

Dokumentation und 3D-Modellierung der Petroglyphen von Chichictara (Peru) mittels terrestrischem Laserscanning und Photogrammetrie

M. SAUERBIER¹, P. FUX², M. LINDSTAEDT³, T. KERSTEN³,
J. PETERHANS¹ & M. BELKAID¹

Zusammenfassung: Etwa 400 km südöstlich von Lima und ca. 50 km landeinwärts der peruanischen Südküste nördlich der Ortschaft Palpa befindet sich in einem trockenen Seitenarm des Palpa-Tals der archäologische Fundort Chichictara. Hier wurden 66 mit eingepickten Zeichnungen (Petroglyphen) versehene Felsen entdeckt, die bis heute nicht komplett dokumentiert wurden. Um eine fundierte archäologische Analyse der Petroglyphen zu ermöglichen, führten im September 2006 der Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung der ETH Zürich, die HafenCity Universität Hamburg sowie die Abteilung für Ur- und Frühgeschichte der Universität Zürich eine gemeinsame Feldkampagne zur Erfassung der Petroglyphen mittels Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning durch. Ziel war einerseits die Erstellung eines hochgenauen digitalen Terrainmodells (DTM) des gesamten Tals (ca. 200m x 300m Ausdehnung) durch Laserscanning sowie andererseits die Erstellung detaillierter, texturierter 3D-Modelle der einzelnen mit Petroglyphen versehenen Steine mit anschließender Integration in das DTM. Die photogrammetrischen Bilder der Felsen wurden mittels einer digitalen Spiegelreflexkamera Canon D10 aufgenommen, während das Tal mit einem Laserscanner Trimble GX 200 erfasst wurde. Es werden die Methoden, die zur Bildorientierung und Modellierung der Felsen angewandt wurden, präsentiert und die erreichten Genauigkeiten kritisch analysiert. Weiter werden die Methodik zur Integration der einzelnen, beliebig orientierten 3D-Modelle der Felsen in das Laserscan-DTM mittels 3D-Transformation auf Basis identischer Punkte beschrieben und die geplanten archäologischen Analysen auf Basis des detaillierten 3D-Modells diskutiert. Abschließend werden die durchgeführten Arbeiten im Kontext des interdisziplinären Projektes Nasca/Palpa erläutert. Das Projekt wird von der Schweizerisch-Liechtensteinischen Stiftung für archäologische Forschungen im Ausland (SLSA) finanziert.

1 Einleitung

Seit nunmehr zehn Jahren finden in der weiteren Umgebung von Palpa bei Nasca in der südlichen Küstenregion Perus umfangreiche wissenschaftliche Forschungstätigkeiten statt. Die anfängliche Motivation dieser Aktivitäten war es, das Phänomen der bekannten prähistorischen Geoglyphen von Nasca und Palpa zu verstehen. Die von Menschenhand hergestellten, bis zu mehreren Kilometern langen geometrischen, zoomorphen und anthropomorphen Scharbilder im Wüstenboden sollten in ihrem geografischen und kulturräumlichen Kontext dokumentiert werden, um ihre chronologische Stellung zu definieren und die damalige soziale Funktion interpretieren zu können. Die Geoglyphen werden den archäologisch definierten Kulturen

¹ ETH Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, martin.sauerbier@geod.baug.ethz.ch

² Universität Zürich, Abteilung für Ur- und Frühgeschichte, peterfux@mac.com

³ HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik, [maren.lindstaedt, thomas.kersten]@hcu-hamburg.de

Paracas (800 – 200 v. Chr.) und Nasca (200 v. Chr. – 650 n. Chr.) zugeschrieben. Es war stets klar, dass der Archäologie natur- und ingenieurwissenschaftliche Disziplinen zur Seite stehen müssen, um die kulturellen Hinterlassenschaften sinnvoll erfassen und interpretieren zu können. In Palpa arbeiten daher u.a. Archäologen und Geomatikingenieure eng zusammen, um die kulturelle Entwicklung dieser Region umfänglich nachzuzeichnen (FUX, 2006).

Die prähistorischen Petroglyphen (in den Fels eingepickte Bilder) von Chichictara bei Palpa sind eine reiche Informationsquelle, auf deren eingehende Bearbeitung in der archäologischen Forschung nicht verzichtet werden kann. Ikonografisch können die Felsbilder in die Initial- (1800 – 800 v. Chr.) und Paracas-Zeit (800 – 200 v. Chr.) datiert werden. Die geometrischen, zoomorphen und anthropomorphen Bilder (Abb. 1), nicht zuletzt aber auch ganze Szenen aus dem Alltagsleben, sind Zeitfenster mit Ausblick auf längst vergangene Geschehnisse. Da die Petroglyphen ein künstlerischer Eingriff in die anstehende natürliche Umgebung sind, sollte der topografischen Situation erhebliches Mitspracherecht bei der Interpretation der ursprünglichen sozialen Bedeutung des Ortes und der Ikonografie der Bilder eingeräumt werden. Aus diesem Grund wurde der Fundort, ein seitliches Trockental des unteren Rio Palpa, mittels terrestrischem Laserscanning aufgenommen. Die 66 mit Petroglyphen versehenen Felsbrocken wurden mit Hilfe von photogrammetrischen Methoden dokumentiert. Daraus wird ein 3D-Modell des gesamten Fundortes Chichictara mit seinen Komponenten erstellt. Des Weiteren sollen GIS-basierte Analysen ikonografische Verbindungen mit anderen archäologischen Fundklassen, wie etwa Textilien und Keramik aus kontrollierten Grabungen oder Geoglyphen, evident machen – Steine beginnen über die Vergangenheit zu berichten.



Abbildung 1: Anthropomorphe, zoomorphe und geometrische Petroglyphen in Chichictara

2 Photogrammetrische 3D-Rekonstruktion der Petroglyphen

Die Dokumentation der Petroglyphen von Chichictara sollte im Gegensatz zu traditionellen Methoden der Felsbilddokumentation, die überwiegend auf 2D-Methoden (Zeichnungen, Fotografien, entzerrte Bilder) basieren, im 3D-Raum durchgeführt werden. Die Entscheidung, anstatt einer herkömmlichen 2D-Dokumentation dreidimensionale Modelle der Petroglyphen zu verwenden, entstand aufgrund verschiedener projekt-spezifischer Überlegungen. Einerseits sind die Petroglyphen in ihrem natürlichen Kontext dreidimensionale Objekte, andererseits war von Beginn an eine großräumige Analyse der Petroglyphen geplant, welche eine Einbettung der Petroglyphenmodelle in übergeordnete Geländemodelle erfordert. Diese Entscheidung ist insofern wichtig, als Petroglyphen an weiteren Fundstellen entdeckt wurden und somit in Verbindung mit übergeordneten Digitalen Geländemodellen die Datenbasis für GIS-basierte Analysen geschaffen werden soll.

2.1 Bildaufnahme

Die Bildaufnahme wurde von Ende August bis Mitte Oktober 2006 in Chichictara, Peru, durchgeführt. Innerhalb von sechs Wochen wurden 66 mit Petroglyphen versehene Felsblöcke aufgenommen, jeweils abhängig von der Größe und Komplexität des Objektes mit einer Bildanzahl von 20 bis 80 Bildern pro Block bei einem Bildmassstab von circa 1:100. Die Aufnahmen wurden mit einer digitalen CMOS-Kamera Canon EOS 10D mit einem Bildformat von 3072 x 2048 Pixel gemacht. Um sicherzustellen, dass für die Bildorientierung genügend Verknüpfungspunkte effizient messbar waren, wurden die Felsblöcke mittels Spezialkleber mit ringförmigen Zielzeichen versehen. Zusätzlich wurden jeweils Maßstäbe aufgenommen, um eine Skalierung der nach relativer Orientierung entstandenen beliebig gelagerten und orientierten Koordinatensysteme zu ermöglichen. Die mit Petroglyphen bedeckten Felsen lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Während sich ein Großteil der Petroglyphen auf einzelnen Felsblöcken, die als Felssturz meist im Tal liegen, befindet, wurde ein zweiter Teil der Petroglyphen in die senkrecht stehende Felswand eingepickt. Aus dieser Situation ergeben sich zwei Aufnahmeconfigurationen. Die einzelnen, frei liegenden Felsblöcke wurden mit radialer Netzwerkconfiguration aufgenommen, die an der Felswand befindlichen überwiegend durch genäherte Parallelaufnahmen. Aufgrund der Aufnahmeconfiguration (Bildmaßstab, Distanz zum Objekt, Basis) und der verwendeten Kamera lässt sich eine Genauigkeit der Einzelpunktmessung in X und Y (Lage) von etwa $s_{x,y} \approx 0.8$ mm und in Aufnahmerichtung Z von $s_z \approx 2$ mm erwarten (LUHMANN, 2000), vorausgesetzt dass gut definierte Verknüpfungspunkte auf der Felsoberfläche messbar sind.

2.2 Bildorientierung

Die aufgenommenen Bilder werden zunächst innerhalb des Bildverbandes relativ zueinander orientiert. Hierzu werden die Bildpunkte unter Einsatz der Software PhotoModeler 5.0 manuell gemessen. Zusätzlich zu den signalisierten Punkten werden weitere markante Punkte als Verknüpfungspunkte auf den Felsoberflächen gemessen. Anschließend werden die Parameter der Bildorientierung und der Kamerakalibrierung simultan mittels Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung berechnet, d.h. neben der äußeren Orientierung werden die Koeffizienten K_1 ,

K_2 , K_3 der Objektivverzeichnung, die Koordinaten x_H , y_H der Bildhauptpunkte, die Kamerakonstante c sowie die Bildweite W und die Bildhöhe H mit geschätzt.

Bei den sieben bisher fertig gestellten Bildverbände mit zehn Petroglyphen ergaben sich für die Standardabweichungen der Bildkoordinaten $\sigma_{xy} = 0.9$ bis $\sigma_{xy} = 3.2$ Pixel, was im Objektraum 0.7 bis 2.4mm entspricht. Der Großteil der Blöcke konnte mit Genauigkeiten von etwa einem Pixel orientiert werden; jedoch im Ausnahmefall konnte bei einem ungünstig geformten Fels, der die genaue Definition von Verknüpfungspunkten erschwerte, nur ein σ_{xy} von 2.4 Pixel erreicht werden.

2.3 3D- Modellierung der Felsblöcke und Petroglyphen

Die 3D-Modellierung der Petroglyphen-Felsblöcke wird im Wesentlichen mittels zweier Methoden durchgeführt. Zum einen werden aktuell im Rahmen einer Diplomarbeit Untersuchungen zur automatischen Generierung der digitalen Oberflächenmodelle (DOM) der Felsen sowie der Petroglyphen mittels Matching durchgeführt, zum anderen werden vor allem Felsen mit geometrischer Form manuell modelliert. Möglich ist auch die Kombination beider Methoden, z.B. wenn das automatische Verfahren nur partiell gute Resultate ergibt. In diesem Fall können die Felsen manuell modelliert werden, um dann anschließend die automatisch generierten Oberflächenstücke in dieses Modell zu integrieren.

2.3.1 Automatische Oberflächengenerierung mittels Multiple Primitive Multi Image Matching

Die automatische Generierung von Oberflächen wird mittels der in der Gruppe Photogrammetrie und Fernerkundung der ETH Zürich entwickelten Software SAT-PP (Satellite Imagery Precision Processing) durchgeführt (ZHANG, 2005). Diese Software, ursprünglich für die Auswertung von Satellitenbildern entwickelt, ließ sich auch in der Nahbereichsphotogrammetrie bereits in verschiedenen Anwendungen erfolgreich einsetzen (REMONDINO & ZHANG, 2006).

Aufgrund der umfangreich vorliegenden Bilddaten wurde zur weitergehenden Automatisierung des Auswerteprozesses zunächst ein Python-Skript zur Erzeugung der SAT-PP-Projektdateien erstellt. Dieses Skript liest die benötigten Parameter aus der in PhotoModeler erzeugten Photo Table und speichert sie in den entsprechenden SAT-PP-Dateien ab. Somit können die Orientierungsdaten aller Bilder und Zusatzparameter automatisch nach SAT-PP überführt werden. Zusätzlich wird eine Batchdatei generiert, die ein Programm zur Wallis-Filterung zur lokalen Verbesserung von Kontrast und Helligkeit unter Beibehaltung der Kanten in den Bildern startet.

Zusammen mit den Bilddateien stehen somit alle benötigten Dateien für die Prozessierung in SAT-PP zur Verfügung. Im nächsten Schritt werden in SAT-PP Epipolarbilder inklusive Bildpyramiden erzeugt und anschließend im Stereomodus einige homologe Punkte manuell gemessen, die als Näherungs-DOM für das Matching benutzt werden. Nach der Definition von Masken, die in den beteiligten Bildern die beim Matching zu berücksichtigenden Regionen festlegen, kann der Matchingprozess gestartet werden. Es werden zunächst drei Merkmalsklassen extrahiert - markante Punkte, Rasterpunkte und Kanten - die dann im ersten Schritt je Bildpaar hierarchisch in den Bildpyramiden gematcht werden. Im zweiten Schritt werden diese Merkmale dann mittels Multi-Photo Geometrically Constrained Matching

(ZHANG, 2005) in allen beteiligten Bildern gematcht, wobei ein regelmäßiges Raster im Objektkoordinatensystem als Oberfläche generiert wird. Insbesondere aufgrund der 3D-Extraktion der Kanten eignet sich dieses Matchingverfahren für die Modellierung der Petroglyphen sehr gut, da diese bereits beim Matching erfasst werden (Abb. 2). Die Bildverbesserung mittels Wallis-Filter trägt zur Steigerung der Zuverlässigkeit der gematchten Punkte bei und resultiert in einer höheren Zahl gematchter Interestpunkte. Die Petroglyphen variieren in ihrer Breite zwischen etwa 0.5 cm und 1.5 cm und sind bis zu ca. 0.5 cm tief eingepickt.

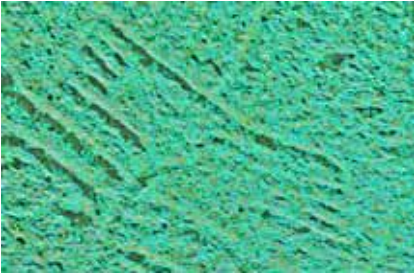


Abbildung 2: Gematchte Interestpunkte, Rasterpunkte und Kanten am Beispiel einer Petroglyphe



Abbildung 3: Manuell modellierter Felsen mit Petroglyphen

2.3.2 Manuelle 3D-Modellierung mit PhotoModeler

Die manuelle 3D-Modellierung wird ebenso wie die Bildorientierung mit dem photogrammetrischen Nahbereichs-Softwarepaket PhotoModeler durchgeführt. Hierzu werden die Felsoberflächen mittels räumlicher Dreiecke modelliert. Die so entstandenen 3D-Flächen werden anschließend automatisch texturiert, nachdem die Bilder in Photoshop radiometrisch angepasst wurden und die Zielzeichen zur besseren Visualisierung heraus retuschiert wurden (Abb. 3). Die manuelle 3D-Modellierung soll zukünftig für die geometrisch einfach geformten Felsen, die mit relativ wenig Messaufwand zu modellieren sind, angewandt werden.

2.3.3 Zur Beurteilung der verwendeten Verfahren

Von einigen Petroglyphen wurden hoch auflösende Detailscans gemacht, die nun dazu dienen, beide Verfahren in puncto Genauigkeit zu vergleichen, was voraussichtlich im Rahmen einer Diplomarbeit an der HafenCity Universität Hamburg geschehen wird. Aufgrund der zeitlich begrenzten Verfügbarkeit des Laserscanners konnten allerdings nicht alle Petroglyphen im Detail gescannt werden. Die Modellierung der Petroglyphen mittels Photogrammetrie ist im Vergleich zur Aufnahme mit Laserscanning in Bezug auf die Auswertung aufwändiger. Zur Generierung der geometrischen Modelle mittels Monoplotting kann hoch auflösendes Laserscanning als effizientere Alternative zur Photogrammetrie betrachtet werden, jedoch sind orientierte Bilder als Zusatzinformation zur Digitalisierung für den Archäologen ein unerlässliches Werkzeug.

3 Erstellung eines Digitalen Geländemodells des Tals von Chichictara mittels terrestrischem Laserscanning

Für die Geländeaufnahme in Chichictara wurde der terrestrische Laserscanner MENSİ GS200 der Firma Trimble eingesetzt. Der Scanner arbeitet mit der Methode des Impulslaufzeitverfahrens und garantiert so eine Reichweite von 200m und mehr. Die Messrate liegt unter realen Bedingungen zwischen 1000 und 2000 Punkten pro Sekunde, die Wellenlänge des Lasers beträgt 532nm. Um die Stromversorgung für Scanner und Notebook im freien Feld zu gewährleisten, wurde ein benzinbetriebener Generator mit einer Leistung von einem KW eingesetzt. Das Scannen diente in erster Linie der Erfassung des Tales, um die einzelnen Felsen mit den Steinzeichnungen im Kontext der Umgebung darstellen zu können. Die Dimensionen des Tales betragen ca. 250m in der Länge, 130m in der Breite bei einer Höhendifferenz von ca. 70m zwischen Talboden und oberer Felskante. Untersuchungen zur Aufnahme digitaler Geländemodelle mittels terrestrischem Laserscanning wurden bereits 2004 am Beispiel einer Ringwallanlage erfolgreich durchgeführt (HÖNNIGER & KERSTEN, 2005).

Die Aufnahme in Chichictara wurde an insgesamt sechs Tagen von 13 freien Scannerstandpunkten durchgeführt. Für die Registrierung der Punktwolken wurden 14 Kugeln als Verknüpfungspunkte im Gelände verteilt und durch eine Netzmessung mit einem Leica TCA 700 in einem lokalen Koordinatensystem bestimmt. Die Standardabweichungen der 3D-Koordinaten lagen nach der Netzausgleichung im Mittel bei 6mm. Mit Hilfe der GPS-Messungen ließ sich das gesamte Netz in das UTM-System, in dem auch alle anderen räumlichen Daten des Projektes Nasca / Palpa vorliegen, transformieren.

Für das Scanning des Geländes wurde eine Auflösung von 15cm auf 100m gewählt. Dadurch war auch in größeren Entfernungen vom jeweiligen Standpunkt eine ausreichende Punktdichte von mindestens 50cm gegeben. Zusätzlich zur Erfassung des Geländes wurden noch hoch auflösende Scans einiger Petroglyphen gemacht, um diese Daten später exemplarisch mit den photogrammetrischen Daten vergleichen und auch kombinieren zu können. Dabei wurden hohe Auflösungen von 3mm und besser auf 10m gewählt. Insgesamt wurden 27 Mio. Punkte aufgenommen, was einer Datenmenge von 512MB entspricht.

Der erste Schritt der Datenauswertung war die Registrierung der Punktwolken, die von verschiedenen Scannerstandpunkten erfasst wurden. Alle Punktwolken, die am gleichen Tag aufgenommen wurden, wurden jeweils im Anschluss an die täglichen Feldarbeiten über die Verknüpfungspunkte zueinander registriert. Anschließend wurden jeweils diese Gruppen von zwei bis drei Standpunkten in ein gemeinsames, lokales Koordinatensystem transformiert. Die Genauigkeiten für die Registrierung lagen für alle Gruppen zwischen 1,5cm und 2,5cm, was für eine Geländemodellierung als ausreichend genau angesehen werden kann.

Im nächsten Schritt wurde ein digitales Geländemodell erstellt. Dafür wurde die Gesamtpunktwolke auf ca. 2 Mio. Punkte ausgedünnt, so dass der Punktabstand noch ca. 50 cm betrug. Dieser Abstand wurde als noch ausreichend erachtet, um das Tal mit all seinen wesentlichen Details modellieren zu können; eine höhere Punktdichte führt aufgrund der hohen Datenmenge zu Schwierigkeiten bei der Bearbeitung am PC und wegen der Geländecharakteristik zu einer unruhigen Geländedarstellung. Die Modellierung des Geländes wurde mit der Software Geomagic (Geomagic Inc.) durchgeführt, eine Darstellung des gesamten

Modells ist in Abb. 4 zu sehen. Für die spätere Visualisierung kann noch Textur z.B. aus ASTER-Satellitenbildern auf das 3D-Modell aufgebracht werden, für die Integration der ausgewerteten Steine genügt jedoch zunächst das reine Modell.

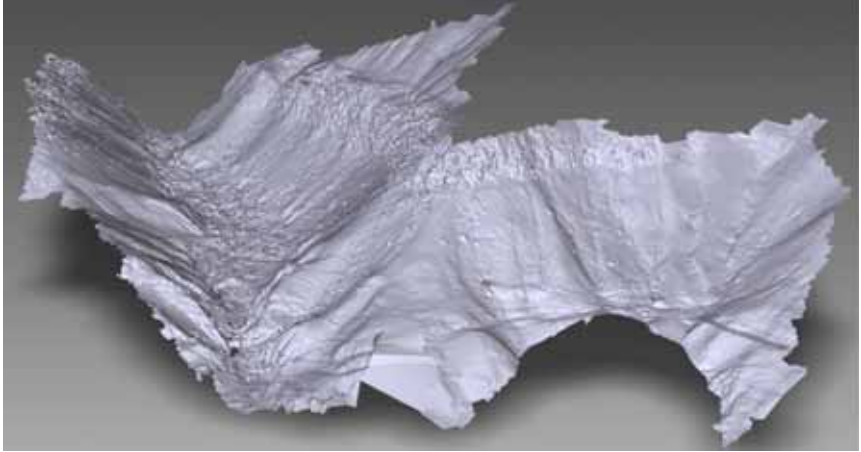


Abbildung 4: Ansicht des mit terrestrischem Laserscanning erzeugten DGM des Chichictara-Tals

4 Transformation der texturierten 3D-Modelle

Die Integration der zunächst beliebig im Raum orientierten - jedoch bereits texturierten - 3D-Modelle der einzelnen Felsen und Felskomplexe in das Gesamtmodell mittels der durchgeführten GPS-Messungen stellte sich aufgrund der durch Abschattungen bedingten schlechten Genauigkeiten von 1m und mehr als relativ ungenaue Methode heraus. Daher wurde entschieden, die genaue Positionierung über identische Punkte im Laserscanning-DGM und den photogrammetrisch generierten Einzelmodellen durchzuführen. Die dafür durchzuführende Transformation der vorliegenden texturierten 3D-Modelle der Felsen soll in Geomagic Studio 9 durchgeführt werden, wobei beachtet werden muss, dass sowohl die Texturkoordinaten als auch die Geometrie korrekt transformiert werden. Die Transformation kann in Geomagic über gemeinsame Punkte durchgeführt werden, die in den photogrammetrisch erzeugten Modellen und dem Laserscanning-DTM manuell gemessen werden müssen. Dieses Verfahren wird derzeit im Rahmen einer Diplomarbeit an der ETH Zürich untersucht.

Sobald das kombinierte 3D-Modell vorliegt, sollen archäologische und räumliche Daten in das an der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit dem DAI (Deutsches Archäologisches Institut, Bonn) erstellte Nasca-GIS, welches zur Analyse der Geoglyphen der Nasca/Palpa-Region dient (LAMBERS & SAUERBIER, 2003), integriert werden. Damit können vor allem bisher nur vermutete ikonografische Zusammenhänge zwischen Geo- und Petroglyphen fundiert untersucht werden.

Im Hinblick auf die ikonografische Auswertung der Petroglyphen wird außerdem ein 3D-Messtool entwickelt, welches den Archäologen eine intuitive und effiziente Möglichkeit der dreidimensionalen Digitalisierung der Petroglyphen auf Basis der texturierten 3D-Modelle mittels Monoplotting erlauben soll.

5 Fazit und Ausblick

Die Petroglyphen von Chichictara und das Trockental konnten durch den Einsatz von Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning effizient erfasst und dokumentiert werden. Terrestrisches Laserscanning erwies sich mangels Eignung von Satellitenbildern und Verfügbarkeit geeigneter Luftbilder als einzige Möglichkeit, das Tal mit dem gewünschten Detailreichtum und hoher Genauigkeit zu erfassen. Mit dem hoch aufgelösten Laserscanning-DTM steht eine wertvolle Datenbasis für weitere Analysen der Petroglyphen in ihrem räumlichen Kontext zur Verfügung. Geplant ist vor allem eine Sichtbarkeitsanalyse der Petroglyphen und der Ikonografie. Die Bildorientierung und 3D-Modellierung der Felsen ist derzeit in Bearbeitung, mit der Digitalisierung der Petroglyphen soll in Kürze begonnen werden.

6 Dank

Die Autoren danken der SLSA (Schweizerisch-Liechtensteinische Stiftung für archäologische Forschungen im Ausland) für die Finanzierung des Projektes. Außerdem gilt besonderer Dank der Kommission für Archäologie Außereuropäischer Kulturen (KAAK) des Deutschen Archäologischen Instituts (DAI) in Bonn für die Unterstützung in Palpa / Peru.

7 Literaturverzeichnis

- FUX, P., 2006: Das Petroglyphen-Projekt «Chichictara» in Palpa, Peru. Feldarbeiten im Jahr 2006 und Ausblick. Jahresbericht der Schweizerisch-Liechtensteinischen Stiftung für Archäologische Forschungen im Ausland 2006. Zürich, in Druck.
- HÖNNIGER, C. & KERSTEN, TH., 2005: Topografische Aufnahme der sächsischen Ringwallanlage Willenscharen mit dem 3D-Laserscanning-System GS100 von Mensi. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 224-231.
- LAMBERS, K. & SAUERBIER, M., 2003: A data model for a GIS-based analysis of the Nasca lines at Palpa, Peru. IAPRS, Vol. XXXIV-5/C15, pp. 713-718.
- LUHMANN, T., 2000: Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, ISBN 3-87907-321-X.
- REMONDINO, F. & ZHANG, L., 2006: Surface reconstruction algorithms for detailed close-range object modeling. IAPRS, Vol. XXXVI, part 3, pp. 117-123.
- ZHANG, L., 2005: Automatic Digital Surface Model (DSM) generation from linear array images. PhD Thesis Nr. 16078, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, 199 S.