

3D – Erfassung und Modellierung des Nordportals des alten Dammes in Marib/Jemen durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning

Anne SOMMER und Thomas KERSTEN

HafenCity Universität Hamburg, Depart. Geomatik, Hebebrandstrasse 1, 22297 Hamburg

Zusammenfassung

Der folgende Beitrag zeigt den kombinierten Einsatz von digitaler Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning bei der 3D Erfassung und Modellierung des Nordportals des alten Dammes in Marib/Jemen. Das antike Bauwerk liegt ca. 150 km östlich der Hauptstadt Sana'a am Rand der innerarabischen Wüste. Die jemenitische Regierung hat die Aufnahme des Bauwerkes in die Liste des UNESCO Weltkulturerbes beantragt.

Das Projekt ist eine Kooperation zwischen der Kommission für Archäologie Außereuropäischer Kulturen des Deutschen Archäologischen Instituts (DAI) in Bonn und dem Department Geomatik der HafenCity Universität Hamburg. Die Objektaufnahme erfolgte im Januar 2006 mit der digitalen Spiegelreflexkamera FujiFine Pix S2 Pro und dem terrestrischen Laserscanner Mensi GS100 während der archäologischen Ausgrabungen. Das Nordportal wurde anschließend für archäologische Untersuchungen (Bestandsdokumentation der Ausgrabungen) und für touristische Werbe- und Publikationszwecke als 3D CAD-Modell rekonstruiert und visualisiert.

1 Einleitung

Der Jemen bietet ein umfangreiches archäologisches Potenzial, doch viele bedeutende Fundstätten sind bislang noch weitgehend unerforscht, wie beispielsweise die antike Sabäerhauptstadt Marib. Im Rahmen des Forschungsschwerpunktes „Antike Wasserwirtschaft“ wurden trotz jüngster politischer Ereignisse, wie der Entführungen im Dezember 2005, seitens der Kommission für Archäologie Außereuropäischer Kulturen des Deutschen Archäologischen Instituts seit 2002 die Reste des antiken Dammes von Marib umfassend ausgegraben, untersucht und restauriert (VOGT et al. 2003). Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) und der Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) finanziert.

Die dreidimensionale Erfassung und digitale Rekonstruktion eines potenziellen Weltkulturerbes benötigt komplexe Datenmengen, da besonders die vollständige Geometrie sowie die Oberflächenbeschaffenheit der Aufnahmeobjekte gefragt sind, um ein möglichst realistisches virtuelles Modell aus den Daten generieren zu können. Deshalb wurde zur Vermessung des Nordportals (Abb. 1) eine Kombination von Photogrammetrie und Laserscanning eingesetzt, um so die spezifischen Vorteile des jeweiligen Aufnahmesystems nutzen und die Effektivität des Auswerteverfahrens in der Denkmalpflege beurteilen zu können. Die Genauigkeitsanforderungen seitens des Auftraggebers liegen bei $\pm 10\text{cm}$ für die Objekt-

punkte, da in der Archäologie eher die Interpretation und die Visualisierung der Bauwerke im Vordergrund stehen. Die kombinierte Auswertung wurde mit dem Programm PHIDIAS durchgeführt, welches bereits bei der Auswertung des Duderstädter Westerturmensembles zum Einsatz kam (KERSTEN et al. 2006). Dabei erwies sich PHIDIAS als sehr effizient, da es die kombinierte Darstellung von digitalen, orientierten Bildern und der georeferenzierten 3D-Punktwolke eines Laserscanners erlaubt. Als Ergebnis der Aufnahme und Konstruktion steht ein dreidimensionales visualisiertes Modell des Nordportals zur Verfügung, das darüber hinaus die Grundlage für ein anschließendes 3D-Geoinformationssystem (GIS) bieten kann. Ein vergleichbares GIS wurde bereits vom DAI in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich für die Geoglyphen von Nasca-Palpa in Peru realisiert, die mit Hilfe photogrammetrischer Methoden kartiert und anschließend in einem 3D-GIS bereitgestellt wurden (LAMBERS 2004).

2 Das Aufnahmeobjekt

Die ehemalige Sabäerhauptstadt Marib liegt etwa 150 km östlich der jemenitischen Hauptstadt Sana'a im Übergangsbereich des jemenitischen Hochlandes zur innerarabischen Wüste Ramlat as-Sab'atayn.



Abb. 1: Luftbild vom Nordportal des Dammes in Marib (Quelle: B. Vogt, DAI)

Im Jahr 548 n. Chr. errichtete die antike Gemeinschaft den Großen Damm von Marib, ein Meisterwerk der damaligen Ingenieurbaukunst. So konnten sich die Bewohner Südarabiens den periodisch auftretenden Monsunregen als Flutbewässerung für die Landwirtschaft zu Nutze machen. Der in der Regel zweimal jährlich heftig auftretende Regen wurde so aufgefangen und in ein umfassendes Bewässerungssystem geleitet.

Die Wassermassen wurden durch einen Erddamm mit so genannter Steinstückung zurückgehalten, welcher an einer verengten Stelle des Wadi Dhana angelegt war. Die Aufgabe des Dammes bestand nun darin, das anströmende Wasser aufzufangen und zu beruhigen. Es sollte jedoch kein Wasserreservoir entstehen, sondern der Wasserspiegel vorübergehend so

weit angehoben werden, dass die erhöht liegenden Feldflächen von der Bewässerung erreicht werden konnten (VOGT 2004).

Am nördlichen und südlichen Ende des Dammes befinden sich Schleusen (Portale), mit denen die Wasserzufuhr auf die Anbauflächen über die Hauptkanäle reguliert werden konnte. Das in diesem Projekt vermessene Nordportal des alten Dammes (Abb. 1) liegt am Fuß des angrenzenden Gebirgszuges. Die Hauptmauern des Bauwerkes säumen ein Becken, in dem die ankommenden Wassermassen beruhigt wurden und anschließend in ein künstliches Kanalsystem mündeten. Von diesem nahm das Wasser über zwölf kleinere Kanäle verteilt seinen Weg in die Oasenflächen. Die Überlaufmauer diente als Hochwasserentlastung.

Mit diesem Wasserwirtschaftssystem konnte einerseits das Wasser aus den Gebirgen zurückgehalten werden, um Überschwemmungen in den Oasen zu verhindern. Andererseits wurde dadurch sichergestellt, dass das Wasser auch die, bedingt durch die zunehmende Sedimentierung des Gebietes, höher gelegenen Anbauflächen erreichte. Das Bewässerungsniveau stieg somit nach jeder Beflutung weiter an (SCHMIDT 1993).

Um die Landwirtschaftsflächen trotzdem mit genügend Wasser versorgen zu können, mussten die Bauwerke aufgestockt werden, damit sie höher liegen als das Bewässerungsniveau. An den Stellen des Nordportals, an denen die Steinverkleidung fehlt, ist deutlich erkennbar, dass die Tosbeckenmauer auf Grund der Sedimentierung und des steigenden Wassers erhöht wurde. Durch das stetige Ansteigen der Sedimentschichten war abzusehen, dass der Damm den Massen und dem Druck nicht mehr standhalten konnte. Nach einer nur sehr kurzen Betriebsdauer kam es zwischen 575 und 600 n. Chr. endgültig zum Bruch des Dammes, der nicht wieder behoben wurde (VOGT 2004). Dadurch kam es zum Erliegen der Wasserwirtschaft und zur Entvölkerung der zuvor blühenden Oase.

3 Die Aufnahmesysteme

Die kombinierte Aufnahme des Nordportals des alten Dammes von Marib erfolgte mit der digitalen Spiegelreflexkamera FujiFine Pix S2 Pro (Fläche des Super-CCD Chips 23,3 mm x 15,6 mm mit maximal 4256 x 2848 Pixel) und dem terrestrischen Laserscanner Mensi GS100 von Trimble. Das Laserscanningsystem, bestehend aus Scanner, Software und Zubehör, arbeitet nach dem Impulslaufzeitverfahren. Bei einer optimalen Messentfernung von 2-100 m beträgt die Messgenauigkeit einer Einzelstrecke 6 mm. Durch eine Winkelauflösung von 0,0018° lässt sich in 100 m Entfernung eine Gitterweite von 3x3 mm realisieren. Der Panorama-View Scanner (360° horizontal, 60° vertikal) kann max. 5000 Punkte/sec messen.

4 Dreidimensionale Objektaufnahme

Die Objektaufnahme erfolgte in Teamarbeit mit drei Studierenden und einem wissenschaftlichen Mitarbeiter der HafenCity Universität innerhalb einer dreiwöchigen Expedition vom 29.12.05 bis 17.01.06. Zunächst wurde die Netz- und Passpunktmessung mit dem Leica Tachymeter TCRP 1201 durchgeführt. Aus einer vorigen Diplomarbeit der HafenCity Universität von F. John standen Festpunkte im UTM-System als Anschluss an ein übergeordnetes Koordinatensystem bereit (JOHN 2005). Bei der geodätischen Netzmessung konnten

auf Grund der eingeschränkten Transportmöglichkeiten nicht ausreichend Stative mitgebracht werden, so dass ohne Zwangszentrierung gemessen werden musste. Außerdem wurde die Zenitwinkelmessung durch die hohe Refraktion signifikant beeinträchtigt. Doch angesichts der späteren Anwendung der Messergebnisse als Präsentations- und Dokumentationsgrundlage sind die Genauigkeitseinbußen durchaus vertretbar.

Die photogrammetrische Aufnahme wurde mit der oben erwähnten Spiegelreflexkamera Fuji S2 mit einem 28 mm Objektiv durchgeführt. Für die Erreichbarkeit einer guten Schnittgeometrie wurde für die Aufnahmen eine ca. 5 m hohe Leiter verwendet (siehe Abb. 2, links), die Aufnahmen auch aus höheren Blickwinkeln erlaubte. Insgesamt wurden 458 Bilder aufgenommen, wobei später für die Auswertung lediglich 138 verwendet wurden. Als photogrammetrische Passpunkte dienten 53 in AutoCAD angefertigte kreisrunde Zielmarken, deren Koordinaten im Zuge der Passpunktmessung bestimmt wurden.



Abb. 2: Photogrammetrische Aufnahme (links), terrestrisches Laserscanning (rechts)

Mit Hilfe des Laserscanners Mensi GS100 (Abb. 1, rechts) konnte die Geometrie des Nordportals dreidimensional und zusätzlich bildhaft durch die reflektierende Strahlungsintensität des Laserstrahls aufgenommen werden. Das Außendienstprogramm PointScape V2.0 diente dabei der Initialisierung des Scanners sowie der Definition des jeweiligen Standpunktes. Nach der Initialisierung wurde im Videobild der scannerinternen Digitalkamera durch die Bestimmung eines Rahmens der zu scannende Bereich festgelegt. Das erwies sich als besonders empfehlenswert, um unnötige Datenmengen der Umgebung zu vermeiden. Für die vollständige Objektaufnahme wurden insgesamt 19 Standpunkte benötigt, von denen die Punktwolken generiert wurden. Des Weiteren wurden von jedem Standpunkt alle sichtbaren Pass- und Verknüpfungspunkte (Kugeln) aufgenommen. Diese Verknüpfungspunkte dienten später zur Registrierung, d.h. zur Orientierung der Scans zueinander. Die Passpunkte wurden während der geodätischen Netzmessung bestimmt, über die die gesamte Punktwolke registriert sowie georeferenziert und somit in das übergeordnete Netz transformiert werden konnte.

5 Auswertung der Objektaufnahme

5.1 Geodätische Netzauswertung mit PANDA

Das Programmsystem Panda diente der Berechnung und Ausgleichung des geodätischen 3D Netzes, das die Grundlage zur Georeferenzierung der photogrammetrischen Bilder und Laserscannermessungen bildete, und berechnete die dafür relevanten netzspezifischen Größen zur Analyse, Optimierung und Bewertung des Netzes.

In der dreidimensionalen Netzmessung konnte eine Standardabweichung für die Richtungs- und Zenitwinkelmessung von ca. 3 mgon und für die Streckenmessung von ca. 3 mm erreicht werden. Bei den ausgeglichenen UTM-Koordinaten der Netzstandpunkte wurde eine maximale Standardabweichung von 1 mm ermittelt. Für die Passpunkte lag die durchschnittliche Standardabweichung in der Lage bei 2 mm und im Maximum bei 10 mm. Die Höhenkoordinaten wiesen eine durchschnittliche Standardabweichung von 3 mm auf, wobei hier der Maximalwert bei 8 mm lag. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Passpunktbestimmung mit einer Genauigkeit von besser als 1 cm erfolgte.

5.2 Registrierung und Georeferenzierung der Punktwolken

Die Registrierung und Georeferenzierung der dreidimensionalen Punktwolken des Laserscanners wurde mit der Software RealWorks Survey 5.0 (RWS) durchgeführt. Die 19 Scannerstandpunkte wurden über mindestens drei der 22 Pass- und Verknüpfungspunkte registriert. Die Genauigkeit der Registrierung betrug maximal $\pm 11,7$ mm. Anschließend konnte die gesamte Punktwolke mit Hilfe von vier koordinierten Passpunkten in das UTM-System mit einer Genauigkeit von 1 cm transformiert werden. Die erreichten Genauigkeiten erfüllten die archäologischen Anforderungen für eine Objektrekonstruktion.

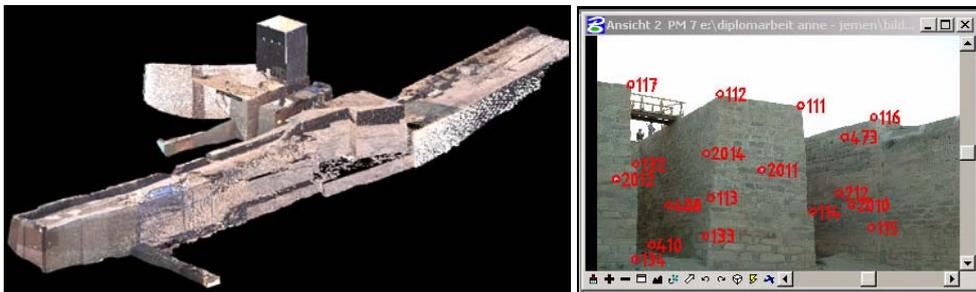


Abb. 3: Punktwolke des Nordportals (links) und Bildpunktmesung in PHIDIAS

Danach wurde die gesamte Punktwolke (28 Mio. Punkte) segmentiert, d.h. unrelevante Punkte, wie Gerüste oder Arbeiter, wurden entfernt. Anschließend lag die gewünschte Punktwolke des Nordbaus (21 Mio. Punkte) vor (Abb. 3 links), die für eine Weiterverarbeitung verwendet werden konnte.

Die Punktwolke wurde nun für die kombinierte Auswertung in PHIDIAS in einzelne zusammenhängende Objektbereiche oder Fassaden gegliedert und im ASCII-Format gespeichert, um so in PHIDIAS eingelesen zu werden.

5.3 Photogrammetrische Auswertung

Die Bildorientierung der 138 digitalen Bilder und die Kamerakalibrierung der Fuji S2 wurde simultan in einer Bündelblockausgleichung mit dem Programm PHIDIAS bestimmt, das eine MDL-Applikation (MicroStation Development Language) für das CAD-System MicroStation ist. Abbildung 3 zeigt exemplarisch Bildpunktmessungen der Pass- und Verknüpfungspunkte. In den Bildern wurden durchschnittlich 27 Punkte gemessen, wobei jeder Objektpunkt durchschnittlich in zehn Bildern gemessen wurde. Dadurch konnten eine gute Verknüpfung des Bildverbandes sowie eine zuverlässige Punktbestimmung gewährleistet werden. Im Zuge der simultanen Kamerakalibrierung wurden vor allem die systematischen Fehler bedingt durch die hohe Objektivverzeichnung kompensiert. Die durchschnittliche Messgenauigkeit der Bildpunkte betrug für $s_x = 7,7 \mu\text{m}$ und $s_y = 7,0 \mu\text{m}$, was einer Lage-messgenauigkeit von ca. $1\frac{1}{2}$ Pixel entspricht. Die Genauigkeit für die Objektpunkte betrug 8 mm. Diese erzielte Genauigkeit im Bildraum blieb unter den bisher erreichten Genauigkeiten anderer Projekte im Bereich der digitalen Architekturphotogrammetrie [KERSTEN et al. 2006], da die Objektpunktdefinition bei diesem antiken Bauwerk nicht immer ganz eindeutig war.

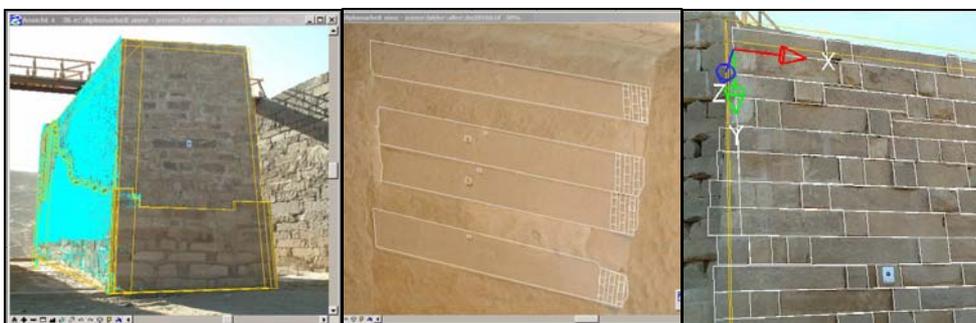


Abb. 4: Kombinierte Darstellung der Punktwolke und Bild (links), detaillierte Auswertung der Einzelsteine (Mitte und rechts)

5.4 Objektrekonstruktion in PHIDIAS

PHIDIAS erlaubt die kombinierte Auswertung der orientierten Bilder mit den georeferenzierten 3D-Punktwolken des Laserscanners. Auf Grund der kombinierten Darstellung von photogrammetrischen Bildern und Laserscannerdaten konnte nun in PHIDIAS eine Digitalisierung des Messobjektes mit Hilfe von CAD-Elementen wie Linien, Polygonen oder Flächen direkt auf dem digitalen, orientierten Bild erfolgen. Dazu wurden die in RWS erstellten Punktwolken der einzelnen Fassaden in PHIDIAS eingelesen (Abb. 4, links). Die Messungen in den orientierten Messbildern lieferten dabei die Lagekoordinaten, während die Z-Koordinate des jeweiligen Punktes in den Punktwolken interpoliert wurde. Die 3D-Information der Punktwolke wurde so mit dem Detailreichtum eines Bildes ergänzt.

Mit Hilfe der Punktwolke konnte eine Hilfsebene festgelegt werden, so dass der Bildpunktstrahl mit dieser Ebene geschnitten wurde und dadurch dreidimensionale Koordinaten des Punktes in einem Bild gemessen werden konnten. Die Hilfsebene konnte durch drei Punkte der Punktwolke, die nicht auf einer Geraden liegen dürfen, definiert werden. Anschließend

konnte die gesamte Punktwolke ausgeblendet werden, um eine bessere Erkennbarkeit des Bildes und schnellere Rechenzeiten zu gewährleisten. Auf dieser Ebene wurde dann das Objekt mit Hilfe von Punkten, Linien oder Polygonen rekonstruiert (Abb. 4). Die geometrischen Elemente wurden als CAD-Objekte in einem DWG-Format abgespeichert, so dass eine anschließende Bearbeitung in AutoCAD erfolgen konnte. Besondere Objektmerkmale wie z.B. bestimmte Steine (Abb. 4, Mitte und links) wurden detailliert ausgewertet, was besonders zeitaufwendig war.

In dem Übergangsbereich der Schleusen und Überlaufmauer wurde für die Modellierung ein Zylinder als geometrisches Primitiv in die Punktwolke generiert (Abb. 5, links). Nach der Rekonstruktion aller Objektbereiche lag in AutoCAD ein vollständiges Volumenmodell des Nordportals vor, das in gerendertem Zustand in Abbildung 5 (rechts) dargestellt ist. Eine detaillierte Beschreibung der Auswertung ist in SOMMER (2006) zusammengefasst.

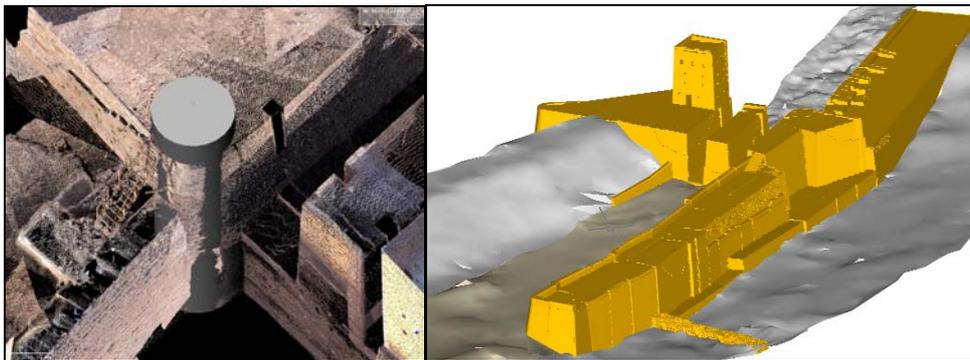


Abb. 5: Generierter Zylinder in der Punktwolke (links), gerendertes Modell in AutoCAD (rechts)

5.5. Objektvisualisierung

Zunächst wurde eine Visualisierung mit AECViz, eine einfache Visualisierungssoftware der Fa. Tornado Technologies Inc. aus Kanada, zur interaktiven Darstellung des Nordportals erstellt, während im zweiten Schritt das Objekt in Highlight Pro mit fotorealistischen Texturen als Videosequenz visualisiert wurde. Der Vorteil von AECViz liegt jedoch in der interaktiven Betrachtung, d.h. der Anwender kann das Modell selbständig drehen, vergrößern und verkleinern, so dass er einen umfassenden Eindruck über das Objekt erhält.

Beim Import des DXF- oder DWG-Files in AECViz wurden alle in AutoCAD definierten Layerstrukturen übernommen. Für jeden einzelnen Layer könnten die Eigenschaften und Farben jedoch hier noch verändert werden. Des Weiteren können die Sonneneinstrahlung und die Lichtverhältnisse nach vorgegebenen Ländern und Orten eingestellt werden. Abschließend konnte ein EXE-File generiert werden, das auf jedem Computer ausführbar ist (Abb. 6, links).

Mit dem Programm Highlight Pro V3 wurde das Bauwerk als Virtual Reality Modell fotorealistisch in einer Videosequenz visualisiert. Die Software gliedert sich in die zwei Teilprogramme Graph und Animate. In Graph erfolgte zunächst der Import einer 3DS-Datei

(Format 3D Studio), die aus den DXF- oder DWG-Formaten in AutoCAD erstellt werden konnte. Da die Bearbeitung der Datei in Graph auf Dreiecken basiert, wurde während des Imports eine Dreiecksvermaschung des Modells durchgeführt. Die Layerstruktur aus AutoCAD konnte ebenfalls übernommen werden, wobei allerdings nur insgesamt 16 Layer verarbeitet werden können, so dass die Layeranzahl vorher in AutoCAD reduziert werden musste. Bei der Layerdefinition bot es sich an, alle Objektbereiche, die später die gleiche Texturierung erhalten sollen, auf einen Layer zu legen. Auf diese Weise konnte die Anzahl der Layer sowie die Arbeit in Animate reduziert werden. Für die Texturierung wurden die Bilder der Photogrammetrie verwendet. Nachdem alle Layer texturiert wurden, lag anschließend ein vollständig visualisiertes Modell des Nordbaus vor (Abb. 6, rechts).

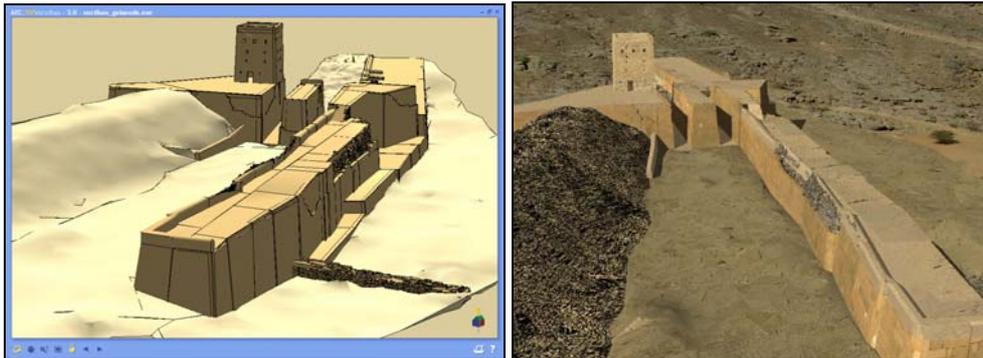


Abb. 6: Visualisiertes Modell in AECViz (links) und Highlight Pro (rechts)

6 Zeitmanagement

Auf der Grundlage eines Zeitmanagements wurde das Projekt hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Effizienz beurteilt. In der Abbildung 7 wird deutlich, dass die Auswertung und die Objektrekonstruktion ca. 80% des gesamten Arbeitsaufwandes einnehmen, was einem Faktor 1: 5 für das Verhältnis Aufnahme zur Auswertung betrifft. Andere Projekte mit Objektrekonstruktion aus reinen Laserscannerdaten haben ein Verhältnis von bis 1:10 für Aufnahme zu Auswertung aufgezeigt (JAHN et al. 2004). Die Objektrekonstruktion konnte hier durch die Kombination von Photogrammetrie und Laserscanning jedoch geringer gehalten werden.

Der Arbeitsaufwand betrug insgesamt 459 Stunden. Wird der Arbeitsaufwand mit aktuellen Stundensätzen für Messgehilfe, Techniker und Ingenieur verrechnet, so ergeben sich Gesamtkosten von knapp € 30'000 für das Projekt. Da es sich jedoch um theoretische Kosten handelt, kann abschließend festgestellt werden, dass der Aufwand und die Kosten des Projektes nicht marktgerecht und nicht wirtschaftlich für reine Visualisierungsaufgaben erscheinen. Jedoch stellt die genaue und detaillierte Auswertung des antiken Bauwerks einen hohen Wert als Bestandsdokumentation und somit für weitere archäologische Untersuchungen dar.

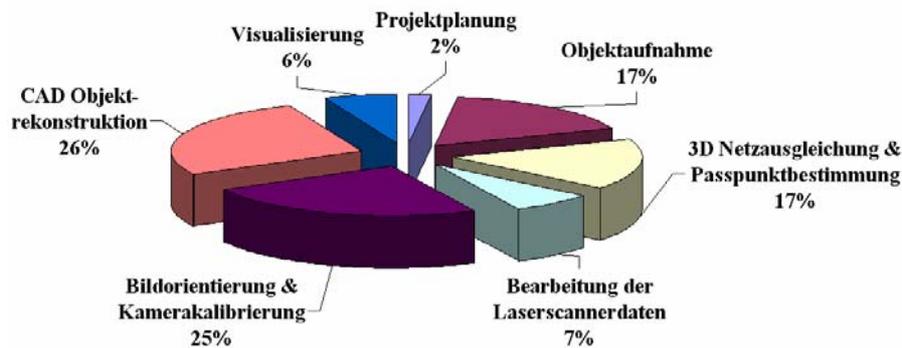


Abb. 7 Arbeitsaufwand im Projekt “Nordportal des alten Dammes in Marib/Jemen“

7 Fazit und Ausblick

Das Nordportal des antiken Dammes in Marib wurde erfolgreich durch Kombination von Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning vollständig dreidimensional aufgenommen, modelliert, rekonstruiert und visualisiert. Die dafür eingesetzte digitale Spiegelreflexkamera Fuji S2 sowie der terrestrische Laserscanner Mensi GS100 ermöglichten dabei eine Auswertegenauigkeit von ca. 1 cm. Damit konnten die Anforderungen des Auftraggebers von maximal 10 cm erfüllt werden. Die ausgewertete 3D-Daten können für Publikationszwecke (Bestandsdokumentation) verwendet werden.

Die kombinierte Auswertung erfolgte mit dem MicroStation PlugIn PHIDIAS der Firma Phocad, Aachen. Aufgrund der Erfahrungen der Autoren in ähnlichen Projekten konnte hier festgestellt werden, dass die Software eine sehr effiziente Auswertung erlaubte und der Zeitaufwand wegen der kombinierten Nutzung photogrammetrischer und Laserscannerdaten für steingerechte Auswertung möglichst gering gehalten werden konnte. Da in der Archäologie, der Architekturphotogrammetrie und der Denkmalpflege keine sehr hohen Genauigkeiten gefordert sind, erweist sich der Einsatz digitaler Spiegelreflexkameras als besonders effizient. Im Vergleich zu Messkameras zeichnen sich diese Kameras durch geringe Anschaffungskosten aus und sind außerdem leichter zu handhaben und zu pflegen. Trotzdem bieten sie für Anwendungen in der Architekturphotogrammetrie ein hohes Genauigkeitspotenzial von 1-2 cm.

Der Einsatz eines Laserscanners ist nur zu empfehlen, wenn bereits entsprechendes Instrumentarium und die dazugehörige Software vorhanden sind, da die Rekonstruktion antiker Bauwerke auch nur durch Einsatz der Photogrammetrie zu realisieren ist. Somit wäre der Einsatz eines Laserscanners auf Grund der Zeitersparnis, aber auch wegen der hohen Anschaffungskosten vor Projektbeginn abzuwägen. Durch dieses Projekt konnte gezeigt werden, dass das hybride Mess- und Auswerteverfahren eine sinnvolle Möglichkeit bietet, das zukünftige Weltkulturerbe als Virtual Reality Modell zu rekonstruieren und zu visualisieren, um darüber zu informieren und um Interesse zu wecken. Außerdem bietet dieses visualisierte 3D-Modell eine optimale Basis für den Aufbau eines dreidimensionalen Geoinformationssystems (GIS), das zukünftig in weiteren Arbeiten realisiert werden soll. Auf diese

Art können sich Interessierte interaktiv in dem Modell bewegen und weitere Informationen über Geschichte, Entstehung oder kunsthistorische Aspekte erlangen.

8 Dank

Die Autoren bedanken sich bei Dipl.-Ing. K. Mechelke, Dipl.-Ing. H. Sahl (beide HCU Hamburg) und bei Dipl.-Ing. B. Blaich (Fachhochschule Lippe und Höxter) für die Unterstützung bei der Datenerfassung im Jemen.

9 Literatur

Jahn, I., Kersten, Th., Kinzel, R. (2004). *Erfahrungen mit einem 3D-Laserscanning-System bei der Erfassung einer Industrieanlage und des Lübecker Holstentores*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 222-229.

John, F., 2005: *Anlage von 3D-GPS-Grundlagenetzen und topographische Geländeaufnahme durch kinematisches GPS im Jemen*. Unveröffentlichte Diplomarbeit der HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik, 97 Seiten.

Kersten, Th., Biebermann, M., Schneider, M., 2006: *3D-Erfassung und Modellierung des Duderstädter Westerturmenssembles durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning*. Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D – Tage 2006, Th. Luhmann und Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 254 – 263.

Lambers, K., 2004: *The Geoglyphs of Palpa, Peru: Documentation, Analysis and Interpretation*. Dissertation, Universität Zürich, 214 S.

Schmidt, J., 1993: *Die antike Wasserwirtschaft von Marib*. Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft, Heft 18, Seite 55-76.

Sommer, A., 2006: *3D – Erfassung und Modellierung des Nordportals des alten Dammes in Marib/Jemen durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning*. Unveröffentlichte Diplomarbeit der HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik, 106 Seiten.

Vogt, B., Brettschneider, W., Brunner, U., Herberg, W., Röring, N., 2003: *Der Große Damm von Marib, Republik Jemen. Neue archäologische und bauhistorische Forschungen des Deutschen Archäologischen Instituts 2002*. Allgemeine und Vergleichende Archäologie - Beiträge 23, pp. 49-74.

Vogt, B., 2004: *"Š und wir schickten über sie die Überschwemmung der Dämme" - Forschungsschwerpunkt Antike Wasserwirtschaft*. Kommission für Allgemeine und Vergleichende Archäologie (Hrg.), Expeditionen in vergessene Welten. 25 Jahre archäologische Forschungen in Amerika, Afrika und Asien. Allgemeine und Vergleichende Archäologie - Forschungen 10, Aachen, pp. 243-262.