



CORNELIA KLEINITZ, THOMAS BAUER UND CLAUDIA NÄSER

OPTISCHE 3D-MESSUNGEN ZUR DIGITALEN BESTANDSDOKUMENTATION VON DEKORIERTEN BAUELEMENTEN UND SEKUNDÄRBILDERN DER GROSSEN ANLAGE VON MUSAWWARAT ES SUFRA: EIN PILOTPROJEKT

I. EINLEITUNG

Die diesjährigen Arbeiten in Musawwarat es Sufra umfassten neben der Fortführung der restauratorischen Arbeiten am Tempel 300 (siehe Scheibner und Mucha in diesem Heft) zwei Projekte, die die Gewinnung von Daten zur digitalen Bestandsdokumentation auf der Basis verschiedener 3D-Messverfahren zum Ziel hatten. Zum einen wurde das gesamte Bauensemble der Großen Anlage per Laserscanverfahren dokumentiert, zum anderen wurden Bestands- und Sicherungsmessungen an dekorierten Bauelementen sowie Sekundärbildern und -inschriften mittels des Streiflichtscanverfahrens durchgeführt. Auf der Basis dieser Daten wurden präzise 3D-Modelle berechnet.

Das erstgenannte Projekt wurde im Rahmen einer Kooperation mit der *School of Architecture, Planning and Geomatics* der Universität Kapstadt unter der Leitung von Prof. Dr. Heinz Rüter durchgeführt. Neben dem einzigartigen Bauensemble der Großen Anlage wurden zusätzlich der Löwentempel und der Innenraum des Großen Hafirs dokumentiert. Ein 3D-Modell der Großen Anlage wird auf der Webseite von *Aluka* der internationalen Öffentlichkeit präsentiert werden. *Aluka* ist eine nichtkommerzielle, globale Kooperation, deren Ziel es ist, das kulturelle Erbe des afrikanischen Kontinents zu bewahren und der interessierten Öffentlichkeit ebenso wie der Wissenschaft leicht zugänglich zur Verfügung zu stellen (siehe www.aluka.org). Im Rahmen von *Aluka* wurden so einzigartige und bedeutende Monumente wie die Felsenkirchen von Lalibela (Äthiopien), die Großen Moscheen von Djenné (Mali) und Kilwa (Tansania), die Forts von Elmina (Ghana) und Lamu (Kenia) sowie die Ruinen von Mapungubwe (Südafrika), mit einem Laserscan-Verfahren erfasst und als detaillierte 3D-Modelle online gestellt. Die Prä-

senz in *Aluka* reiht den Fundplatz Musawwarat es Sufra – der vorerst als einziger Fundplatz aus dem Sudan auf dieser Plattform präsent sein wird – nicht nur in die Gruppe global bedeutender und besonders schützenswerter Monumente afrikanischen Kulturerbes ein, sie wird auch seine Wahrnehmung in diesem Kontext nachhaltig erhöhen.

Die 3D-Architektur-Modelle sind jedoch nicht nur Präsentationsobjekte, sondern auch ein wichtiges Instrument für die weitere wissenschaftliche und denkmalpflegerische Arbeit. Sie können beispielsweise die Grundlage für Schadenskartierungen an der Architektur der Großen Anlage bilden, aber auch bei der Simulierung von Rekonstruktionsvarianten eingesetzt werden, oder die visuelle Basis für einen umfassenden Site-Management-Plan bieten.¹

Das zweite 3D-Projekt galt der digitalen Dokumentation und Bewahrung dekorierte Teile der Großen Anlage.² Während das primäre Dekorati-

1 Ein ausführlicher Bericht über die Ergebnisse dieses Projekts wird in der nächsten Ausgabe der MittSAG publiziert werden.

2 Die 3D-Vermessungsarbeiten wurden durch Dipl.-Ing. Thomas Bauer und Sandra Rackel von der Firma TrigonArt ausgeführt, die bereits umfassende Erfahrungen beim Einsatz dieser Technologie im denkmalpflegerischen Bereich besitzen. Die Konzeption des Pilotprojekts oblag Dr. Cornelia Kleinitz und Prof. Dr. Claudia Näser, Lehrbereich Ägyptologie und Archäologie Nordostafrikas am Institut für Archäologie der Humboldt-Universität zu Berlin. Die Leitung des Pilotprojekts vor Ort übernahm Cornelia Kleinitz. Für ihre logistische Unterstützung in Musawwarat es Sufra sei Rebekka Mucha, Thomas Scheibner, Zaroog Bakri Mohamed Ahmed und Hassan Ibidalla vielmals gedankt. Das Projekt wurde durch das Programm "Kulturerhalt" des Auswärtigen Amtes der Bundesrepublik Deutschland und durch die Sudanarchäologische Gesellschaft zu Berlin e.V. großzügig gefördert. Dem Team aus dem benachbarten Fundplatz Naga, insbesondere Dr. Karla Kroeper, sei an

onsprogramm der Großen Anlage ausgesprochen begrenzt ist, bilden tausende Sekundärbilder einen einzigartigen Korpus informeller Dekorationen, die die Nutzer und Besucher des Baukomplexes seit mehr als 2000 Jahren auf ihren Wänden hinterließen. Die primäre und sekundäre Dekoration der Großen Anlage gehört heute zu den durch Witterungseinflüsse und erhöhtes Besucheraufkommen



Abb. 1: Das Aushausen der Säulenstümpfe vor dem Zentraltempel (Foto: C. Kleinitz).

besonders gefährdeten Komponenten des Baukomplexes. In der aktuellen Kampagne wurden daher in einer Pilotstudie an besonders gefährdeten Dekorationen Sicherungsmessungen unter Zuhilfenahme eines optischen, mobilen 3D-Messverfahrens, das die Oberflächenstruktur von Architekturelementen genau zu erfassen vermag, vorgenommen. Das aus Industrieanwendungen und neuerdings auch aus dem Bereich der Denkmalpflege bekannte berührungslose Streiflichtscanverfahren ist überdies außerordentlich präzise.

Im Rahmen der Pilotstudie wurde untersucht, inwiefern es sich für Bestandsdokumentation und Sicherungsmessungen an Baudekorationen und anderen dekorierten Objekten sowie den Sekundärbildern und -inschriften der Großen Anlage eignet und in welchem finanziellen Rahmen sich eine umfassendere Aufnahme bewegen würde. Im Fall der Sekundärbilder und -inschriften wurde insbesondere getestet, inwiefern 3D-Messungen herkömmliche Dokumentationsmethoden der oft sehr feinen Ritzungen ergänzen und in welchen Bereichen sie diese möglicherweise übertreffen und ersetzen können. Im Hinblick auf die physische Restaurierung vor Ort liefern die 3D-Messungen wichtige Ausgangsdaten für eine Schadenskartierung und damit für die Planung von Bestandsicherungsmaßnahmen. Ebenso können die 3D-Datensets als Grundlagen für die Anfertigung von Repliken dienen.

2. DAS PRIMÄRE DEKOR DER GROSSEN ANLAGE

Im Gegensatz zu anderen Monumenten der meroitischen Zeit besitzt die Große Anlage von Musawwarat nur spärliche Reste eines offiziellen Dekorationspro-

gramms – was unter anderem auch die Rückschlüsse auf Funktion und Auftraggeber des Bauwerks erschwert. Die Hypothese, dass ein umfangreicher bildlicher Schmuck auf einem heute erodierten dauerhaften Putz angebracht gewesen sei, konnte mit verschiedenen Argumenten widerlegt werden (u.a. Kleinitz 2008). Es ist vielmehr davon auszugehen, dass die Anlage tatsächlich außerordentlich karg dekoriert war, die wenigen vorhandenen Reliefs und Bauskulpturen dafür aber sehr markante Akzente in dem sonst schmucklosen Baukomplex setzten. Sie sind daher – und auf Grund ihrer motivischen Einzigartigkeit – umso wichtigere Zeugnisse des meroitischen Kunstschaffens.

Das vorhandene Dekor umfasst zunächst ein einmaliges Ensemble reliefierter Säulen mit szenischen Götterdarstellungen und Säulenbasen in Tierform vor dem Tempel 100 auf der Zentralterrasse. Aus Raum 516 im Bereich der Westkapelle stammen außerdem Fragmente von zwei ebenfalls reliefierten Säulen, die zudem stark erodierte Reste von Kartuschen zeigen. Sie bilden die einzigen, zumindest teilweise erhaltenen Nennungen eines Königsnamens im gesamten Ensemble der Großen Anlage. An ihrer Interpretation hängt zu nicht geringen Teilen die absolut chronologische Einordnung der wichtigsten Baustufen der gesamten Anlage. Traditionell favorisiert wurde die Lesung des besterhaltenen Belegs als *Hpr-k3-r^c* und eine Verbindung mit Arnachamani (235-218 v. Chr.), um dessen Thronnamen es sich handelt. *Hpr-k3-r^c* war jedoch auch der Thronname von Natakamani (ca. 0 - 20 n. Chr.), und jüngst hat Tim Karberg (im Druck) mit guten Argumenten vorgeschlagen, die Kartusche diesem Herrscher zuzuweisen. Weitere Elemente des primären Dekorationsprogramms der Großen Anlage sind zwei Dreiköpfe über den Eingängen des Zentraltempels, die Statuensäulen in Raum 108 auf der Zentralterrasse, der berühmte „Antenelefant“, die vergleichsweise umfangreiche

dieser Stelle ebenfalls herzlich gedankt. Durch eine Teilung der Logistik- und Reisekosten für die Mitarbeiter von TrigonArt konnte der finanzielle Aufwand für die anvisierten Arbeiten gering gehalten werden.



Abb. 2: Die ausgehauste Säulenbasis 3. Blick nach Norden (Foto: C. Kleinitz).

bauskulpturale Ausstattung des Tempels 300 sowie eine von zwei Uräen flankierte Löwenprotome über dem Haupteingang E/305.

Abrasion durch Flugsand, aber auch stehende Feuchte nach der jährlichen Regenzeit sowie anthropogene Einflüsse haben über Jahrtausende die Bausubstanz der Großen Anlage angegriffen. Auch ihre wenigen dekorierten Teile weisen oft starke Verwitterungs- und Verfallsspuren auf. Während einige dekorierte Säulenteile und Bauskulpturen, wie die Statuen der Götter Arensnuphis und Sebiuamek von der Zentralterrasse, bereits in das *on-site*-Museum umgesetzt wurden und somit weiteren negativen Witterungseinflüssen entzogen sind, verblieb die Mehrzahl der Säulentrommeln bisher am Ort ihrer Aufstellung bzw. Auffindung. Dies war unter anderem der intendierten Erhaltung des Gesamteindrucks der Großen Anlage geschuldet.

Einige der Säulenfragmente erwiesen sich jedoch als zu fragil, um der Witterung und den Auswirkungen des zunehmenden Tourismus ohne Sicherungsmaßnahmen ausgesetzt zu bleiben. Sie wurden daher in den 1990er Jahren am Ort ihrer Auffindung durch gemauerte Abdeckungen „eingehaust“ (Wolf und Pittertschatscher 1996). Dies betrifft unter anderem mehrere Säulentümpfe im Eingangsbereich des Zentraltempels 100. Obgleich sie damit zunächst vor Witterungseinflüssen geschützt sind, können die wenig ansprechenden Ziegeleinhausungen *in puncto*

ästhetischer Gesamteindruck und Zugänglichkeit der Monumente für Forschung und Öffentlichkeit keine dauerhaften Lösungen darstellen. Perspektivisch müssen alternative denkmalpflegerische Ansätze gefunden werden, die dem Schutz und der Präsentation dieser Bauelemente in adäquaterer Art und Weise Rechnung tragen.

Die diesjährigen Arbeiten sollten dazu einen wesentlichen Beitrag leisten. Denkmalpflegerische Bestands- und Sicherungsmessungen mittels des Streiflichtscanverfahrens wurden an einer Auswahl der erhaltenen dekorierten Bauelemente der Großen Anlage vorgenommen. Einige der ausgewählten Objekte sind von fundamentaler Bedeutung für die Datierung der Großen Anlage und die Klärung ihrer einstigen Funktion, wie die oben erwähnten Fragmente der Säulen 2 und 3 aus Raum 516. Einige der Säulenteile wurden vor einigen Jahren zusammengesetzt und im *on-site*-Museum aufgestellt. Weitere im Magazin des Grabungshauses befindliche, bislang nicht exakt zugeordnete Fragmente dieser Säulen wurden in dieser Saison ebenfalls messtechnisch erfasst und können nun virtuell in die 3D-Modelle der Säulen eingefügt werden. Drei Säulentümpfe vor dem Zentraltempel 100 wurden ausgehaust, vermessen und nach Beendigung der Arbeiten wieder eingehaust (Abb. 1-3). Aufgrund des hohen Zeitaufwands, vor allem für die Maurerarbeiten, musste



Abb. 3: Detail der Säulenbasis 3 (Foto: C. Kleinitz).

die Pilotstudie auf die Stümpfe der Säulen 3, 8 und 9 im östlichen Bereich des Zentraltempels beschränkt bleiben. Neben diesen teilweise stark verwitterten Stümpfen wurden auch Teile der frei zugänglichen Säule 7 mit ihren noch relativ gut erhaltenen Reliefs präventiv dokumentiert. Auf Grund ihrer motivischen Besonderheiten und ihrer künstlerischen Qualität besitzen diese Objekte einen hohen kunsthistorischen Stellenwert. Zusätzlich zu den anvisierten Arbeiten wurden auf Anregung von Thomas Scheibner Fragmente einer Elefantenprotome im Bereich des Tempels 300 in ihrem ursprünglichen Bauzusammenhang dokumentiert und virtuell mit Teilen des Kopfes des Elefanten zusammengesetzt, der sich bereits seit einigen Jahren im *on-site*-Museum befindet. Die Arbeiten an diesem Bauelement zeigen somit weitere Perspektiven der Nutzung des 3D-Messverfahrens auf.

3. DIE SEKUNDÄRE DEKORATION DER GROSSEN ANLAGE: SEKUNDÄRBILDER UND -INSCRIFTEN

Die bislang unerklärte Zurückhaltung bei der Ausstattung der Großen Anlage mit einem offiziellen Dekorationsprogramm wird durch eine Fülle von nachträglich in die Wände geritzten Darstellungen und Inschriften kontrastiert. Diese so genannten Sekundärbilder und -inschriften stellen einen einzigartigen Korpus nicht-offizieller Kunst der meroitischen und nachfolgenden Perioden dar. Neben mehreren tausend bildlichen Darstellungen wurden auch über 100 Inschriften in meroitischer Kursive sowie die südlichste überhaupt bekannte lateinische Inschrift gefunden. Dieser umfangreiche Gesamtkorpus, der wertvolle Hinweise auf die Lebens- und Gedankenwelten der Menschen der meroitischen und jüngeren Perioden, ebenso wie potentiell auf die im Detail noch immer umstrittene Funktion der Großen Anlage geben kann, ist bislang weitgehend unpubliziert. Bereits seit den 1960er Jahren sind Anstrengungen unternommen worden, den Graffiti-Korpus umfassend zu dokumentieren und in Folge zur Publikation zu bringen. Nach Ursula Hintze (1979) und Pawel Wolf (1994, 1999) widmet sich nun Cornelia Kleinitz in einem neuen Projekt



Abb. 4: Besucherinschrift H. Schliephacks. Zustand Februar 2009 (Foto: C. Kleinitz).

den Graffiti der Großen Anlage von Musawwarat es Sufra (Kleinitz 2008).

Der Schutz und die präzise Dokumentation des einzigartigen Korpus an Sekundärbildern und -inschriften stellen eine besondere Herausforderung dar. Ihr unwiederbringlicher Verlust droht nicht nur durch Erosion aufgrund von Witterungseinflüssen, sondern auch durch die zunehmende Zahl moderner Graffiti, die heutige Besucher in die Wände der Großen Anlage ritzen. Sekundärbilder und -inschriften in exponierter Lage sind besonders von diesen Zerstörungen betroffen. Insbesondere in den touristisch stark frequentierten Bereichen der Zentralterrasse und des Tempels 300 wurde in dieser Saison eine ungewöhnlich hohe Zahl neuer Graffiti, zumeist Inschriften, verzeichnet. So findet sich eine Reihe neuer Graffiti an der westlichen Außenwand des Zentraltempels, unter anderem direkt unter den Besucherinschriften der Lepsius-Expedition von 1844 und der in das Jahr 1906 datierten Inschrift H. Schliephacks (Abb. 4). Im Innenraum des Tem-



Abb. 5: Neue Besucherinschriften auf der Wand 301/302 im Tempel 300, Februar 2009 (Foto: C. Kleinitz).



pels 300 wurden mehrere Namenszüge hinterlassen (Abb. 5-6). Auch aus den Komplexen 200 und 500 sind neue Graffiti zu vermelden, die teilweise direkt antike Sekundärbilder überlagern (Abb. 7). Zusätzlich zu diesen neuen Ritzungen wurden weitere Zerstörungen von Sekundärbildern bzw. -inschriften festgestellt, von denen einige wohl auf die Unachtsamkeit von Besuchern der Großen Anlage zurückgeführt werden können. So wurde zum Beispiel das Sekundärbild eines Fisches, das sich am westlichen Ende der Rampe 119 befindet, im Februar 2009 durch Abrasion teilweise zerstört vorgefunden, während es im Rahmen der Feldkampagne 2008 noch in gutem Zustand dokumentiert worden war (Abb. 8a-b).

Während bei der Aufnahme von Reliefdekor durch das 3D-Messverfahren bereits positive Erfahrungswerte von anderen Fundplätzen, beispielsweise aus Naga (Riedel & Bauer 2008), vorliegen, musste der Erfolg des Verfahrens bei den wesentlich feineren Ritzungen der Sekundärbilder und -inschriften erst erprobt werden. Damit trugen die 3D-Messungen für diese Denkmalgruppe den Charakter einer methodischen Pilotstudie. Bereits im Jahre 1994 hatten K.-P. Gründer, P. Wolf und H.-P. Duwe auf das Potential berührungsloser optischer 3D-Messungen zur



Abb. 6: Neue Besucherinschrift auf der Wand 301W/304 im Tempel 300, Februar 2009 (Foto: C. Kleinitz).

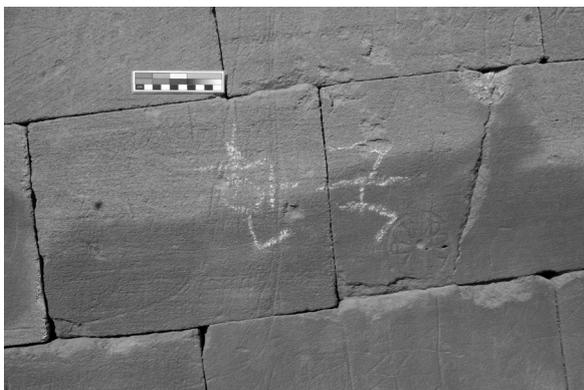


Abb. 7: Neues Graffito auf der Wand 513/510, Februar 2009 (Foto: C. Kleinitz).

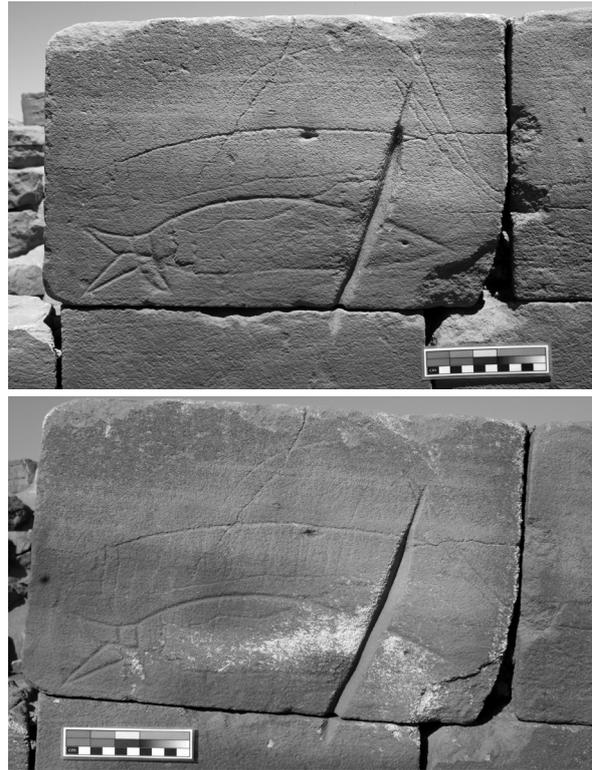


Abb. 8a und b: Graffito eines Fisches, Rampe 119/120, Zustand März 2008 (a) und Februar 2009 (b) (Fotos: C. Kleinitz).

Dokumentation der Sekundärbilder und -inschriften von Musawwarat es Sufra hingewiesen. Zu diesem Zeitpunkt konnte das innovative Messverfahren mit seinen vielfältigen Visualisierungsmöglichkeiten jedoch lediglich unter Laborbedingungen in Berlin an einigen Blöcken mit informellen Zeichnungen und Inschriften aus der Sammlung des damaligen Instituts für Sudanarchäologie und Ägyptologie der Humboldt-Universität zu Berlin getestet werden; eine feldtaugliche Apparatur stand damals noch nicht zur Verfügung (Gründer, Wolf & Duwe 1994).

Im Rahmen des diesjährigen Projekts konnten nun vor Ort einzelne Blöcke und Wandabschnitte mit Sekundärbildern und -inschriften auf insgesamt ca. 9 m² Wandfläche dokumentiert werden. Die Auswahl der erfassten Dekorationen erfolgte aufgrund einer Reihe von Kriterien, die einerseits der Einzigartigkeit und dem Grad der Gefährdung einzelner Graffiti Rechnung tragen und andererseits die Möglichkeiten des 3D-Messverfahrens testen sollten. Dokumentiert wurden Graffiti in den Bereichen 100, 200, 300 und 500 der Großen Anlage. Sie umfassen sowohl großflächige, aber stark angegriffene Darstellungen, wie die Abbildung eines einen Feind jagenden Apedemak in Raum 504, als auch Beispiele sehr viel geringerer Dimensionen, wie die ‚Biertrinker‘ an der Nordwand von Tempel 200. In allen Fällen sollte einerseits der Ist-Zustand der Graffiti dokumen-

tiert und andererseits die Möglichkeit untersucht werden, anhand der 3D-Modelle feine bzw. stark erodierte Ritzlinien in der grobkörnigen, patinierten Oberfläche der Sandsteinblöcke sichtbar(er) zu machen, da diese sonst nur bei bestimmten Lichtverhältnissen – und damit in ihrer Gesamtheit nie zu einem Zeitpunkt gemeinsam – zu erkennen sind. Die Möglichkeit der Manipulation der Richtung(en) des Lichteinfalls in den 3D-Modellen sowie der Simulation von *in natura* nicht gegebenen Lichteinfällen schien hierbei von besonderer Bedeutung für die präzise Visualisierung der Graffiti(reste). Das Graffito ‚Heilige Hochzeit‘ aus Hof 506 hingegen, das in der Feldkampagne 2008 durch Cornelia Kleinitz und Jens Weschenfelder mit sehr gutem Ergebnis neu auf Plastikfolie durchgezeichnet wurde (siehe Kleinitz 2008), wurde gescannt, um die Resultate der unterschiedlichen Dokumentationstechniken direkt vergleichen zu können.

4. DAS 3D-MESSVERFAHREN

4.1. Möglichkeiten und Anwendungen

Das in Musawwarat es Sufra angewandte optische mobile 3D-Messverfahren kommt bereits seit mehreren Jahren insbesondere im Industriesektor für Präzisionsmessungen zum Einsatz. In der Denkmalpflege und der Archäologie wird das berührungslose Streiflichtscanverfahren seit etwa fünf Jahren zur 3D-Vermessung und zum 3D-Scannen von Freiformen, Fassaden, Statuen und Kleinobjekten eingesetzt. Diese Anwendungen umfassen zum Beispiel Beweissicherungsmessungen vor geplanten Restaurierungen, berührungsloses Abformen von gefährdeten Oberflächen, virtuelle Ergänzungen und Modellierungen von Fehlstellen für Reproduktionsprozesse, die Herstellung von fotorealistischen 3D- oder 2D-Dokumentationen und die Berechnung von fotorealistischen 3D-Modellen, aber auch maßstabgetreue Reproduktionen über CNC-Fräs- und Rapid-Prototyping-Verfahren sowie die Herstellung von Kunstgutverpackungen über CNC-Fräsverfahren. Die Weiterentwicklung der hochempfindlichen Messinstrumente in Hinblick auf ihre Robustheit und Mobilität macht heute ihren Einsatz selbst in Gebieten mit extremen Wetterbedingungen (Staub, Hitze, Wind), wie sie in Ägypten oder im Sudan herrschen, möglich. Neben einem Projekt in Santiago de Compostela in Spanien, wurde das Verfahren durch die Firma TrigonArt in den vergangenen Jahren u.a. in Tell el Basta und Tell el Amarna in Ägypten sowie in Naga im Sudan erfolgreich angewendet (Riedel & Bauer 2008).



Abb. 9: Der Streifenprojektionsscanner (Foto: T. Bauer).

4.2. Das Mess-System: Streifenprojektionsscanner PT-1390

Bei dem in Musawwarat eingesetzten 3D-Lichtschnittsscanner mit codiertem Lichtansatz handelt es sich um ein System, mit dem Tiefenaufösungen und Messgenauigkeiten um 0,1 mm erreicht werden können. Der Scanner besteht aus einem Stereoscankopf (Projektor) und zwei CCD-Kameras (Abb. 9). Während der Vermessungsarbeiten werden verschiedene Streifenmuster in bestimmten Intervallen auf das zu vermessende Objekt projiziert (Abb. 10-11). Wegen



Abb. 10: Der Scanner im Einsatz am ‚Biertrinker‘-Graffito, Wand 204/202N (Foto: C. Kleinitz).



Abb. 11: Projektion von Lichtstreifen auf das ‚Biertrinker‘-Graffito, Wand 204/202N (Foto: C. Kleinitz).

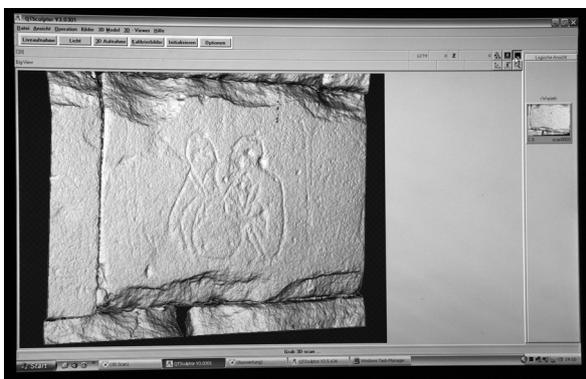


Abb. 12: Punktwolke des ‚Biertrinker‘-Graffitos auf dem Laptop-Bildschirm (Foto: C. Kleinitz).

des zu projizierenden Weißlichtmusters erfolgten die Messeinsätze in den Abend- bzw. Nachtstunden. Die Digitalkameras erfassen die ausgesendete Stereomustersequenz des Scankopfes bzw. der Projektoreinheit. Durch rechnerische Kombination der Streifenmuster-Sequenzen wird die Geometrie des Objektes präzise erfasst, berechnet und als Messpunktwolke gespeichert (Abb. 12).

Durch die Möglichkeit, das Messfenster bzw. den Messbereich variabel einzustellen, ist das Scansystem sehr flexibel einsetzbar. Der kleinste mögliche Messbereich (Makro) liegt bei 25mm x 18mm. Nach oben ist der Messbereich lediglich durch den erreichbaren Kontrast der Streifenprojektion auf der Objektoberfläche begrenzt. Die praktisch getesteten maximalen Messfeldgrößen liegen bei 2,5 m x 2,5 m, es können also auch große Objekte detailliert und mit sehr hohen Auflösungen dokumentiert werden.



Abb. 13: Scanarbeiten an Säule 7 vor dem Zentraltempel (Foto: C. Kleinitz).

Die Auflösung des 3D-Scanners wird durch die Kameraauflösung bestimmt. Bei jeder möglichen Messfeldgröße liegt die Messpunktzahl bei dem eingesetzten Messsystem immer bei 1390 x 1024, also bei 1.423.360 Messpunkten pro 3D-Scan. Trotz der hohen Auflösung kann mit einer hohen Scangeschwindigkeit von 15 Sekunden pro 3D-Scan gearbeitet werden.

Um eine ausreichend hohe Genauigkeit der Aufnahmen zu gewährleisten, mussten vor den jeweiligen Einsätzen in der Großen Anlage die Kalibrierungsparameter des Scanners bestimmt, überprüft und gegebenenfalls neu berechnet werden. Eine Neuberechnung der Scannerparameter wurde, durch Temperaturschwankungen aus den einzelnen Tag- und Nachtperioden, nach etwa jedem dritten Messeinsatz durchgeführt. Die Neuberechnung erfolgte über mitgeführte Kalibrierplatten, die eine Berechnung der Basis und der Winkel zwischen Projektoreinheit und Digitalkameras ermöglichen. Neben dem Scanner und den Kalibrierplatten umfasste die Ausrüstung lediglich ein 1200W-Aggregat zur Stromerzeugung sowie einen Laptop und ein Fotostativ. Der Streifenprojektionsscanner selbst wiegt samt Stativ weniger als 10 kg und kann somit leicht transportiert werden.

4.3. Datenerfassung in der Großen Anlage

Während der diesjährigen Arbeiten in Musawwarat wurden im Bereich der Großen Anlage verschiedene Elemente der primären Dekoration sowie Sekundärbilder und -inschriften dokumentiert (Abb. 13-14). Die Bauelemente der Großen Anlage, d.h. vier Säulenbasen, mehrere Säulentrommeln sowie fünf kleinere Säulenbruchstücke von der Zentralterrasse und aus der Westkapelle sowie die Bruchstücke einer



Abb. 14: Das ‚mobile Büro‘ mit Anzeige des Scanprozesses (Säule 7) auf dem Laptop-Bildschirm (Foto: C. Kleinitz).

Protome in Form des Kopfes eines Elefanten vom Tempel 300, wurden in insgesamt vier Scaneinsätzen dokumentiert. Dabei wurde ein Messfenster von 50 x 50 cm gewählt. Der mittlere Messpunktabstand verhält sich proportional zur Messfeldgröße und betrug hier dementsprechend 0,36 mm. Die ausgegebene mittlere Messpunktgenauigkeit betrug ca. 0,15 mm. Unter Zuhilfenahme eines Spezialstativs konnte der 3D-Scanner auf eine Höhe von ca. 2,50 m gebracht werden. Ein Gerüst war daher nicht notwendig. Bei der Erfassung der Graffiti wurde eine etwas kleinere Messfeldgröße von ca. 30 x 30 cm gewählt. Die Wahl der Messfeldgröße richtete sich hier nach der Oberflächenbeschaffenheit der Sandsteinblöcke und der Feinheit der Linien. Da der mittlere Raster-Messpunktabstand in Abhängigkeit zur gewählten Messfeldgröße steht, betrug der Messpunktabstand nun nur ca. 0,2 mm. Die mittlere Messgenauigkeit lag damit bei ca. 0,1 mm. Innerhalb von drei Messeinsätzen wurden auf Flächen mit Ausmaßen von 0,2 m² bis 4 m² insgesamt 17 räumlich getrennte Graffiti bzw. Gruppen von Graffiti dokumentiert.

4.4. Datenauswertung und Visualisierung

Die Datenauswertung erfolgte zum Teil bereits in Musawwarat und wurde nach bzw. parallel zu den Scanarbeiten durchgeführt. Die Daten der einzelnen Scans wurden in einem ersten Arbeitsschritt über ausreichend große Überlappungsbereiche in den 3D-Aufnahmen von 30% - 50% rein numerisch in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert. Um der Software eine grobe Orientierung der Scans zu ermöglichen, mussten in den Überlappungsbereichen der 3D-Aufnahmen mindestens drei Passpunkte gesetzt werden. Die Verrechnung der Aufnahmen in eine gemeinsame Punktwolke erfolgte nun halbautomatisch und wurde im Anschluss an diesen Arbeitsprozess nochmals optimiert.

Um eine Oberflächenvisualisierung der vermessenen Objekte bzw. Wandflächen durchzuführen, wurden die Messpunktswolken in den darauf folgenden Arbeitsschritten schrittweise trianguliert. Als Triangulierung bezeichnet man die Verbindung der Messpunkte mit einem Flächen- bzw. Dreiecksnetz. Diese Arbeitsschritte werden in bestimmten Iterationsschritten bis zur gewünschten Darstellungsqualität wiederholt. Um die Oberflächen in den gewünschten Auflösungen darzustellen, mussten für die einzelnen Bereiche Modelle mit einer Polygonanzahl von bis zu 40 Millionen als VRML- oder als OBJ-Datensatz ausgegeben werden. Diese Datensätze konnten nun mit spezieller Auswertungssoftware weiterverarbeitet werden.

Bei der Bearbeitung der Säulentrommeln konnten aus den berechneten 3D-Modellen kegelförmige oder gegebenenfalls zylindrische 2D-Abwicklungen ausgegeben werden (Abb. 15-16). Hierzu wurden ein speziell entwickelter Ablauf und eine neue, von

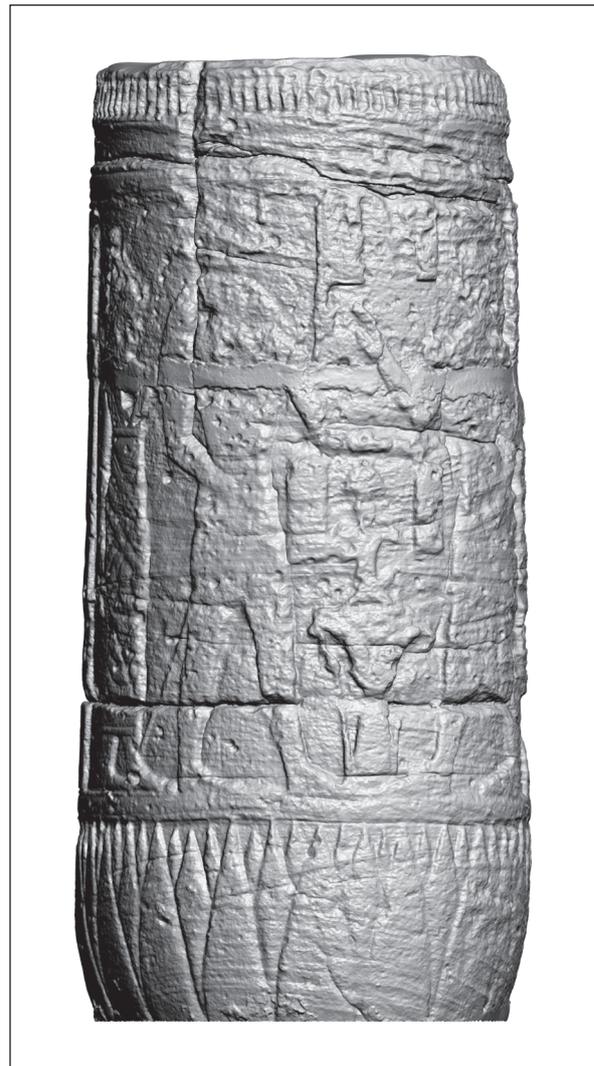


Abb. 15: 3D-Modell der Säule 7, Ansicht von Osten (Bild: T. Bauer).



Abb. 16: Abrollung des 3D-Modells der Säule 7 (Bild: T. Bauer).

der Technischen Universität Chemnitz entwickelte Software in die Prozesse eingebunden. Das Ergebnis ist eine Visualisierung der Säulenoberflächen in abgewinkelter Form. Nach Festlegung der Bildparameter, wie Pixelgröße oder dpi-Zahl, konnten nun

die einzelnen Ansichten und Orthobilder direkt im Maßstab 1:1 als tiff-Bild ausgegeben werden. Die Bildgröße, die im Bildbearbeitungsprogramm angezeigt wird, entspricht somit der Größe des Steinfragments oder Objekts in seinen Originalmaßen.

Durch die Generierung und Erstellung von virtuellem Licht wurden Orthoansichten und Messbilder mit einem vordefinierten künstlichen Schattenwurf (links, rechts, unten und oben) erzeugt (Abb. 17a-d). Die Schatteneinstellungen können durch die Erstellung von künstlichen Lichtquellen so optimiert

werden, dass die Oberflächen optimal ausgeleuchtet werden. Optimal bedeutet hier die Verwendung von mehreren Lichtquellen, so dass ein gleichmäßiger Schatten auf allen eingeritzten Linien (bzw. Reliefkanten) entsteht. Selbst feinste Reste von Sekundär-

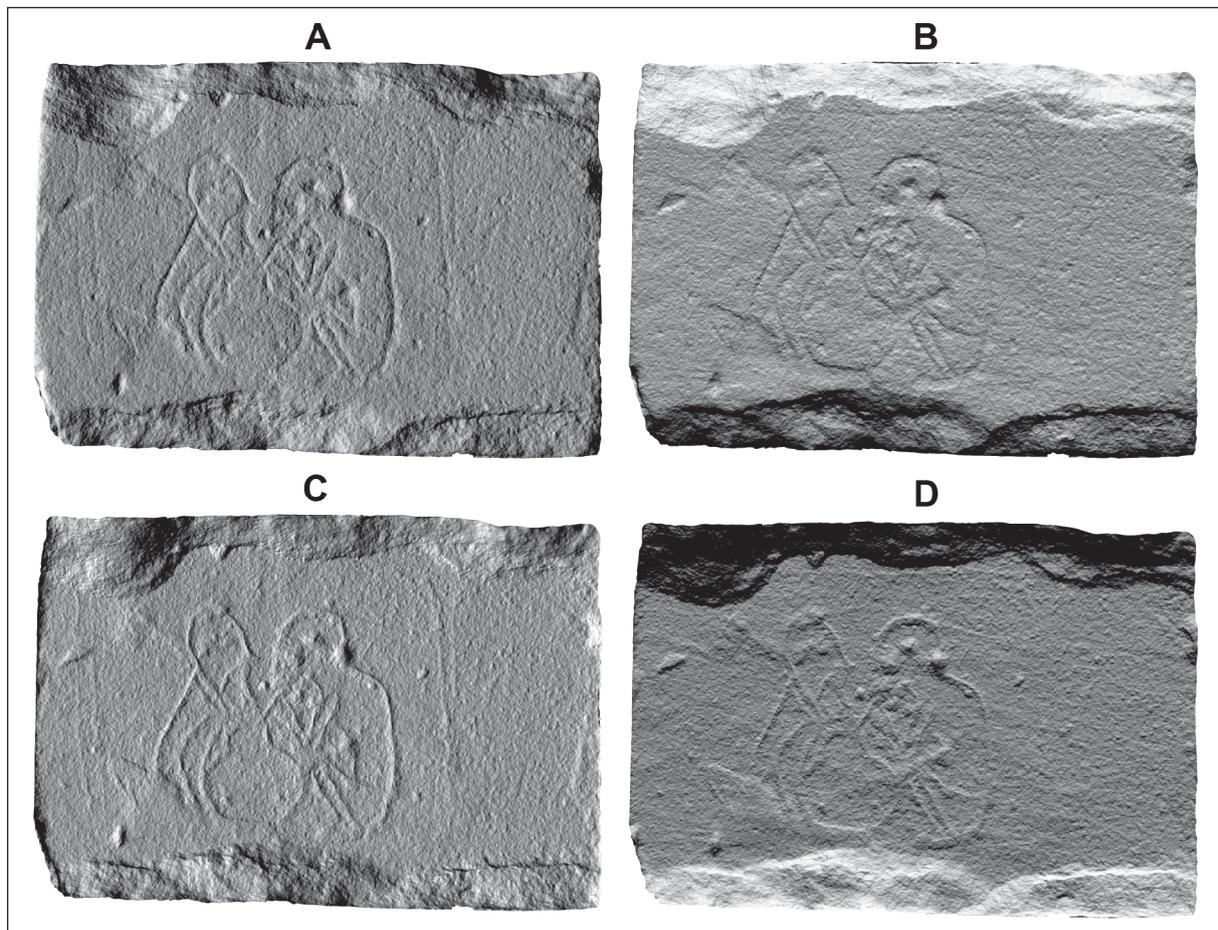


Abb. 17a-d: Orthobilder des ‚Biertrinker‘-Graffitos mit Lichteinfall von links (a), oben (b), rechts (c) und unten (d) (Bilder: T. Bauer).

bildern können so deutlicher und besser sichtbar gemacht werden. Die anvisierte fotorealistische Ausgabe der Datensätze wurde vorerst zugunsten der Ausgabe mit Grauwerttextur zurückgestellt, da in den Grauwertaufnahmen wesentlich mehr Details zu erkennen waren als in den 3D-Modellen mit aufgelegten fotografischen Aufnahmen. Weiterhin verfälschten bei Verwendung aufgelegter fotografischer Aufnahmen unterschiedliche Farbanteile des örtlichen Sandsteines und der stellenweise ungünstige Schattenwurf die Ergebnisse der 3D-Datenauswertung.

Alle erstellten Datensätze wurden in den 3D-Standardformaten *.wrl und *.stl ausgegeben. Weiterhin wurden – wie bereits beschrieben – Messbilder und Abwicklungen von allen vermessenen Objekten und Oberflächen als *.tiff gespeichert. Das Datenvolumen der erstellten Modelle und Messbilder beträgt ca. 40 GB. Mit Hilfe einer vom Fraunhofer-Institut entwickelten Software konnte ein Großteil der Berechnungsprozesse mit einem Standard-Notebook bereits in Musawwarat durchgeführt werden. Ein Teil der komplexen Säulenberechnungsprozesse musste jedoch, wegen der fehlenden Rechenleistung vor Ort, nach Beendigung der Feldarbeiten in Berlin durchgeführt werden.

5. ERSTE ERGEBNISSE

5.1. Baudekoration

Die temporäre Aushausung der Säulenstümpfe 3, 8 und 9 im Eingangsbereich des Zentraltempels (100) erlaubte es zum ersten Mal seit der Mitte der 1990er Jahre, den Zustand dieser Architekturelemente zu begutachten (siehe Abb. 1-3). So zeigen das 3D-Modell und die Abrollung der Säulenbasis 3 eindrücklich sowohl die komplexen Hochreliefs als auch die umfangreichen Schäden, die dieses Bauelement in den vergangenen Jahrhunderten erfahren



Abb. 18: 3D-Modell der Basis der Säule 3 vor dem Zentraltempel, Ansicht von Osten (Bild: T. Bauer).

hat (Abb. 18-19). Während von der Basis der Säule 8 nur noch geringe Reste erhalten sind, vermittelt die Basis der Säule 9 mit ihren Hochreliefs, die einen Elefanten und einen Löwen darstellen, eine Ahnung des visuellen Eindrucks, den die Säulen im Eingangsbereich des Zentraltempels einst boten. Neben dem Säulenstumpf der Säule 9 auf der Zentralterrasse wurde auch das heute im *on-site*-Museum befindliche Relief eines Löwen von der südlichen Seite der Basis gescannt und im 3D-Modell mit der Basis virtuell wiedervereint (Abb. 20a-d).

Im Falle der stark fragmentierten und trotz ihrer Bedeutung für die Datierung der Großen Anlage bislang nur summarisch publizierten Säulen 2 und 3 aus dem Raum 516 (Hintze 1971, 240, Abb. 20 und 21), die derzeit in restaurierter Form im *on-site*-Museum ausgestellt sind, kann nun auf der Basis der Abwicklungen der 3D-Modelle die zeichnerische Dokumentation vollendet werden (Abb. 21).

Die im Pilotprojekt erstellten Datensätze können – wie bereits angedeutet – perspektivisch als virtuelle



Abb. 19: Abwicklung der Basis der Säule 3, Ansicht von Westen (Bild: T. Bauer).

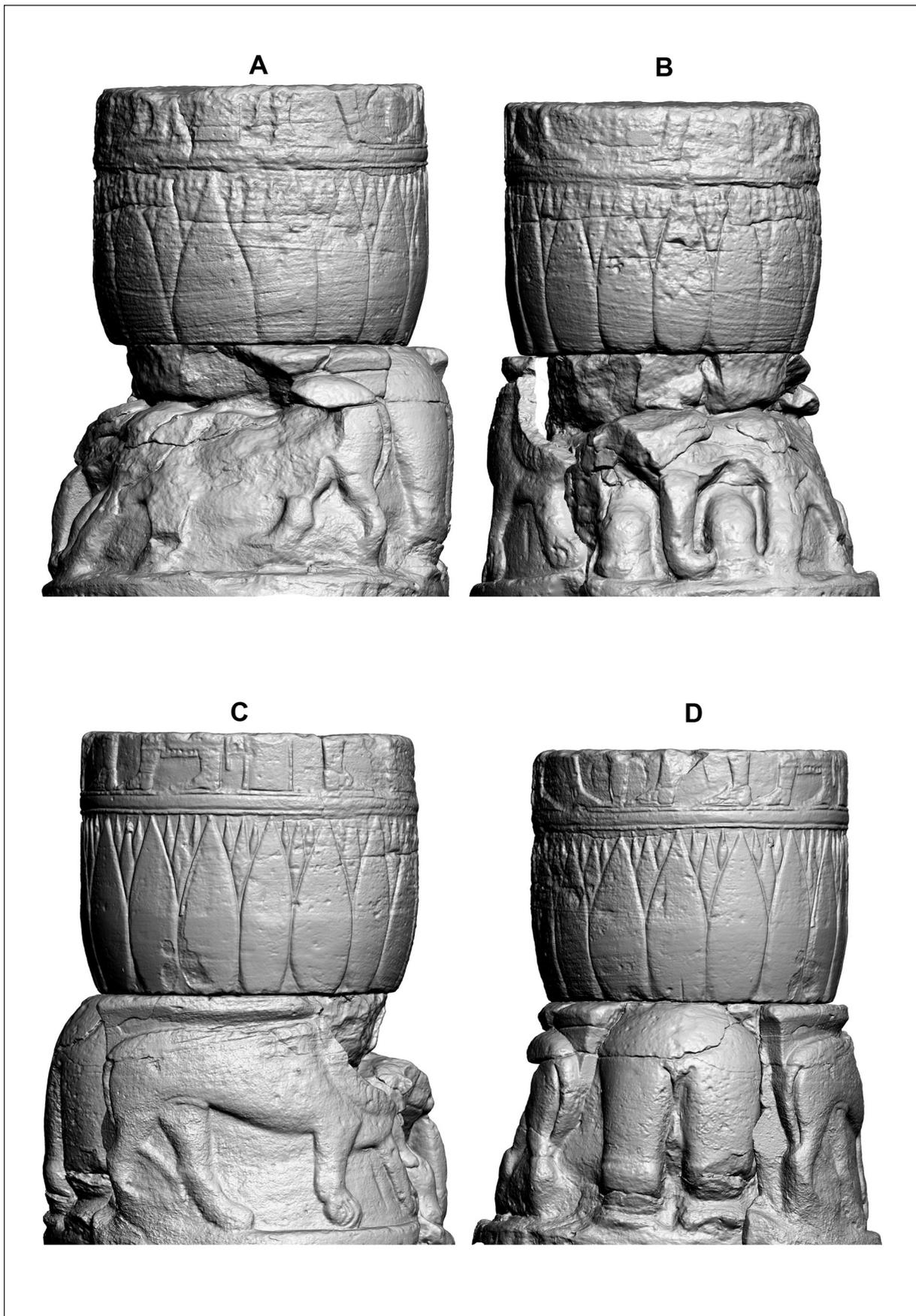


Abb. 20a-d: Ansichten des 3D-Modells der Säulenbasis 9 vor dem Zentraltempel von Norden (a), Osten (b), Süden (c) und Westen (d) (Bilder: T. Bauer).

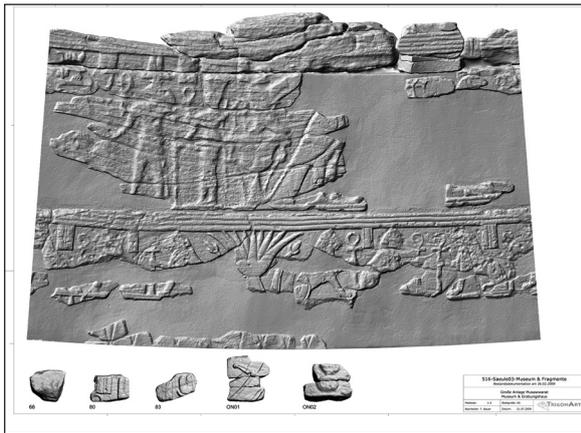


Abb. 21: Abwicklung der Säule 2 aus Raum 516, Standort *on-site*-Museum (Bild: T. Bauer).

3D-Sicherung der oftmals bereits sehr angegriffenen Oberflächen und Objekte verwendet werden. Weiterhin können die sehr hoch aufgelösten Datensätze jederzeit dazu benutzt werden, mittels CNC-Technik präzise Kopien oder Repliken herstellen zu lassen. Ebenso lassen sich virtuelle Rekonstruktionen anfertigen. Eine solche wurde aus den Fragmenten der Elefantenprotome vom Tempel 300, die physisch heute an verschiedenen Orten lagern, erstellt. Dazu wurde der Kopf des Elefanten im *on-site*-Museum erfasst und virtuell mit den *in-situ* dokumentierten Fragmenten des Rüssels am Tempel 300 zusammengeführt (Abb. 22-23; Farbbabb. 7). Die 3D-Daten,



Abb. 22: Reste der Elefantenprotome im südwestlichen Außenbereich des Tempels 300 (Foto: C. Kleinitz).

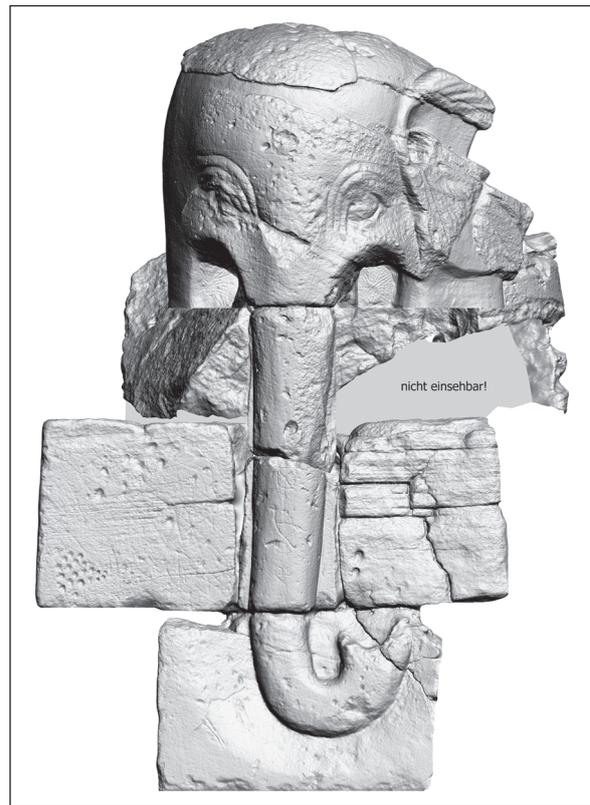


Abb. 23: Virtuelle Rekonstruktion der Elefantenprotome vom Tempel 300 (Bild: T. Bauer).

inklusive der daraus zu errechnenden Angaben zu Volumen, Gewicht und Oberfläche eines Bauelements, können auch logistische Parameter für spätere Restaurierungen liefern.

5.2. Sekundärbilder und -inschriften

Im Vergleich mit anderen Dokumentationsverfahren zeichnet sich das Streiflichtscanverfahren durch seine Präzision und Objektivität aus. Die 3D-Vermessung erlaubt es, die Oberflächen der Sandsteinblöcke mit allen Verwitterungsspuren bzw. Graffiti oder Steinmetzzeichen – je nach Größe des Messfensters – mit Messgenauigkeiten im sub-Millimeter-Bereich zu erfassen (Abb. 24). Während die Oberflächenstruktur der Sandsteinblöcke objektiv durch das 3D-Verfahren dokumentiert und wiedergegeben werden kann, müssen natürlich im Zuge der Auswertung der Daten weiterhin subjektive Entscheidungen darüber getroffen werden, welche der Linien als Verwitterungserscheinung bzw. als anthropogene Bearbeitungsspur, als Steinmetzzeichen bzw. Sekundärbild oder -inschrift anzusprechen sind. Ebenso liegt die Zuordnung einzelner Linien zu bestimmten Sekundärbildern im Ermessen des Betrachters. Die detaillierten 3D-Datensätze ermöglichen es jedoch, solche Entscheidungen zum Beispiel durch Vergleiche des Tiefenprofils der Linien zu substantiieren. Es ist zu



Abb. 24: Orthobild einer Feinddarstellung von Wand 506/508S (Bild: T. Bauer).

erwarten, dass mit ein und demselben Werkzeug von einer Hand eingeritzte Graffiti Regelmäßigkeiten in den Linieneigenschaften aufweisen, die auf der Basis der 3D-Datensätze berechnet und verglichen werden können. Mit Hilfe dieser objektiven Datensätze können somit auch potentiell Fragen zur zeitlichen Abfolge einander überlagernder Graffiti geklärt werden.

Auf der Basis der 3D-Modelle können perspektivisch präzisere Zeichnungen angefertigt werden, als dies allein durch die zeichnerische Dokumentation vor Ort bzw. vom Foto der Fall ist. Hier ist die Möglichkeit der Simulation des Lichteinfalls aus unterschiedlichen Richtungen hervorzuheben, die einerseits die Abhängigkeit von bestimmten tageszeitabhängigen Sichtbarkeitsverhältnissen obsolet macht und andererseits eine optimale, in der Realität nicht anzutreffende, Ausleuchtung der Ritzlinien erlaubt. Durch die exakte Aufnahme der Blockoberflächen und die Möglichkeit der Simulation extremen Streiflichts aus verschiedenen Richtungen können feine Linien nun überhaupt erst sichtbar gemacht und somit erstmals in die Dokumentation und Auswertung einbezogen werden (siehe Abb. 17a-d).

Im Vergleich mit Abformverfahren, wie dem Abdrücken der Sekundärbilder in Aluminiumfolie (Wolf 1999; Kleinitz 2008), sind die 3D-Daten nicht nur detaillierter, da sie das Oberflächenrelief der Sandsteinblöcke direkt dokumentieren, sondern sie liefern auch exaktere Datensätze hinsichtlich der Linienform und ihrer Tiefenkontur. Flache Linien bzw. Abrasionen sowie tiefe Linien bzw. Schäden können zum Beispiel durch Aluabdrücke nur bedingt erfasst werden, da die Aluminiumfolie nicht in ausreichendem Maß verformbar ist. Insgesamt sind die 3D-Daten nicht nur exakter als Aluminium-

abdrücke, sondern auch weitaus besser manipulierbar. Darüber hinaus ist das 3D-Messverfahren als berührungslose Dokumentationsmethode auch aus denkmalpflegerischen Erwägungen den Kontaktmethoden vorzuziehen, da Aluminiumabdrücke (oder auch Latexabklatsche sowie Durchzeichnungen auf Plastikfolie) direkt von den Sandsteinblöcken abgenommen werden und somit fragile Oberflächen weiter schädigen können. Die Dokumentation der Sekundärbilder und -inschriften mit Hilfe des Streiflichtscanverfahrens kann und soll Studien

vor Ort jedoch nicht völlig ersetzen. Anhand der 3D-Modelle bzw. Orthobilder angefertigte Zeichnungen müssen zumindest vor Ort kollationiert werden. Schadenskartierungen sollten abgeglichen und regelmäßig überprüft werden.

Im Rahmen der Pilotstudie wurde exemplarisch auch eine Wand mit zahlreichen, kleinformatigen szenischen Graffiti dokumentiert, bei der die räumliche Anordnung der einzelnen Darstellungen und die genaue Bestimmung ihrer absoluten Position von besonderem analytischen Interesse ist. Es steht nämlich zu vermuten, dass die Sekundärbilder einer Wand bzw. eines Wandabschnittes aufeinander Bezug genommen haben und dass ihr Anbringungs-ort auf die Funktion(en) bestimmter Räume und die Motivation(en) ihrer Herstellung hinweisen könnte. Für die Pilotmessung ausgewählt wurde die Wand 516O/513 mit ihren einzigartigen zoomorphen und anthropomorphen Graffiti, einer meroitischen Inschrift und vielen, über die Wand verteilten und mit bloßem Auge oft kaum erkennbaren, sehr feinen Ritzlinien (Abb. 25). Optimal ausgeleuchtete Orthobilder einzelner Graffitigruppen können zu Analysezwecken nachträglich aus der Wandansicht herausgelöst mit Hilfe digitaler Bildbearbeitungssoftware weiter bearbeitet werden (Abb. 26a-b, 27a-b).

6. ZUSAMMENFASSUNG

Insgesamt sollte die Kampagne 2009 die Grundlage für eine perspektivische Entscheidung über einen systematischen Einsatz der Streiflichtscan-Technologie zur digitalen Dokumentation und Bestands-sicherung primär und sekundär dekorierte Teile der Großen Anlage liefern. Zudem war im Falle



Abb. 25: Orthobild der Wand 516O/513 (Bild: T. Bauer).

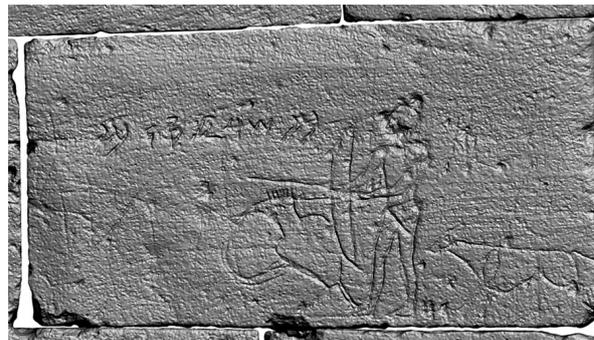


Abb. 26a und b: ‚Jäger‘-Graffito und Inschrift, Wand 516O/513: Foto (C. Kleinitz) und Orthobild mit optimaler Ausleuchtung (T. Bauer).



Abb. 27a und b: ‚Kalbungsszene‘, Wand 516O/513: Foto (C. Kleinitz) und Orthobild mit optimaler Ausleuchtung (T. Bauer).



beider Korpora, d.h. der dekorierten Bauelemente sowie der Sekundärbilder und -inschriften, der zeitliche und finanzielle Aufwand für eine umfassendere Dokumentation zu eruieren. Im Fall der dekorierten Bauelemente wurden daher gefährdete Oberflächen und Objekte virtuell abgeformt und auf der Basis der erhobenen Datensätze 3D-Modelle erstellt. Diese Modelle dokumentieren nicht nur den derzeitigen Bestand, sie können auch die Grundlage für eine – aktuell noch nicht anvisierte – Herstellung von detailgetreuen Repliken bilden. Außerdem dienen sie als Sicherungsmessungen, d.h. Referenzdaten, für spätere Restaurierungen. Die Abnahme der Daten zum aktuellen Zeitpunkt ist also ganz wesentlich eine Investition für die zukünftige praktische restauratorische Arbeit vor Ort. Die in diesem Teilprojekt erhobenen Daten sollen mit der weniger hoch aufgelösten, laserscan-basierten Erfassung des Gesamtensembles der Großen Anlage, die parallel in dieser Feldkampagne von den Kollegen der Universität Kapstadt durchgeführt wurde, verknüpft werden.

Im Falle der Sekundärbilder und -inschriften wurden Effizienz und Adäquatheit der bereits von Gründer, Wolf und Duwe (1994, 102) nach ersten Laborversuchen als „zerstörungsfreie(s) und sehr präzise(s) Verfahren mit hervorragenden Visualisierungsmöglichkeiten“ bezeichneten Dokumentationsmethode mit sehr gutem Ergebnis getestet. Das Messverfahren ist berührungsfrei und damit zerstörungsfrei. Es erlaubt die genaue und objektive Dokumentation der Gesteinsoberflächen inklusive der Ritzlinien samt ihrer Tiefenkontur. Durch die Verwendung einer eigenen Lichtquelle ist das Verfahren unabhängig von bestimmten Lichtverhältnissen, die einzelne Ritzlinien nur zu bestimmten Tagesszeiten sichtbar werden lassen. Letztlich bietet es exzellente Visualisierungsmöglichkeiten, die Simulationen des Lichteinfalls aus unterschiedlichen Richtungen einschließen. Während die abzu-sehenden Kosten eine vollständige Dokumentation der Graffiti wohl nicht zulassen werden, bieten sich 3D-Modelle jedoch als präzise digitale Kopien der Graffiti an, die angesichts ihrer fortschreitenden Zerstörung vor Ort zum (virtuellen) Erhalt der Sekundärbilder und -inschriften beitragen können. Gründer, Wolf und Duwe (1994, 110) resümierten bereits vor fünfzehn Jahren: „Aufgrund der in den ersten Versuchen deutlich gewordenen vorteilhaften Eigenschaften scheint das 3D-Verfahren aber eine ernstzunehmende Ergänzung und Alternative zu den herkömmlichen Dokumentationstechniken zu sein“. Dem können sich die Autoren dieses Berichts nach den diesjährigen Erfahrungen in Musawwarat uneingeschränkt anschließen.

LITERATUR

- Gründer, K.-P., Wolf, P. & H.-P. Duwe (1994): Optische 3D-Messungen an Felsbildern und Graffiti. In: 4. Internationale Konferenz Zerstörungsfreie Untersuchungen an Kunst- und Kulturgütern, Berlin 3.-8. Oktober 1994, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. Berichtsband 45, Teil 1: 102-113.
- Hintze, F. (1971): Musawwarat es Sufra - Vorbericht über die Ausgrabungen des Instituts für Ägyptologie der Humboldt-Universität zu Berlin 1968 (siebente Kampagne), Wissenschaftliche Zeitschrift der Humboldt-Universität zu Berlin, Gesellschaftlich-Sprachwissenschaftliche Reihe 20 (3): 227-245.
- Hintze, U. (1979): The graffiti from the Great Enclosure at Musawwarat es Sufra, In: Hintze, F. (Hrsg.): Africa in Antiquity. The Arts of Ancient Nubia and the Sudan. Meroitica 5. Berlin: 135-150.
- Karberg, T. (i. Dr.): Musawwarat es-Sufra: a Meroitic terrace temple in a Nubian perspective. In: Godlewski, W. (Hrsg.), Proceedings of the 10th International Conference of Nubian Studies, Warschau.
- Kleinitz, C. (2008): Neue Arbeiten zu den Sekundärbildern der Großen Anlage von Musawwarat es Sufra, Der Antike Sudan. MittSAG 19: 27-38.
- Riedel, A. & T. Bauer (2008): Pretty and useful? Three-dimensional computer models as a working tool for documentation and investigation in building archaeology. In: Posluschny, A., Lambers, K. & I. Herzog (Hrsg.): Layers of Perception. Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Berlin, Germany, April 2-6, 2007. Bonn: 141-148.
- Wolf, P. (1994): „Felsbildkunst“ an den Tempeln von Musawwarat es Sufra, Actes de l'assemblée annuelle de l'association des amis de l'art rupestre saharien, (Ingolstadt 21-23 Mai 1993): 37-41.
- Wolf, P. (1999): Arbeitsbericht über die Dokumentation der Sekundärbilder und Sekundärinschriften von Musawwarat es Sufra, Der Antike Sudan. MittSAG 9: 44-51.
- Wolf, P. & M. Pittertschatscher (1996): Vorbericht über die konservatorischen Arbeiten während der Frühjahrskampagne 1995 in Musawwarat es Sufra, MittSAG 4: 15-22.

SUMMARY

A pilot project undertaken in the 2009 field season, at Musawwarat es Sufra, was dedicated to the digital documentation and preservation of decorated architectural elements and graffiti at the Meroitic Great Enclosure. While the primary decorative programme



of this extensive building complex is restricted to column reliefs and a few architectural sculptures, it is characterised by an abundance of secondary decoration in form of thousands of informal graffiti markings. These have been incised into the sandstone walls of the Great Enclosure during the past 2000 years. Modern visitors continue this 'tradition', thereby destroying the often unique ancient incisions. Besides the effects of modern tourism, graffiti as well as column reliefs and architectural sculptures have been subjected for centuries to the detrimental effects of anthropogenic action and accelerating weathering processes.

In order to counter the loss of singular pieces of primary and secondary decoration, a selection of column fragments and sculptures as well as of pictorial and inscriptional graffiti was scanned using mobile optical 3D-scanning technology. Based on the projection of stripes of white light onto the respective surfaces, the relatively new technology is known to provide extremely accurate and objective 3D-models of the surface structures.

The pilot project aimed at evaluating the usefulness of employing 3D-scanning in the context of the preservation and restoration work at Musawwarat es Sufra. In the course of the project several strongly weathered column drums and bases from the 'central terrace' of complex 100 were scanned. These were enclosed with circular brick walls and covered with concrete lids in the mid-1990s. What was planned to be no more than a temporary arrangement for the protection of the column fragments has since become a permanent feature, distorting the visitor experience of the entrance area to Temple 100.

The creation of the 3D-models is a first step on the way to remedy this unsatisfactory situation. The 3D-models provide important reference data for the documentation and evaluation of damage to the objects and for the selection of adequate future conservation strategies. Additionally, the models can potentially serve as blue-prints for the creation of replicas – should originals need to be removed from their present location to a more sheltered place in the on-site-museum.

Further 3D-models were created of two columns from room 516. These carry remains of the only cartouches found at the Great Enclosure and are thus of greatest importance for dating the site. They state the name *Hpr-k3-rꜥ*, which is the throne name of king Arnachamani (235-218 BC) but also, as a

new interpretation of these inscriptions highlights, of king Natakamani (AD 0 – 20). Fragments of these columns were reassembled in the early 2000s and have since been exhibited in the on-site museum. As the 3D-models are precise 1:1 copies of the respective objects in their present state, they can be used as reference data for drawings of these as yet not fully published columns. Lastly, an elephant protome from Temple 300, parts of which are still in situ and other parts of which are exhibited in the on-site museum, was documented and virtually reassembled, pointing to further applications of the 3D-models.

In the case of the graffiti the project aimed at testing to what extent 3D-scanning could complement or even replace traditional documentation methods, such as drawing or tracing. Contrary to these deeply subjective methods, 3D-scanning is objective and the resulting 3D-models are precise copies of the more or less weathered sandstone surfaces with their graffiti, masons marks and other anthropogenic (or natural) markings. 3D-scanning, however, not only helps in preserving the incisions at least in a virtual sense. As a non-contact documentation method, it also avoids damage to the often fragile sandstone surfaces during the documentation procedure. All in all, 17 graffiti or groups of graffiti from complexes 100, 200, 300 and 500 were scanned with very good results. Included among them were the well-known graffiti 'Holy Wedding' (506/508S), 'Apedemak chasing an enemy' (504/510), the 'beer-drinkers' (204/202N) and the entire wall 516E/513 with its intricate scenes involving zoomorphs and anthropomorphs, and its inscriptional graffiti.

The 3D-models also allow simulating very different lighting directions, thus eliminating one of the major drawbacks of conventional documentation methods: the reliance on specific lighting conditions. Different (artificial) lighting directions allow the creation of composite shadows in the finely incised lines, significantly raising their visibility in the 3D-models. While it is quite apparent that the costs involved in 3D-scanning and -modelling will prevent the documentation of the entire graffiti corpus, it is hoped that a larger sample of the graffiti can be scanned – and thus virtually preserved – in the near future.