the positions well, B1 and B2. As the drillholes have no filter tube inside, besides the groundwater level, the bottom of the drillhole was measured as well. Since March 2013 the dillhole B2 collapsed near the bottom. No further measurements of the groundwater were possible in this position. The measuring data are shown in the supplements - Table 3. Evaluations of the data are shown in Fig. 17 and 18.

4.1. Results

By the help of the new created profile sections we were able to combine the three measuring positions in one uniform scale system. In Figure 17 the groundwater levels are related to a fictional zero-level in the well, measured on 7th August 2012. In the consequence we are able to observe, that the groundwatertable in B2 is about 6cm higher than in the well. The table in B2 is 39cm lower than in the well.

Combining this data we created a **map with the contour lines of the groundwatertable** (supplements). The groundwater table in pit 2 is declining from southeast to southwest with about 10cm per 7.5m. This adds up to a inclination of 1,1m from the southeastern to the northwestern corner of the pit.

Additionally, crosscutting the contour lines of the groundwatertable with the declining levels of the brick floor in the corridors, we have drawn a **map with the distances from groundwater table to the brick level** (base of the fragment level) in each position of pit 2 (supplements). Because the distance to the groundwater has an important influence on the drying kinetics of the earthen structures, this map is a basic tool for the focused risk management in pit 2 (Supplements).

Because of the wide collecting interval we have no continuous line of groundwater data (Fig. 17 and 18). It is obvious, that the precipitation related maximum peaks are not visible in the data lines, as well as the decrease after a peak (Fig. 17.).

For further measuring, we recommend a narrow interval for the data collection. The best way would be a continuously reading, done by an automatic working, data logging measuring device in the well.

The graphs in Fig. 17 have a recorded **amplitude in the range or 10 – 15cm**.

Figure 18 makes clear, that there is no correlation between the variation of the groundwater level and the seasonal sinus in the graphs of the sentec probes.

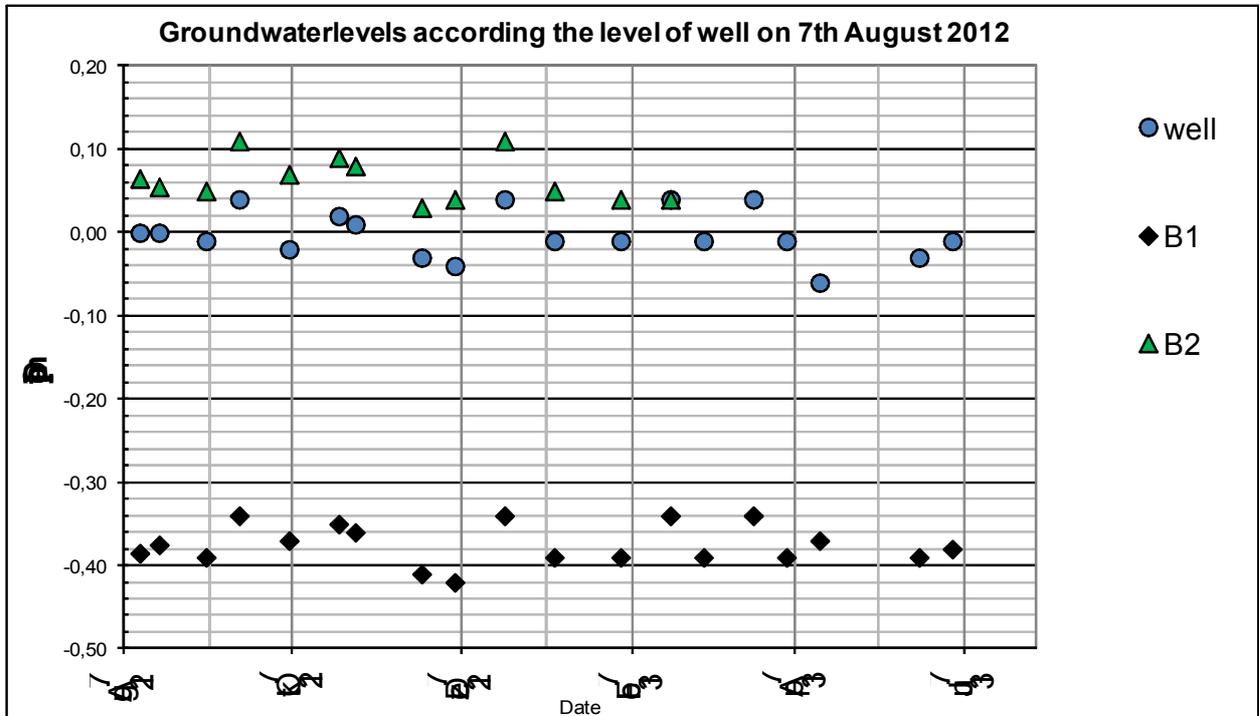


Fig. 17: Surface of the groundwater table in the positions well, B1 and B2, related to a zero-level in the well, measured on 7th August 2012. An estimated curve of the real groundwater fluctuation in position B1 is shown in dashed lines.

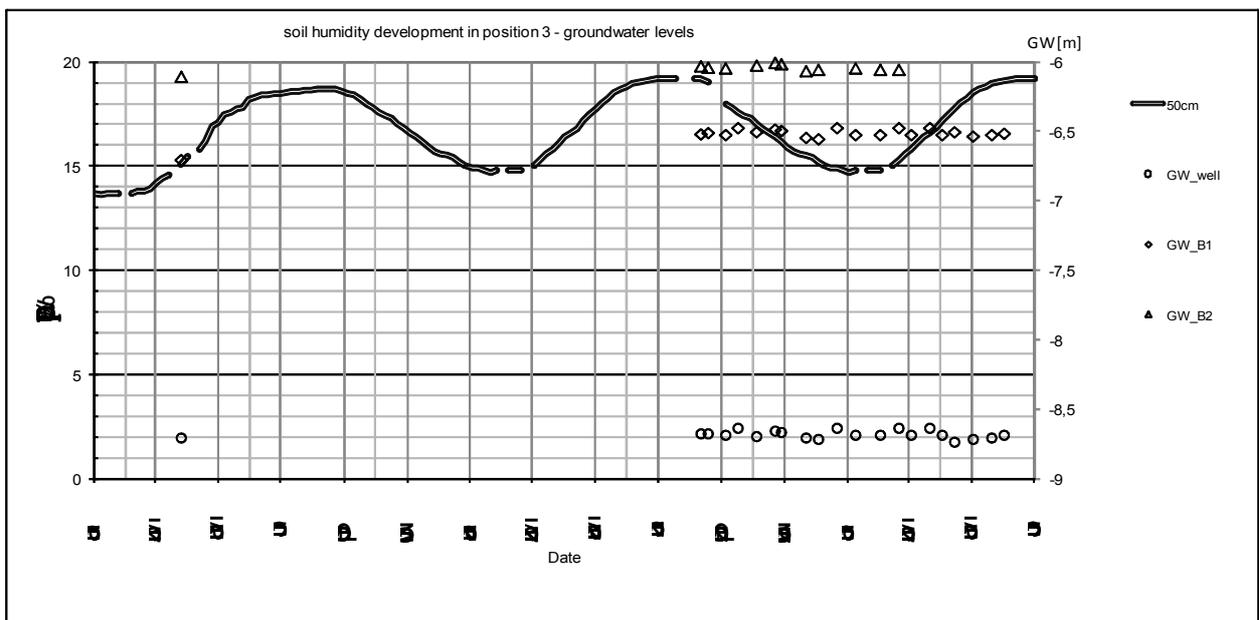


Fig. 18: Groundwater measuring collected with a light scale by Li Bin. The data were collected once a week or every second week. The combination with the sinus curve of the sentec probe 3 clarifies, that the sinus is not intended by annual variations of the groundwatertable.

5. Summarizing results and resume

All three sentec probes have recorded a repeated seasonal change in soil humidity. This seasonal sinus has an amplitude of about 5 mass percent. Its slope has turning points around May and November every year. The sinus is visible in all five steps underneath the surface. This seasonal change in the humidity of the soil, as we have seen within the last project period, is **not** intended **by changes in the groundwater table** underneath the investigated soil surface.

Unfortunately within this project, we were not able to get the necessary climate data from pit 2, nor the precipitation data of Lintong.

For a further calibration of the WUFI modeling program, we should have the climate data of the museum hall of pit 2 for the last years. All we have, until now, is the period from January –October 2011. In connection with the sinus of the sentec data (see. Fig. 19) we observe a distinct correlation of the sinus in the earthen structures with the **temperature in the pit**. Probably higher temperatures in summer are increasing the evaporation rates of the soil. The evaporation on the surface accelerates the rising vapour transport from the groundwater to the soil surface. In the consequence, the watercontent in the soil surface can rise up in summertime in a range of 5m.-%.

This is a new interpretation for the observation of the sinus readings in the sentec probes. The higher humidity in summer time is a matter of fact, confirmed by the repeated measuring of the soil surface with capacity measuring device.

By the help of the 3d scan and the drillholes, compiled in 2011, we have established a precise 3d Map of the pit with accurate distances between the fragment layer and the groundwater table. Because the distance to the groundwater is the most important influencing parameter for the humidity conditions in the fragment layer, this mapping is called as basic risk map 01.

Having better data about the air climatic conditions in the pit, this map, the soil surface readings and the sentec readings enable us, to calculate precise drying and moistening times on every position in the pit.

The results of our project made clear, that the technique of passive moistening is the proper way to protect endangered fragment horizons from damaging dry conditions in the surrounding soil.

The established measuring system with groundwater drillholes, continuous sentec probes and repeatable surface humidity measuring is an excellent working monitoring system for the humidity in the archeological pits of the terracotta army. We recommend to transmit the system to other pits with loess material in the surrounding of Qinshihuangdi's mausoleum.

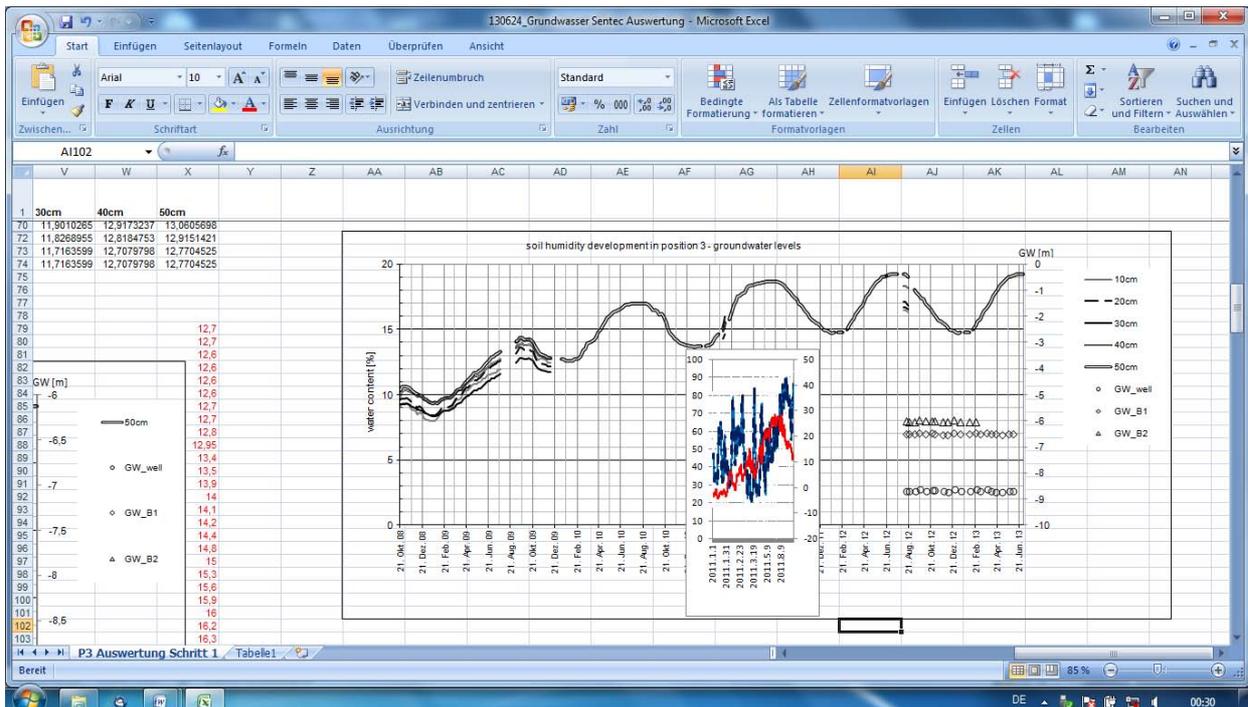


Fig. 19: Soil humidity change, recorded from sentec probe 3, combined with data of the groundwater table and the climate data in the museum hall (relative humidity of the air –blue; air temperature - red)

6. Further project activities in 2012 and 2013

24. Oct. 2012 Miriam Schanz and colleagues from technical center Xi'an have visited our office in Bamberg We showed them selected projects of ProDenkmal GmbH in Bamberg.

June 21.-23 .2013: a group of members of the museum of the terracotta army visited Bamberg. The colleagues Li Bin, Zhou and Lan Desheng were discussing the new results with us in the office of ProDenkmal GmbH.

September 2013: Symposium in Xi'an:
 "Symposium of Qin Terracotta Army and Polychrome Cultural Relicts Conservation and Research"
 Dr. Rupert Utz held a lecture with the title: "Conservation research on earthen structures in the excavation of the terracotta army, challenges, methods, achievements".

7. Supplements

Table 1: capacity measuring in pit 2 2011 and 2012 (averages values, – calculated humidity values (m.-%))

	25.03.2011	21.08.2012	25.03.2011	21.08.2012
area 1	C [nF]	C [nF]	m [m.-%]	m [m.-%]
	average	average	calculated	calculated
SH1	0,05		2,4	
SH2	0,07		2,5	
SH3	0,11		2,5	
SH4	0,06		2,4	
SH6	0,05	0,70	2,4	2,8
SH7	0,05	1,50	2,4	3,0
SH8	0,05	1,50	2,4	3,0
SH5		2,50		3,1
SH1m	2,05		3,0	
SH1f	11,88		4,4	
SH2f	2,78		3,4	
SH3f	17,50		4,6	
SH4m	4,75		3,7	
SH6f	5,65	110,00	3,9	16,7
SH7f	6,38	95,00	3,9	15,3
SH8f	3,65	120,00	3,6	17,6
SH9	0,05	1,50	2,4	3,0
SH9m	0,93	18,00	2,9	4,7
SH10	0,07	2,50	2,5	3,1
SH10m	3,18	65,00	3,5	11,5
SH11	0,05	1,50	2,4	3,0
SH11m	1,00	45,00	2,9	7,9
SH12	0,06	5,00	2,4	3,8
SH12m	2,45	25,00	3,1	4,9

Earth structures in pit 2, Report 2011

Sachstand: 16.06.2014

area 2	25.03.2011	20.08.2012	25.03.2011	20.08.2012
	C [nF]	C [nF]	m [m.-%]	m [m.-%]
area 2	average	average	calculated	calculated
SH 13T	0,06	5,60	2,4	3,9
SH 14	2,30	48,00	3,1	8,5
SH 15	0,70	6,00	2,8	3,9
SH 16	2,58	12,00	3,1	4,4
SH 17	1,55	50,00	3,0	8,9
SH 18	65,13	50,00	11,5	8,9
SH 19	65,50	70,00	11,6	12,3
SH 20	27,50	60,00	5,0	10,7
SH 21	50,25	80,00	9,0	13,6
SH 22	5,20	10,00	3,8	4,3
SH 23	0,88	25,00	2,9	4,9
SH 24	0,13	7,00	2,6	4,0
SH 25	1,18	15,00	2,9	4,5
SH 26	0,48	7,00	2,8	4,0
SH 18f	32,75	140,00	4,8	19,1
SH 19f	15,50	70,00	4,6	12,3

area3	25.03.2011	20.08.2012	25.03.2011	20.08.2012
	C [nF]	C [nF]	m [m.-%]	m [m.-%]
area 3	average	average	calculated	calculated
SH 27 BL	9,60	25,00	4,2	4,9
SH 28BL	1,38	15,00	3,0	4,5
SH 30 F	44,00	200,00	7,7	22,6
SH 29 SF	70,25	160,00	12,3	20,4
SH 31 BL	1,83	20,00	3,0	4,7
SH 32 TL	0,14	3,00	2,6	3,4
SH 33 FL	9,00	35,00	4,2	5,4
SH 36 TL	0,53	15,00	2,8	4,5
SH 35 TL	0,34	15,00	2,7	4,5
SH 34 TL	2,98	35,00	3,4	5,4
SH 37 BL	1,70	13,00	3,0	4,4
SH 38 BL	1,38	16,00	3,0	4,6
SH 39 BL	0,90	13,00	2,9	4,4
SH 42 TL	0,10	3,00	2,5	3,4
SH 41 TL	0,11	2,50	2,5	3,1
SH 40 TL	0,30	10,00	2,7	4,3
SH 43 TL	0,16	2,50	2,6	3,1
SH 44 TL	0,08	1,50	2,5	3,0
SH 45 TL	0,12	4,00	2,6	3,6
SH 48 BL	0,19	7,50	2,6	4,1
SH 47 BL	0,13	5,00	2,6	3,8
SH 46 BL	0,42	7,50	2,8	4,1

	25.03.2011	20.08.2012	25.03.2011	20.08.2012
	C [nF]	C [nF]	m [m.-%]	m [m.-%]
Poultice:	average	average	calculated	calculated
1	0,15	4,50	2,6	3,7
2	28,00	7,00	5,0	4,0
3	29,75	6,00	5,0	3,9
4	29,75	10,00	5,0	4,3
5	0,29	3,00	2,7	3,4
6	17,00	5,00	4,6	3,8
7	27,00	10,00	4,9	4,3
8	32,25	5,00	4,6	3,8
9	2,05	20,00	3,0	4,7
10	0,45	7,00	2,8	4,0
11	0,85	6,50	2,9	4,0
12	1,83	1,00	3,0	2,9
13	0,14	2,50	2,6	3,1
14	17,75	5,00	4,7	3,8
15	65,50	6,00	11,6	3,9
16	35,75	5,00	5,6	3,8
17	15,25	10,00	4,6	4,3

Table 2: surface positions and their distance to the groundwater

Area 1			
Sample name	Moisture [%]	Moisture [%]	groundwater distance (feb. 2013)
	25.03.2011	21.08.1012	
SH1	2,4		7,84
SH2	2,5		7,62
SH3	2,5		7,53
SH4	2,4		7,65
SH6	2,4	2,8	7,69
SH7	2,4	3,0	7,61
SH8	2,4	3,0	7,72
SH1m	3,0		6,72
SH1f	4,4		5,97
SH2f	3,4		
SH3f	4,6		5,78
SH4m	3,7		6,30
SH6f	3,9	16,7	5,90
SH7f	3,9	15,3	5,89
SH8f	3,6	17,6	6,75
SH9	2,4	3,0	7,79
SH9m	2,9	4,7	6,55
SH10	2,5	3,1	7,82
SH10m	3,5	11,5	6,43
SH11	2,4	3,0	7,97
SH11m	2,9	7,9	6,78
SH12	2,4	3,8	7,92
5 SH12m	3,1	4,9	6,67

Earth structures in pit 2, Report 2011

Sachstand: 16.06.2014

Area 2			
Sample name	Moisture [%]		groundwater distance (feb. 2013)
	25.03.2011	21.08.1012	
SH 13T	2,44	3,86	9,51
SH 14	3,05	8,53	7,46
SH 15	2,85	3,91	7,73
SH 16	3,07	4,39	7,72
SH 17			
SH 18			
SH 19			
SH 20			
SH 21			
SH 22			
SH 23	2,89	4,89	7,87
SH 24	2,56	4,01	8,27
SH 25	2,94	4,54	7,80
SH 26	2,78	4,01	8,31
SH 18f	4,76	19,10	6,36
SH 19f	4,56	12,26	6,34

Area 3			
Sample name	Moisture [%]	Moisture [%]	groundwater distance (feb. 2013)
	25.03.2011	21.08.1012	
SH 27 BL	4,23	4,89	7,97
SH 28BL	2,96	4,54	8,57
SH 30 F	7,67	22,62	7,64
SH 29 SF	12,29	20,42	7,52
SH 31 BL	3,01	4,74	8,54
SH 32 TL	2,58	3,43	9,56
SH 33 FL	4,19	5,41	7,81
SH 36 TL	2,80	4,54	9,68
SH 35 TL	2,73	4,54	9,49
SH 34 TL	3,42	5,41	9,35
SH 37 BL	3,00	4,44	8,10
SH 38 BL	2,96	4,59	8,11
SH 39 BL	2,89	4,44	8,55
SH 42 TL	2,51	3,43	9,44
SH 41 TL	2,53	3,07	9,42
SH 40 TL	2,70	4,26	9,17
SH 43 TL	2,59	3,07	8,90
SH 44 TL	2,48	2,98	9,08
SH 45 TL	2,55	3,63	9,06
SH 48 BL	2,63	4,06	8,46
SH 47 BL	2,56	3,78	8,33
SH 46 BL	2,76	4,06	8,04

Table 3: Readings of groundwater - table and bottom of the drillholes

Date/Time	Ground water (well)	bottom (well)	Ground water B1	bottom B1	Ground water B2	bottom B2

2012.08.13 00:00:00	-8,67	-9,04	-6,515	-7,23	-6,025	-6,16
2012.08.20 10:00:00	-8,67	-9,04	-6,505	-7,23	-6,035	-6,18
2012.08.25 00:00:00						
2012.08.31 00:00:00						
2012.09.06 00:00:00	-8,68	-9,05	-6,52	-7,21	-6,04	-6,17
2012.09.12 00:00:00						
2012.09.18 00:00:00	-8,63	-9,06	-6,47	-7,20	-5,98	-6,16
2012.09.24 00:00:00						
2012.09.30 00:00:00						
2012.10.06 00:00:00	-8,69	-9,04	-6,5	-7,21	-6,02	-6,15
2012.10.12 00:00:00						
2012.10.18 00:00:00						
2012.10.24 00:00:00	-8,65	-9,04	-6,48	-7,20	-6	-6,15
2012.10.30 00:00:00	-8,66	-9,04	-6,49	-7,15	-6,01	-6,14
2012.11.05 00:00:00						
2012.11.11 00:00:00						
2012.11.17 00:00:00						
2012.11.23 00:00:00	-8,7	-9,07	-6,54	-7,15	-6,06	-6,16
2012.11.29 00:00:00						
2012.12.05 00:00:00	-8,71	-9,07	-6,55	-7,18	-6,05	-6,17
2012.12.11 00:00:00						
2012.12.17 00:00:00						
2012.12.23 00:00:00	-8,63	-9,06	-6,47	-7,20	-5,98	-6,16
2012.12.29 00:00:00						
2013.01.04 00:00:00						
2013.01.10 00:00:00	-8,68	-9,05	-6,52	-7,21	-6,04	-6,15
2013.01.16 00:00:00						
2013.01.22 00:00:00						
2013.01.28 00:00:00						
2013.02.03 00:00:00	-8,68	-9,05	-6,52	-7,21	-6,05	-6,16
2013.02.09 00:00:00						
2013.02.15 00:00:00						
2013.02.21 00:00:00	-8,63	-9,06	-6,47	-7,20	-6,05	-6,15
2013.02.27 00:00:00						
2013.03.05 00:00:00	-8,68	-9,05	-6,52	-7,21		
2013.03.11 00:00:00						
2013.03.17 00:00:00						
2013.03.23 00:00:00	-8,63	-9,06	-6,47	-7,20		
2013.03.29 00:00:00						
2013.04.04 00:00:00	-8,68	-9,05	-6,52	-7,21		
2013.04.10 00:00:00						
2013.04.16 00:00:00	-8,73	-9,07	-6,5	-7,20		
2013.04.22 00:00:00						
2013.04.28 00:00:00						
2013.05.04 00:00:00	-8,71	-9,07	-6,53	-7,21		
2013.05.10 00:00:00						
2013.05.16 00:00:00						
2013.05.22 00:00:00	-8,7	-9,06	-6,52	-7,25		
2013.05.28 00:00:00						
2013.06.03 00:00:00	-8,68	-9,04	-6,51	-7,22		

8. Mappings

1. Complete ground plan
2. Three cross-section plans A-A'; B-B'; C-C'
3. Basic risk map 01 – distance fragment layer – groundwatertable