

Leipzig – Petersstrasse 33

Grabung L103 - Karstadt Areal



Test-Dokumentation 3D Laser Scanner

Bericht an das Sächsische Landesamt für Archäologie

Messung:

DI Nikolaus Studnicka, Riegl-LMS GmbH

DI Dirk Fichtmüller, Sächs. LA für Archäologie

Dr. Wolfgang Neubauer, VIAS-Vienna Institute for Archaeological Science

Auswertung und Bericht:

Dr. Wolfgang Neubauer, VIAS-Vienna Institute for Archaeological Science

Inhaltsverzeichnis

1 Fragestellung.....	3
2 Grundlagen der Methodik.....	4
3 Messgerät und Messvorgang.....	6
4 Auswertung	9
4.1 Kombinierte Auswertung	9
4.2 3D Punktwolke	10
4.3 Triangulierte Punktwolke	15
4.4 Höhenschichtenmodell	18
4.5 Orthofoto in RiSCAN PRO.....	20
4.6 Drahtgittermodell	23
4.7 Orthofoto in PHIDIAS	26
4.8 Archäologische Interpretation im GIS	27
5 Literatur.....	29

Mag.Dr. Wolfgang Neubauer
Geophysikalische Prospektion, Geodäsie und Photogrammetrie
VIAS-Vienna Institute for Archaeological Science
Franz Klein-Gasse 1/V
A-1190 Wien

Email: Wolfgang.Neubauer@univie.ac.at
Tel.: 0043 664 60277 22404

1 Fragestellung

Das Ziel der durchgeführten Dokumentation war die vollständige dreidimensionale Erfassung der in der Petersstrasse 33 freigelegten Kellerräume mittels eines 3D Laser Scanners. Die Parzelle war zum Zeitpunkt der Aufnahme noch nicht in allen Bereichen vollständig ausgegraben. Der West- wie auch der Ostteil der Parzelle war nur teilweise freigelegt. Im zentralen Bereich der Parzelle sind zahlreiche Nischen vorhanden. Im westlichen Teil der Parzelle ist eine über eine Treppe von Norden her zugängliches Gewölbe noch vollständig erhalten. Der Messbereich Petersstrasse 33 war für die 3D Laser Scanner Dokumentation vollständig zugänglich, wofür wir der Grabungsleitung und dem Grabungsteam wie auch für die Unterstützung vor Ort herzlich danken möchten.



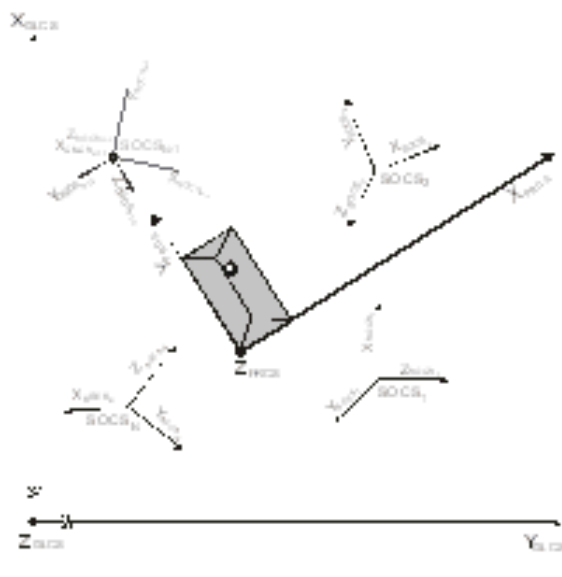
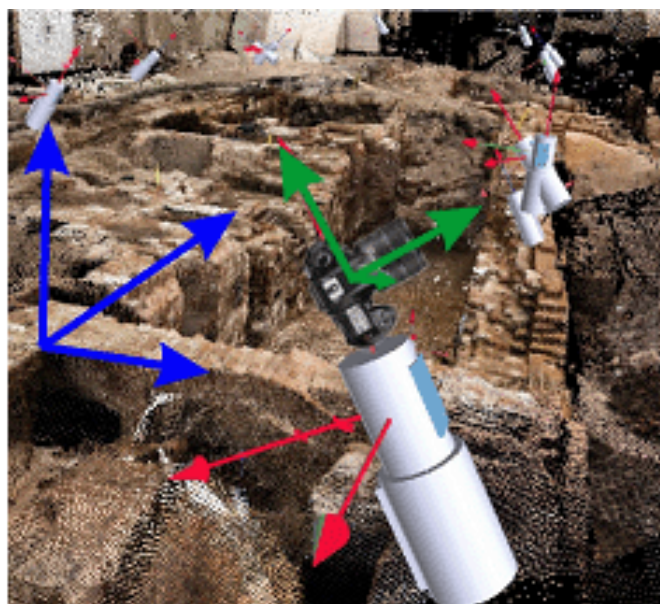
Abb. 1: Draufsicht und Schrägansicht der auf eine Auflösung von 0.4 gon reduzierten Punktwolke der Ausgrabung Petersstrasse, Karstadt-Areal.

Die Aufgabe war anhand des vorliegenden Beispiels die Einsatzmöglichkeiten eines 3D Laser Scanners in der Stadtarchäologie zu testen. Dabei wurde auf die Genauigkeit der Dokumentation einerseits, wie auch die Möglichkeiten der weiteren Auswertung der Scannerdaten in Form von triangulierten Netzen (TIN, mesh), Orthophotos, Kantenmodellen und die zeichnerische Umsetzung von Maueransichten wert gelegt.

2 Grundlagen der Methodik

Die 3D Laser Sensoren der Firma RIEGL LMS ermöglichen die Erfassung dreidimensionaler Information von beliebigen Oberflächen mit hoher Geschwindigkeit und Auflösung in einem Abstand von 1–800 m in einem Sichtfeld von $80 \times 360^\circ$. Die Messung basiert auf der Ermittlung der Laufzeit von Infrarot Impulsen und kombiniert mit einer opto-mechanischen Scannvorrichtung. Der Laser Scanner misst im Prinzip die Distanz zu einem Zielpunkt und gleichzeitig den entsprechenden Vertikal- und Horizontalwinkel. Im Gegensatz zu einer Totalstation muss der Messstrahl nicht auf einen Zielpunkt ausgerichtet werden, sondern misst in einem regelmäßigen polaren Raster im Sichtfeld des Instruments.

Diese Technologie liefert dichte und sehr genaue Punktwolken der gescannten Oberflächen. Zusätzlich wird Information zur Reflektivität (Reflexionsintensität) und ein RGB Farbwert zu jedem gescannten Datenpunkt oder ein hochauflösendes digitales Foto erfasst, die direkt für eine Texturierung der aus den Punktwolken generierten 3D Datenmodelle genutzt werden können. Vereinfacht gesagt wird in einem Messdurchgang die Geometrie wie auch ein digitales Farbbild der gescannten Umgebung erfasst.



CMCS

CaMera Coordinate System

SOCS

Scanner's Own Coordinate System

PRCS

PRoject Coordinate System

GLCS

GLobal Coordinate System

Abb. 2: Beispiel für mehrere Koordinatensysteme die innerhalb eines einzigen Projektes verwendet werden.

Der primäre binäre Datenstrom des 3D Laser Scanners besteht aus einer dreidimensionalen Punktwolke (X,Y,Z) mit den beiden Attributen Reflektivität und Farbwert im relativen Koordinatensystem (Abb. 2) des Instruments (Scanner Own Coordinate System = SOCS). Da von einem einzelnen Standpunkt (SCAN POSITION) nicht alle Bereiche einsichtig sind, sind meist mehrere Standpunkte notwendig, um dreidimensionale Objekte vollständig zu erfassen.

Dadurch wird es notwendig die einzelnen Scans in ein gemeinsames Koordinatensystem (Project Coordinate System = PRCS) zu transformieren. Dieser Vorgang, der als Registrierung bezeichnet wird, wird normalerweise über stark reflektierende Passpunkte vorgenommen, wobei jeweils mindestens vier Passpunkte in zwei aufeinanderfolgenden Scans sichtbar sein müssen. Werden diese Passpunkte, z.B. mittels einer Totalstation in absoluten Koordinaten eingemessen, können die einzelnen Scans bei der Registrierung direkt in das absolute Koordinatensystem (Global Coordinate System = GLCS) transformiert werden. Die beim Messvorgang aufgezeichnete Intensität des reflektierten Signals ist gut für eine automatische Objekterkennung geeignet und ermöglicht es z.B. die reflektierenden Passpunktmarken automatisch in den Daten zu erkennen. Zur Steigerung der Genauigkeit der Registrierung besteht die Möglichkeit, die bereits in einem Scan automatisch erkannten Passpunktmarken zusätzlich hochauflösend zu scannen. Daraus lässt sich das Zentrum der Passpunktmarken genauer definieren.

Die Anwendungsbereiche in der Archäologie liegen in der hochauflösenden Erfassung von Architekturteilen und historischen Gebäuden (GROH & NEUBAUER 2003), Monumentalstatuen, Grabkammern, Höhlen, Abris, wie auch in der Erfassung von topographischen Daten einer Fundstelle bis zu einzelnen Schichtoberflächen während einer stratigraphischen Grabung (DONEUS ET AL. 2003, DONEUS & NEUBAUER 2004). Die kompakte und robuste Bauweise des Instruments ist eine wesentliche Voraussetzung für den archäologischen Einsatz. Die erfassten Daten können entweder nur zur momentanen Dokumentation vergleichbar mit einer photogrammetrischen Aufnahme dienen oder als Grundlage für die Erstellung eines virtuellen Modells einer Fundstelle in unterschiedlicher Weise weiterverarbeitet werden.

3 Messgerät und Messvorgang

Für die Messung wurde ein 3D Laser Scanner RIEGL LMS-Z420i (www.riegl.com) kombiniert mit einer kalibrierten NIKON D100 Digitalkamera¹ verwendet (Abb. 3, 4). Die Montage ist so gestaltet, dass die Kamera rasch aufgesetzt und wieder abgenommen werden kann, wobei ihre äußere Orientierung relativ zum Koordinatensystem des Scanners weitestgehend erhalten bleibt. Die Anwendungssoftware RiSCAN PRO erlaubt es, sowohl die innere Orientierung (über das Objekt „Camera Calibration“) als auch die äußere Orientierung (über die Matrizen für „Mounting Calibration“ und „Camera Orientation and Position“) zu ermitteln und erforderlichenfalls vor Ort zu optimieren².

Bei der Datenaufnahme wird üblicherweise zunächst ein Laser-Scan über horizontal 360° durchgeführt. Anschließend wird eine diesen Scanbereich überlappend abdeckende Sequenz von Bildern aufgenommen. Die Anzahl der erforderlichen Bilder ist vom Öffnungswinkel der Kamera und damit unter anderem von der Brennweite des verwendeten Objektivs abgänglich. Für das vorliegende Beispiel mit der in Abb. 3 beschriebenen Konfiguration sind dazu sieben Fotos erforderlich. Die automatische, schrittweise Positionierung der Kamera ist unabhängig von der kontinuierlichen Rotation des Messkopfes beim Scanvorgang. Dadurch kann die Belichtungszeit für die Bildaufnahme den jeweiligen Lichtverhältnissen angepasst werden.

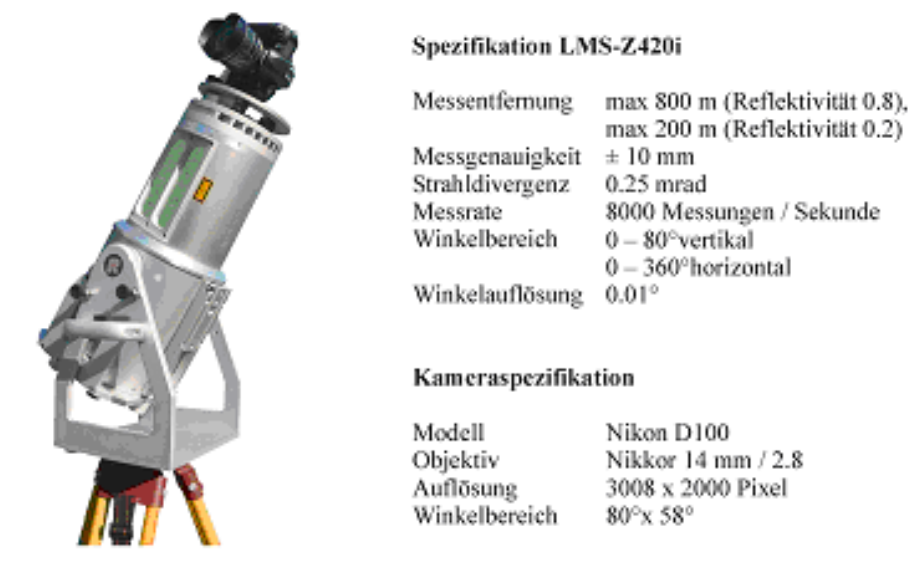


Abb. 3: Spezifikation des verwendeten Messgeräts RIEGL LMS-Z420i.

Die Datenaufnahme des 3D Laser Scanners LMS-Z420i wie auch der Digitalkamera wird von RiSCAN PRO automatisiert gesteuert, und die gewonnenen Daten werden in einem gut dokumentierten Projekt gemeinsam verwaltet³. Die Datenerfassung erfolgte mit der aktuellen beta-Version von RiSCAN PRO V1.1.1b19. Die Datenerfassung erfolgte über eine Laptop der

¹ Es können prinzipiell stets die aktuellsten Digitalkameras verschiedener Hersteller verwendet werden. Damit wird dem Anwender eine kontinuierliche Modellpflege seiner Kamera ermöglicht. Es besteht für den Anwender auch die Möglichkeit über einen Wechsel des Objektivs die Auflösung im Objektraum an die Erfordernisse der Messaufgabe und Messsituation anzupassen.

² vergleiche auch STUDNICKA, RIEGL & ULLRICH (2003), ULLRICH, SCHWARZ & KAGER (2003).

³ Viele am Markt erhältliche Post-Processing Softwarepakete greifen bereits auf diese RIEGL Projektstruktur zu.

über eine TCP/IP Schnittstelle mit dem Scanner verbunden war. Dieser Laptop diente zur Übertragung der Steuerungsbefehle an den Scanner und der Daten an einen zweiten PC-Laptop über eine Wireless-LAN Verbindung.



Abb. 4: RIEGL LMS Z420i kombiniert mit NIKON D100 Digitalkamera im Einsatz in Leipzig. Die überhohen Stative und die Schwenkmontage des Scanners ermöglichen es alle notwendigen Positionen für eine umfassende Erfassung der komplizierten Kellerstrukturen einzunehmen.

Der Scanner weist einen Messbereich von $360^\circ \times 80^\circ$ und eine Distanzmessgenauigkeit von 0.8 mm bei einer Reichweite von 2 – 800 m auf. Im Scanbereich wurden Passpunktmarken aus Reflexfolie angebracht, die mit einer Totalstation absolut eingemessen wurden. Diese Passpunkte (TIEPOINT-TP) wurden vor Beginn der Arbeiten über eine ASCII-Datei in die Software RiSCAN PRO importiert.

Für die vollständige Erfassung waren 19 unterschiedliche Scannerpositionen notwendig (Abb. 1). Von allen Positionen wurden Scans mit einer Auflösung von 0.12° erstellt (Abb. 5). Dies entspricht einer mittleren Punktdichte von 1-2 cm. Ein einzelner Scan dauert ca. 4 min und weist 2 Millionen Messpunkte auf für die Lage, Entfernung und Reflexionsintensität gespeichert werden. Zur Erreichung der maximalen Genauigkeit wurden die automatisch

aufgrund ihrer Reflexionsintensität in den Scans gefundenen Reflektoren zur genauen Bestimmung ihres Zentrums noch feiner gescannt (TIEPOINT SCAN). Für jeden Scan wurden Fotos (SCANPOSIMAGES) mit einer Überlappung von 10% erstellt. Das trübe Wetter war eine gute Voraussetzung für farblich gut aufeinander abgestimmte Fotos. Nur die in den Abendstunden bzw. die im Gewölbe erstellten Bilder müssen nachträglich angeglichen werden. Für eine Gesamtdarstellung wurden die Einzel-Scans auf eine Auflösung von 0.4° resampelt und mittels den Fotos eingefärbt (Abb. 1, 6)

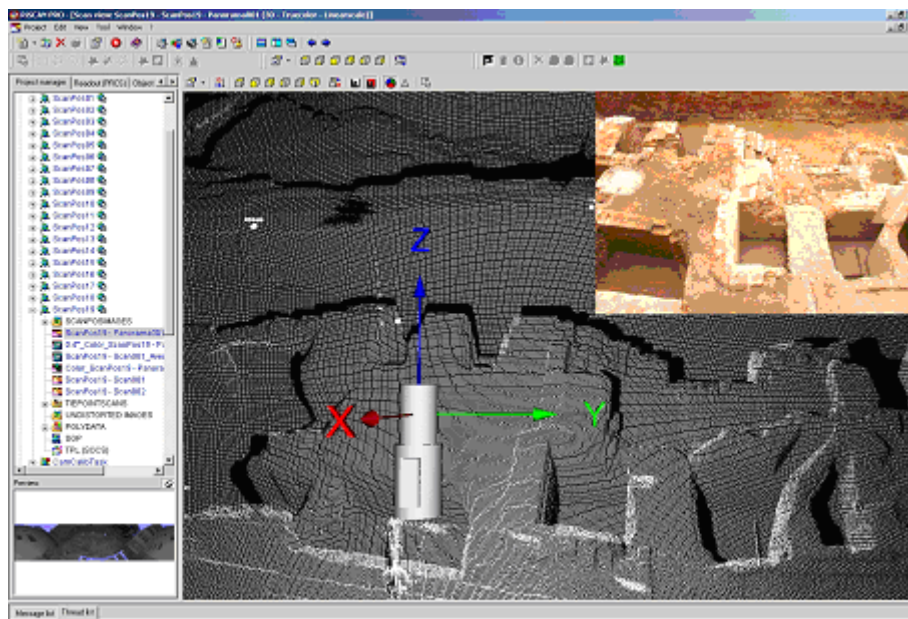


Abb. 5: Screenshot aus RiSCAN PRO der Aufnahme eines Einzelscans mit gefundenen Tiepoints und zugehörigen Digitalfoto.

Die gesamten Daten sind in einem Projekt innerhalb von RiSCAN PRO organisiert. Die Projektstruktur ist in einem eigenen Header-File gespeichert, das von Auswertesoftware wie z.B. PHIDIAS, die neben anderen Softwarepaketen für dieses Projekt zum Einsatz kam, direkt gelesen werden kann. Zum Berichtszeitpunkt umfasste das Projekt 2 039.798 MB, gespeichert in 1340 Files. Das direkte Ergebnis der Messung ist eine 3D Punktwolke mit zugehörigen Fotos, die anschließend weiter ausgewertet werden können.

4 Auswertung

4.1 Kombinierte Auswertung

Die einzigartigen Möglichkeiten, die aus der Verbindung der vielfach bewährten Photogrammetrie, mit der Methode des 3D Laser-Scanning, entstehen, wird im Folgenden demonstriert. Das Resultat der direkten Kombination der Daten eines Laser Scanners LMS-Z420i mit den hochauflösenden Bildern einer kalibrierten und fix auf dem Scannerkopf montierten Kamera macht die Vorteile klar ersichtlich: Dort, wo Laser-Scanning unstrukturierte Freiformflächen in einer hohen Geschwindigkeit durch eine Punktwolke vollständig und präzise beschreibt, zeigt die Photogrammetrie ohne strukturierte Beleuchtung Schwächen, wohingegen die Photogrammetrie in der Auswertung von Kanten und der Erfassung feinstrukturierter Texturierungen unschlagbar ist, zeigen die Laserdaten prinzipielle Unzulänglichkeiten. Eine vollständig integrierte Auswertung von Bilddaten und Scandaten, wird auch als Kombinationsauswertung bezeichnet. Die Auswertungen im Rahmen dieses Projektes wurden mit RiSCAN PRO, Polyworks, der Photogrammetrie-Software PHIDIAS und dem GIS ArcView vorgenommen.

Die Auswertung der aufgenommen Scandaten und der kombiniert erstellten digitalen Fotos beginnt direkt nach der Datenaufnahme mit der Software RiSCAN PRO. Die in RiSCAN PRO weiterverarbeiteten Daten können in unterschiedlichen Formaten aus den jeweiligen Verarbeitungsschritten exportiert werden und mit weiterer Software von Drittanbietern ausgewertet werden. Mit RiSCAN Pro wurden 3D Punktwolken, triangulierte Netze und Orthofotos erstellt. Die Daten wurden in PolyWorks zu einem georeferenzierten und triangulierten Gesamtmodell zusammengesetzt aus dem automatisch Linienmodelle in X, Y und Z Richtung generiert wurden die als DXF-Format exportiert wurden. Aus diesem Modell wurde auch ein VRML-Modell erstellt, dass mit freeware-Viewern betrachtet werden kann.

Das PlugIn PHIDIAS (PHOCAD 2004, EFFKEMANN 2003) für die CAD-Software Microstation gestattet die Darstellung der orientierten und kalibrierten Bilddaten mit einer überlagerten Darstellung der Scandaten. Die Überlagerung der Scandaten erfolgt durch Projektion und anschließender Darstellung aller oder eines einstellbaren Bruchteils der Scandaten als Punktwolke. Für dieses Projekt wurde die aktuelle Version 2.6.9 von PHIDIAS getestet⁴. Die Auswertung der Punktwolken kann in PHIDIAS kombiniert mit den photogrammetrischen Aufnahmen, wie auch eigenständig erfolgen. Bei der kombinierten Auswertung ergänzen sich die 3D-Information der Punktwolke und die bessere Interpretationsmöglichkeit des digitalen Bildes. Im CAD-Programm Microstation wird dazu eine neue Zeichnungsdatei angelegt die als dgn-File abgelegt wird. Diese Datei kann aber auch als dwg-Format gespeichert werden. Das Plugin PHIDIAS ermöglicht es, ein in RiSCAN PRO erstelltes Projekt direkt einzulesen. Im Rahmen einer kombinierten Auswertung wurde in Microstation mittels PHIDIAS ein Drahtgittermodell gezeichnet, triangulierte Netze erstellt und Orthofotos erzeugt. Für die weitere Auswertung wurden die aus unterschiedlichen Ansichten kombinierten Orthofotos in ArcView importiert und archäologisch interpretiert. Im GIS stehen deutlich bessere Zeichenfunktionen für gefüllte Polygone zur Verfügung, als dies in CAD-Systemen der Fall ist. Die direkte Verbindung der auf den Orthofotos erstellten Umzeichnungen der Maueransichten mit einer Datenbank im GIS macht eine hierarchisch gegliederte Interpretation leicht möglich. Die durchgeführten Auswerteschritte werden im folgenden erläutert.

⁴ Dabei konnten einige Programm-Fehler festgestellt werden, die durch den Hersteller PHOCAD umgehend behoben wurden. Auch Verbesserungen konnten im Rahmen dieses Projektes spezifiziert werden, die vom Hersteller ebenfalls in die Software eingearbeitet wurden.

4.2 3D Punktwolke

Unmittelbar nach der Datenaufnahme werden Scan- und Bilddaten zusammengeführt. Das Erstresultat der kombinierten Auswertung von Scan und digitalem Foto ergibt eine eingefärbte Punktwolke (Abb. 6).

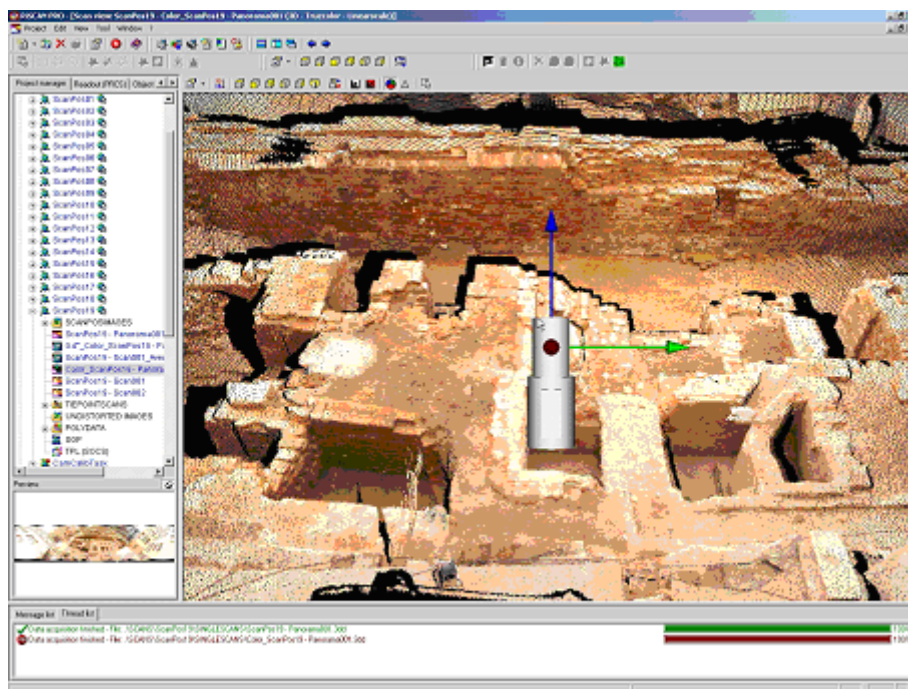


Abb. 6: Screenshot aus RiSSCAN PRO eines über das Digitalfoto eingefärbten Einzelscans.

Auch wenn diese noch kein eigentliches 3D Modell darstellt, so wird doch das Visualisieren und Interpretieren der 3D-Daten durch die Farbinformation wesentlich erleichtert. Ein automatisiertes Einfärben der Daten eines Einzelscans durch korrespondierende Fotos ist nur bei Verwendung einer vollständig modellierten Kamera möglich. Diese vollständige Modellierung beinhaltet sowohl die innere Orientierung und die Linsenverzeichnung, als auch die äußere Orientierung, d.i., die Position und Orientierung der Kamera. Die Messpunkte des Scanners werden hiezu in das Kamerakoordinatensystem transformiert, und dem Messpunkt wird hierbei der entsprechende Farbwert des korrespondierenden Pixels zugeordnet. Da die Bilder im allgemeinen überlappen, kann über die Überlappungsbereiche eine automatische Helligkeitsanpassung der Bilder in einfacher Weise vorgenommen werden.



Abb. 7: Beispiel für die 2D Darstellung einer eingefärbten Punktwolke eines einzelnen Scans. In der zweidimensionalen Darstellung der eingefärbten Punktwolke (in einer Azimut-Polar-Winkel Ebene) lässt sich die Qualität der Kamerakalibrierung überprüfen: die einzelnen Fotos gehen ohne erkennbare Stosskanten ineinander über.

Die eingefärbten Punktwolken der einzelnen Scans lassen sich auch miteinander kombinieren und zu einer Gesamtpunktwolke zusammenlegen (Abb. 8, 9, 10, 11).

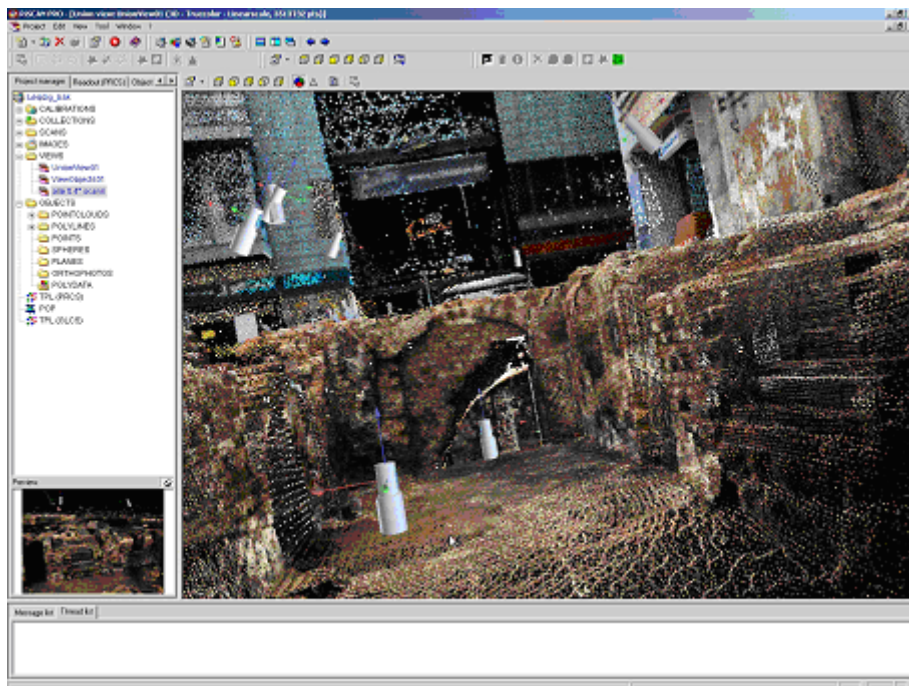


Abb. 8: 3D Darstellung der eingefärbten Punktwolke der 19 Scanpositionen. Die Scanner Positionen sind durch ein Scannersymbol kenntlich gemacht.

Durch verschiedene in RiSCAN PRO als Filter bezeichnete Werkzeuge lässt sich die aus den einzelnen Scans zusammengesetzte Punktwolke beschneiden. Dadurch lassen sich Teile wie z.B. einzelne Räume, Mauern, Mauerteile oder Schichtoberflächen aus den Daten herausschneiden und getrennt weiter verarbeiten (Abb. 10, 12).

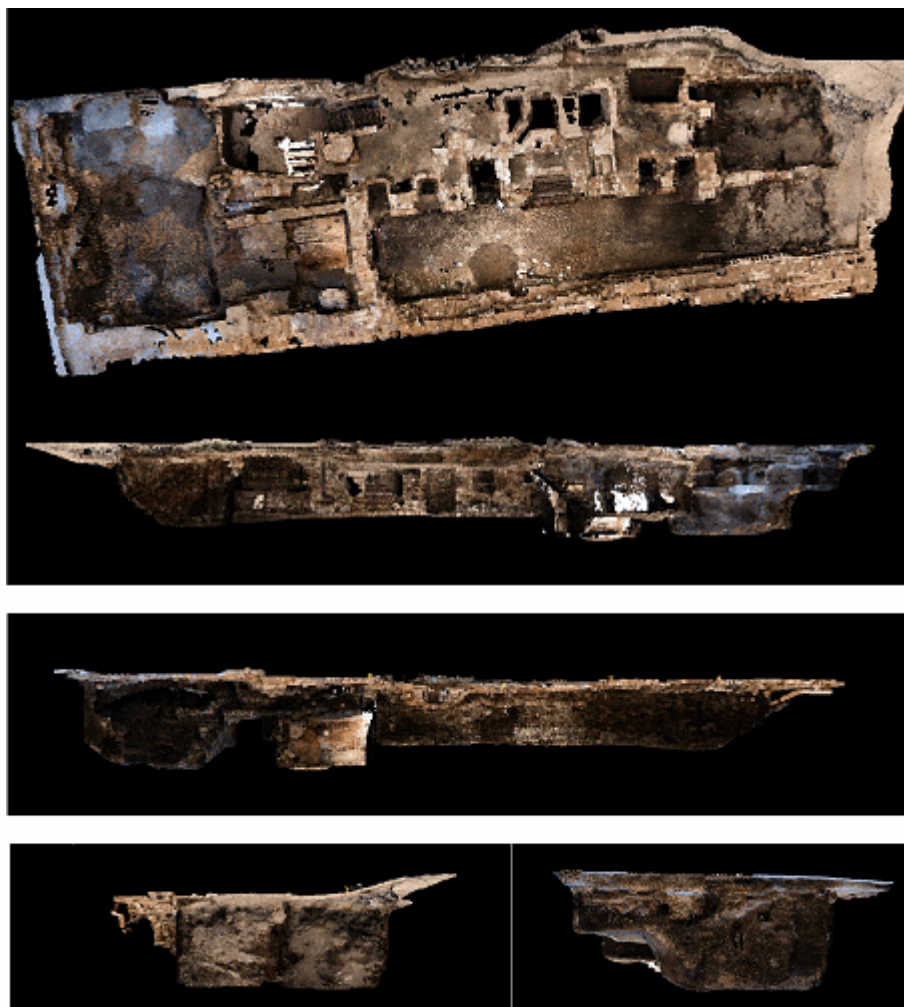


Abb. 9: Eingefärbte und auf die Parzelle Petersstrasse 33 beschnittene Punktwolke in der Draufsicht, Ansicht von Norden, Süden, Westen und Osten.



Abb. 10: Draufsicht eines ausgeschnitten Bereichs der eingefärbten Punktwolke.

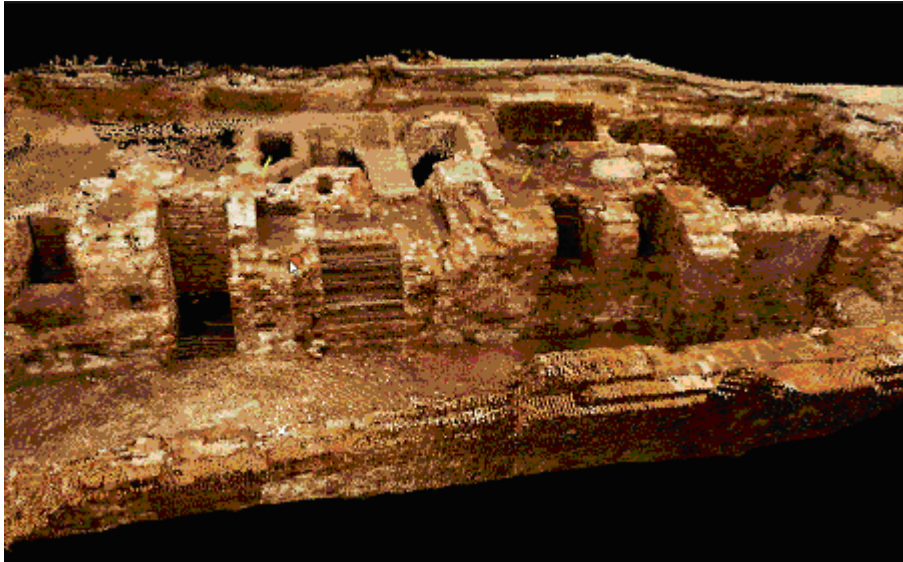


Abb. 11: Schrägansicht von Süden der eingefärbten und auf die Parzelle Petersstrasse 33 beschnittene Punktwolke.

Diese eingefärbten Punktwolken können z.B. als ASCII Text-Files exportiert werden und lassen sich so z.B. in ein GIS-Programm oder CAD-Software importieren. Programme für den Import von eingefärbten Punktwolken in CAD Programme sind am Markt erhältlich, wie zum Beispiel das Programm PointCloud (KUBIT 2004). Zum Import in ArcView ist das Generate Punkformat oder ein Import als Event-Theme zielführend.

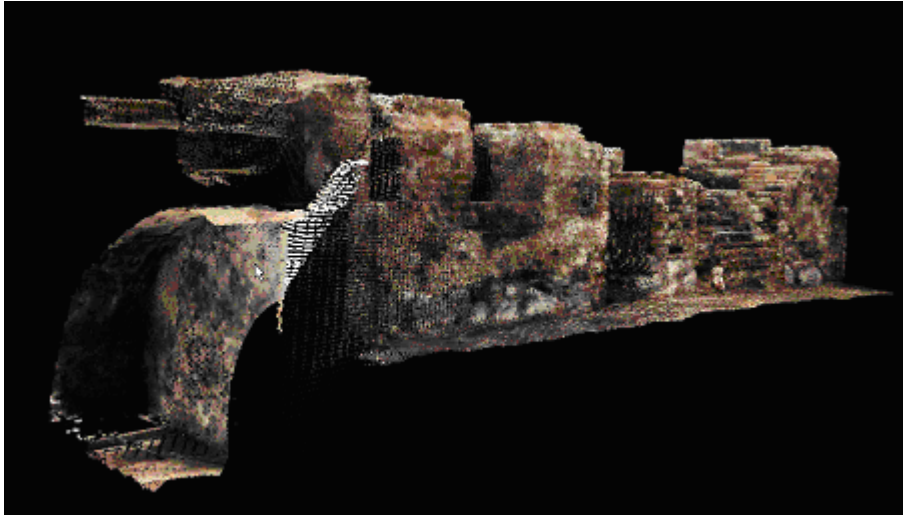


Abb. 12: Teilansicht der Punktwolke mit angeschnittenem tieferliegenden Gewölbe.



Abb. 13: Ansicht der Punktwolke von unten mit tieferliegendem Gewölbe.

4.3 Triangulierte Punktwolke

Zur Darstellung und Weiterverarbeitung von Daten zur Charakterisierung von Freiformflächen erweist sich die Verwendung von triangulierten und texturierten Flächen (mesh) als sehr vorteilhaft. Zum Übergang von einer Punktwolke auf ein mesh verwendet RiSCAN PRO eine Delaunay-Triangulierung im scannereigenen Koordinatensystem. Bei der Triangulierung wird der Umstand ausgenutzt, dass innerhalb des scannereigenen Koordinatensystems die Scandaten als 2,5 D Daten dargestellt werden können und daher nur eine 2D Triangulierung erforderlich ist. Danach erfolgt ein optionaler Schritt zur Flächenbearbeitung durch Datenbereinigung, Glättung und Dezimierung der Punktwolke. Die Dreiecksnetze werden zur Unterdrückung von „Schattendreiecken“ bereinigt und zur Reduktion des inhärenten Entfernungsräuschens geglättet. Die Dreiecksnetze werden gegebenenfalls unter Vorgabe einer anwenderdefinierten Genauigkeit zur Verminderung der Anzahl der Dreiecke dezimiert. Die Dezimierung erfolgt so, dass in Bereichen mit glatten Flächen weniger Dreiecke und im Bereich von Kanten mehr Dreiecke gebildet werden. Erst nach diesen Schritten erfolgt die Texturierung des meshes (Abb. 14).

Hierzu werden im ersten Schritt entzerrte Bilder (UNDISTORTED IMAGES) verwendet, die entsprechend der Linsenverzeichnungsparameter entzerrt werden und damit Bildern einer fiktiven verzerrungsfreien perspektivischen Kamera entsprechen. Der Vorgang der Texturierung besteht vorrangig in der Berechnung der Bildkoordinaten der Dreiecksknoten in den entzerrten Bildern (Abb. 15).

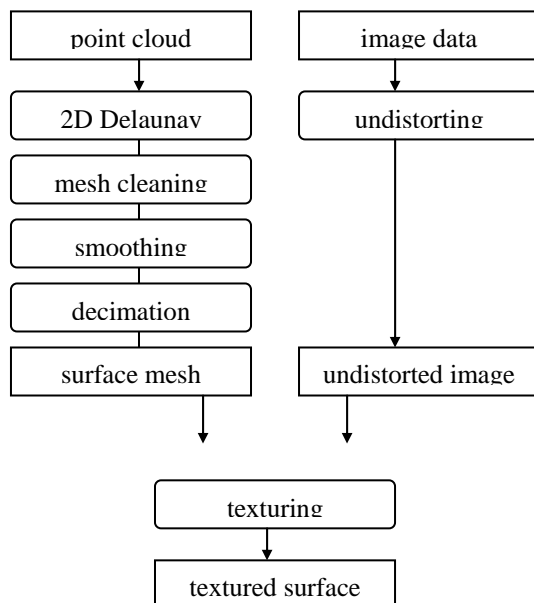


Abb. 14: Workflow für die Erstellung eines texturierten meshes in RiSCAN Pro.

Die texturierten meshes können in RiSCAN PRO in einem Object Viewer einzeln oder zu mehreren dargestellt werden (Abb. 16). In diesem Object View besteht die Möglichkeit für eine direkte Digitalisierung von Kanten oder geschlossenen Polygonen auf dem texturierten mesh. Die dabei erzeugten Polylinien können im DXF-Format exportiert werden. Bei der Digitalisierung kann für die Ermittlung des digitalisierten Punktes der Polylinie gewählt werden zwischen dem nächsten Punkt der Punktwolke oder einem interpolierten Wert der aufgrund des Dreieckes des meshes in dem der Punkt digitalisiert werden soll errechnet wird. Diese Funktion ist für die archäologische Anwendung vielfältig verwendbar, sollte für den praktischen Einsatz durch eine gezielte Spezifikation verbessert werden.

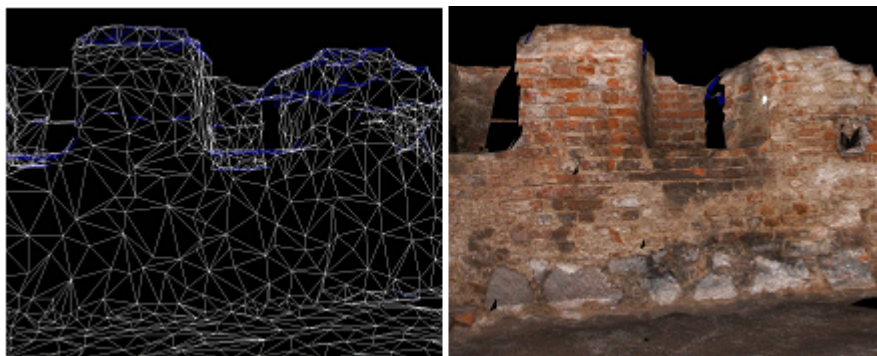


Abb. 15: Beispiel für die Visualisierung eines dezimierten meshes mit und ohne Texturierung in RiSCAN PRO von einem einzelnen Scan.



Abb. 16: Ausschnitt des texturierten meshes, das aus mehreren Teilnetzen von verschiedenen Scans in RiSCAN PRO zusammengesetzt wurde.

Zur Abspeicherung der texturierten Oberflächen kommt in RiSCAN PRO das Open-Source Format VTP (für **V**isualization **T**ool kit **P**olydata) zum Einsatz (KITWARE 2004). Da dieses Format nur eine Texturierungsdatei je vtp-Datei gestattet, werden die Daten in mehrere vtp Dateien aufgeteilt und in der Folge auch entsprechend einzeln gerendert. Softwarepakete wie PolyWorks (INNOVMETRIC 2004) haben sich auf das Erstellen, Editieren und Vermessen von 3D Netzen spezialisiert. In dieser Software ist es zum Beispiel möglich Löcher in den dreidimensionalen Netzen zu schließen (Abb. 17, 18). Das Aufbringen hochauflösender Texturen aus den aufgenommenen Fotos ist jedoch leider nicht möglich.



Abb. 17 : In PolyWorks trianguliertes mesh der Parzelle Petersstrasse 33.

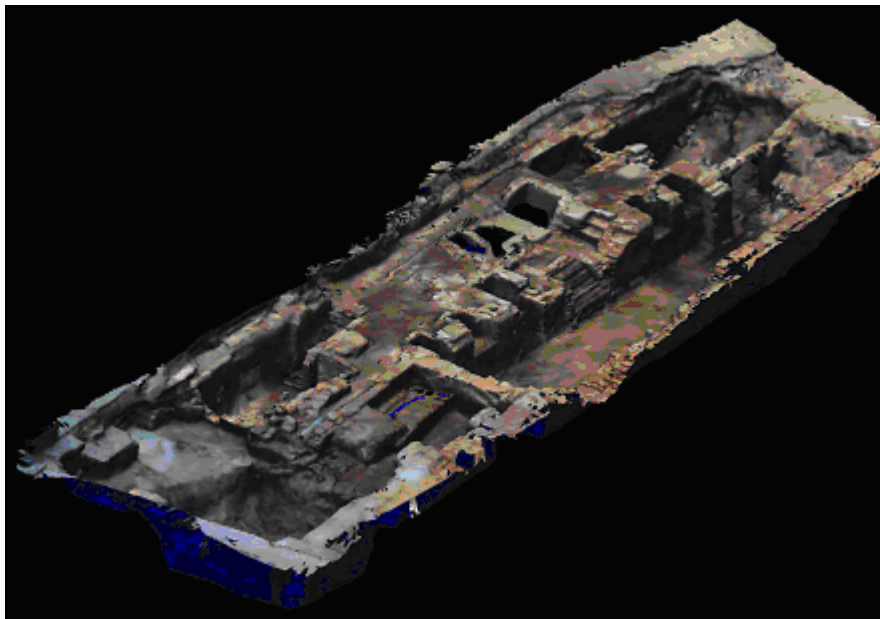


Abb. 18: In PolyWorks erstelltes texturiertes mesh der gesamten gescannten Parzelle Petersstrasse 33.

4.4 Höhengschichtenmodell

Eine für zahlreiche archäologische Anwendungen gebräuchliche Darstellungsform sind Höhengschichten- oder Isolinenpläne. Aus den erstellten meshes lassen sich solche Höhengschichtenpläne in beliebiger Richtung erstellen. Die häufigste Form ist die Erstellung eines Höhengschichtenplans in Z-Richtung (Abb. 19). Ebenso gut lässt sich dies jedoch in den anderen zwei Koordinatenrichtungen erstellen. Dadurch können automatisiert aus den triangulierten Punktwolken vereinfachte Liniendarstellung beliebiger Auflösung erstellt werden, die in der Folge für weitere Visualisierungen oder als Grundlage für Umzeichnungen oder virtuelle Rekonstruktionen dienen können. Im Rahmen dieses Projektes wurden Isolinenpläne des in PolyWorks erstellten meshes in X,Y und Z-Richtung vorgenommen (Abb. 19, 20, 21). Die Polylinien wurden im DXF-Format exportiert und im GIS ArcView weiterverarbeitet.



Abb. 19: Höhengschichtenplan in Z-Richtung erstellt aus dem triangulierten Netz mit 10cm Linienabstand.

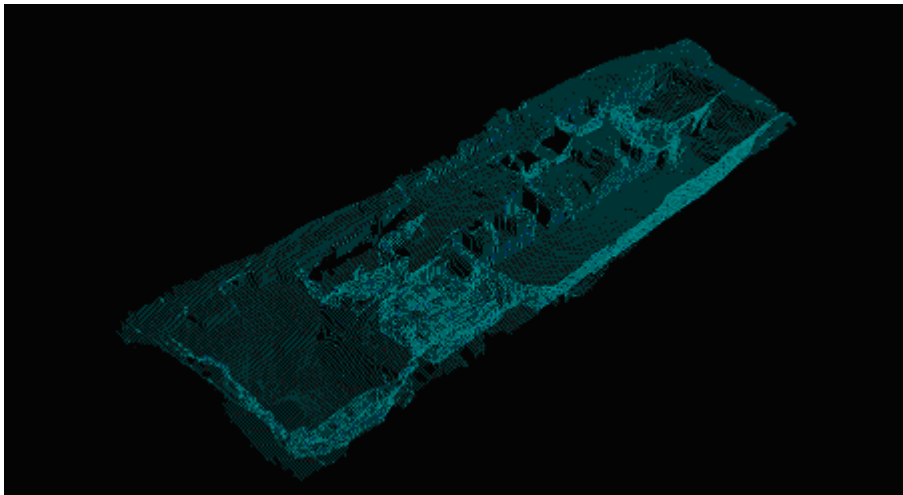


Abb. 20: Isolinenplan in X-Richtung erstellt aus dem triangulierten Netz.

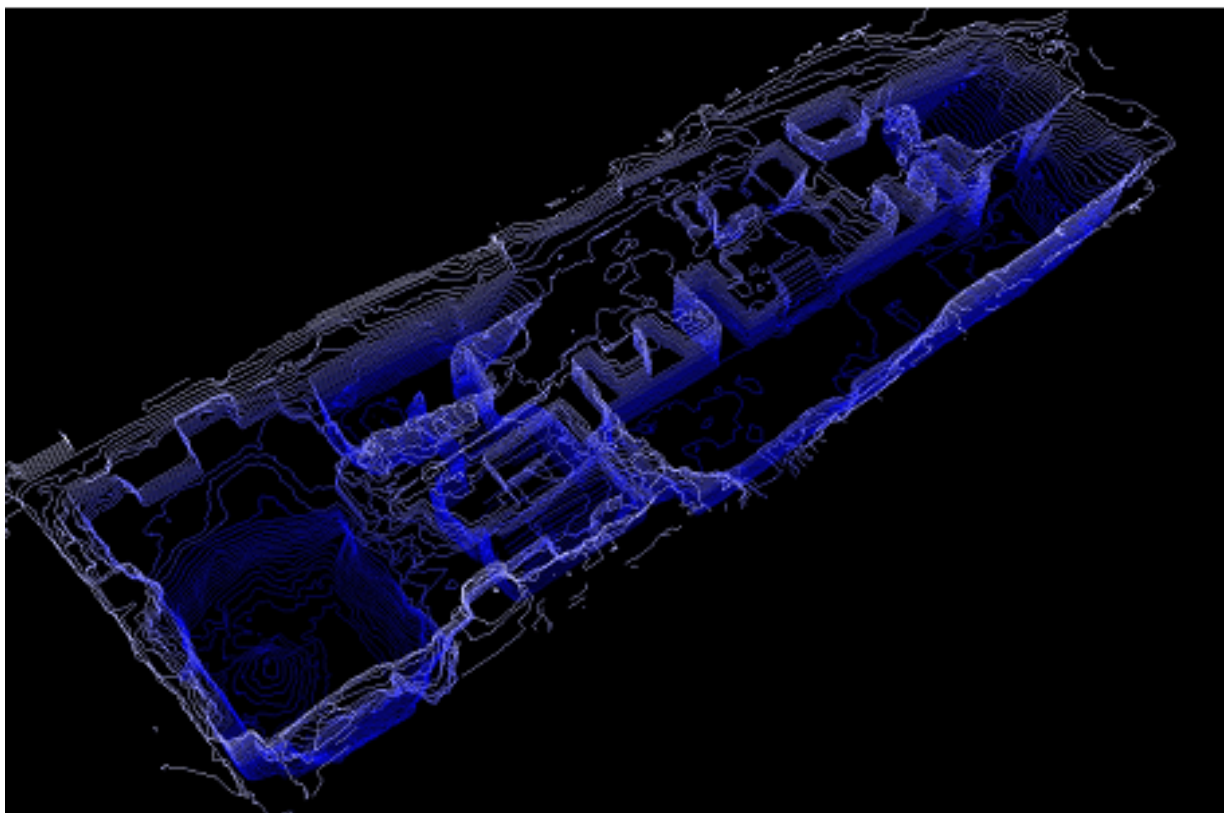
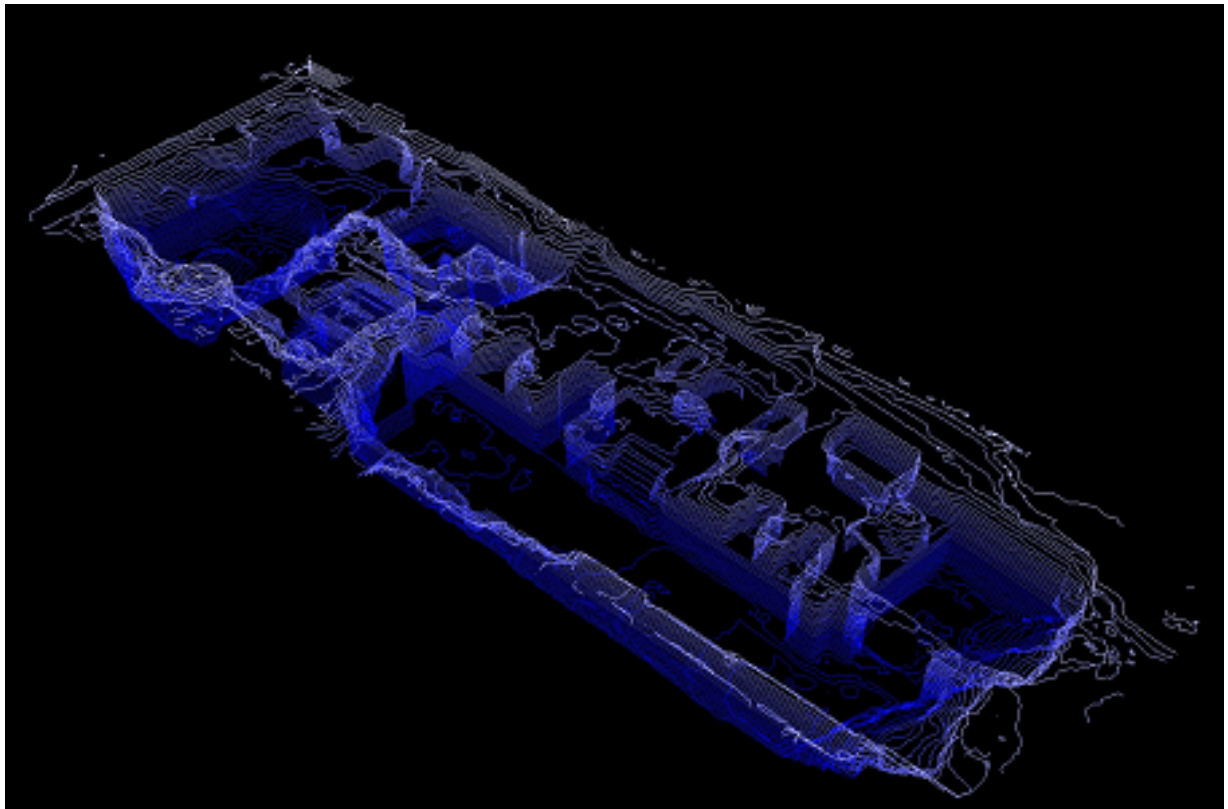


Abb. 21: Dreidimensionale Darstellung der Höhengschichten erstellt aus der triangulierten Punktwolke in 10 cm Abständen mit Farbcodierung der Tiefe.

4.5 Orthofoto in RiSCAN PRO

Eine weitere Möglichkeit von RiSCAN PRO stellt die automatisierte Erstellung von Orthofotos dar. Hierzu werden zunächst die Messdaten aus der 3D Laser Scanneraufnahmen zu einer flächigen Darstellung trianguliert. Die optionalen Schritte zur Flächenbearbeitung wie Glättung und Dezimierung der Dreiecksflächen wurden bereits erläutert und sollten in Abhängigkeit von der Topographie angewendet werden.

Die triangulierten Flächen werden anschließend mit den korrespondierenden und entsprechend der Linsenverzeichnung entzerrten Bildern texturiert. Die Erstellung eines Orthofotos erfordert die Definition einer Projektionsfläche, einer Tiefe vor und hinter der Projektionsfläche innerhalb der Elemente gerendert werden, und einer Auflösung für das Rendern. Die Parameter der Projektionsfläche werden entweder aus den Daten selbst ermittelt, oder im Projektkoordinatensystem direkt definiert. Die Pixel-Auflösung des Orthofotos bzw. des Maßstabes ist als Querabmessung eines Pixels in Metern anzugeben.



Abb. 22: In RiSCAN PRO erstelltes Orthofoto eines Detailbereichs der Nordmauer des Kellerraums.



Abb. 23: Orthofotos der Parzelle Petersstrasse 33 in Längsrichtung. Durch Summation der Bereiche vor und hinter der Schnittlinie in beliebig wählbaren Abstand lässt sich eine Grundlage für detaillierte Schnittzeichnungen erzeugen.

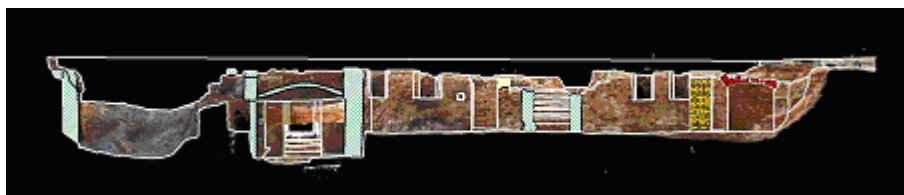


Abb. 24: Orthofoto der Parzelle 33 in Längsrichtung mit beispielhafter Umzeichnung wesentlicher archäologischer Befunde.

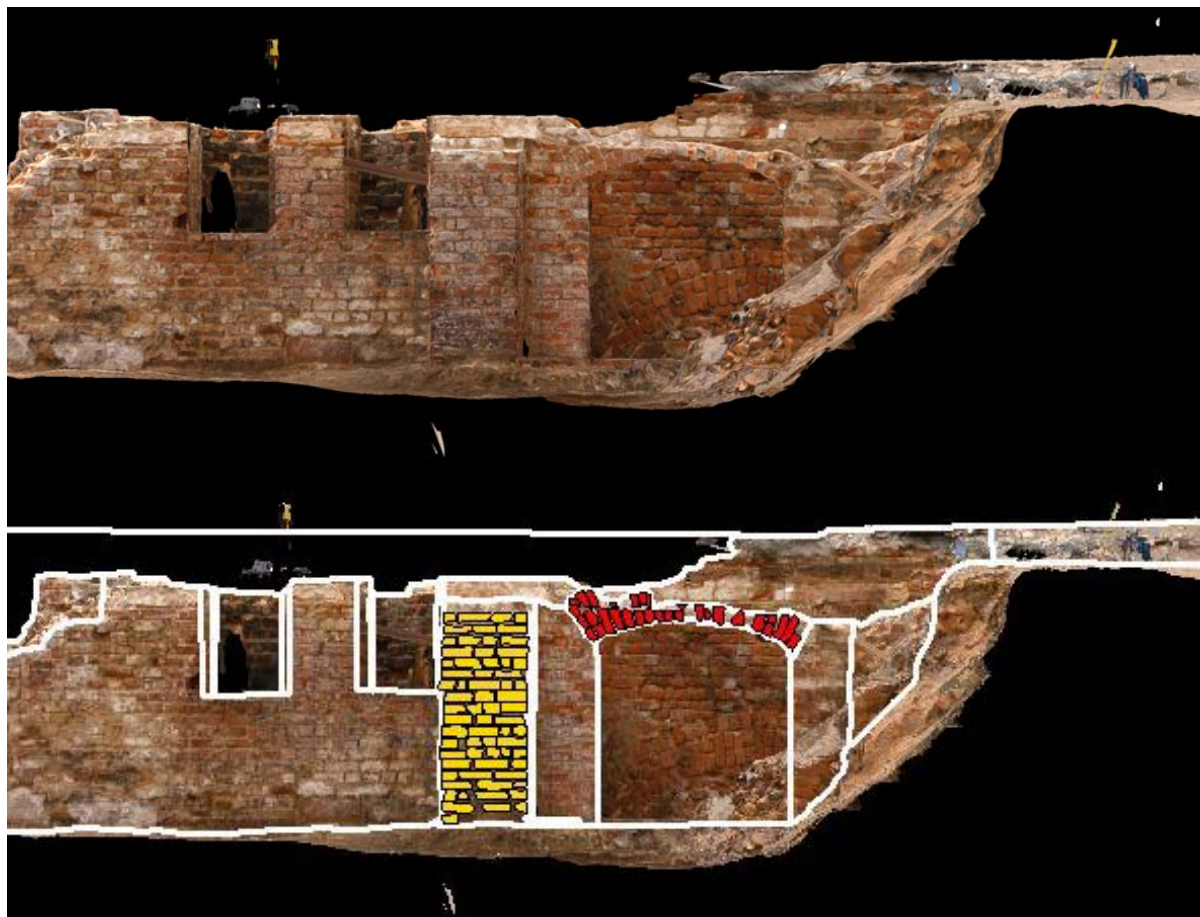


Abb. 25: Detail des Orthofotos in Längsrichtung mit und ohne Umzeichnung archäologischer Befunde.

Sind all diese vorbereitenden Schritte durchgeführt, so wird ein sogenanntes Z-Orthophoto aus beliebig vielen texturierten Flächenelementen aus den verschiedenen, im Projektkoordinatensystem registrierten, Scanpositionen berechnet. Hierbei steht das Z für einen Z-Wert, der die Tiefe des Pixels in Bezug auf die Projektionsfläche angibt. Nicht nur das generierte Orthophoto wird in der RiSCAN PRO Projektstruktur abgelegt, sondern auch die zu jedem Pixel gehörende Tiefeninformation, die in einem entsprechenden binären und offengelegten Format zusammen mit Orientierungsparametern zur Projektionsfläche im Projektkoordinatensystem gespeichert wird. Programme wie zum Beispiel ScanDig3D (MARSCHALLINGER & STEJSKAL 2004), ein AutoCAD PlugIn, bearbeiten diese Information derart, dass Schnitte durch Fassaden und Digitalisierung in verschiedenen Zeichenebenen rasch und einfach durchgeführt werden können. Da zu jedem Pixel nur ein Z-Wert gespeichert wird kann ein Z-Orthophoto als 2,5 D Datensatz interpretiert werden. Durch die verfügbaren CAD Plug-Ins können die Daten im gewohnten CAD Programm nachverarbeitet werden. Die weitere Verarbeitung in 2D kann auch innerhalb eines GIS erfolgen. Durch die Definition

eines Abstandes vor und hinter der definierten Ebene für die Erstellung des Orthofotos kann für komplizierte Maueransichten und Schnitte eine geeignete Grundlage für eine Linienauswertung erstellt werden.

Einen Gesamtschnitt kann durch Verwendung aller notwendigen Scanpositionen erstellt werden. Durch die Kombination von mehreren Scans entsteht jedoch besonders in den besonders dicht dokumentierten Bereichen ein ausgesprochen unscharfes Bild. Dies kann durch eine Serie von Orthofotos aus jeweils nur einer Scanposition gelöst werden, die z.B. im GIS alle geladen werden können. Dadurch kann die folgende Digitalisierung von Linien oder Polygonen auf dem jeweils besten Bild vorgenommen werden.

4.6 Drahtgittermodell

Ein Drahtgittermodell kann eine geeignete 3D Abstraktion einer komplexen Maueransicht darstellen. Es kann einerseits aus einzelnen gezeichneten Maueransichten, durch Aufnahme mit einer Totalstation oder aus einer 3D Punktwolke gewonnen werden. Die Erstellung eines Drahtgittermodells ist in RiSCAN PRO theoretisch möglich, die Funktionen sind für eine praktische Anwendung aber noch zu wenig ausgereift. Die Erstellung eines Drahtgittermodells in PHIDIAS kann mit mehreren unterschiedlichen Microstation-Funktionen erfolgen. Eine Möglichkeit besteht darin das Modell in Form einzelner Ebenen anzunähern. Die manuelle Digitalisierung im CAD Programm beruht darauf, dass in einem durch ein Polygon (Zaun) begrenzten Bereich der Punktwolke eine LSQ (least-square-fit) Ebene geschätzt wird, die in der Folge ein Hilfskoordinatensystem (ASC) festlegt. In dieser nun gesperrten Zeichenebene kann mit konventionellen Methoden zur Erstellung von 3D Objekten im CAD System gearbeitet werden.

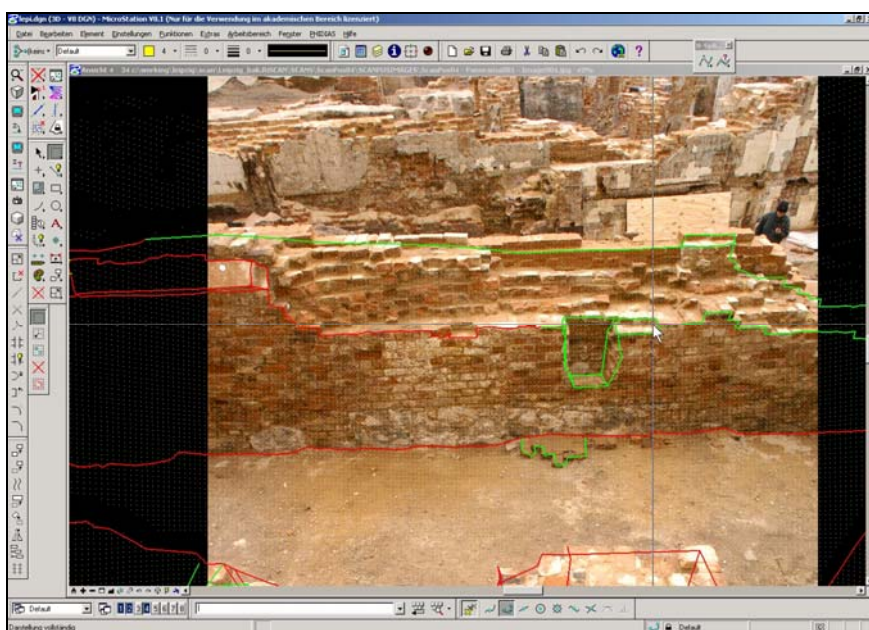


Abb. 26: Screenshot des PHIDIAS-Projekts mit geladener Punktwolke und Digitalfoto während der Erstellung eines Drahtgittermodells.

Für das in diesem Projekt erstellte Modell wurde jedoch aufgrund der komplexen Struktur nicht versucht Ebenen zu definieren, sondern direkt auf der Punktwolke in 3D zu digitalisieren (Abb. 26). Dabei wird für den jeweiligen Bereich die entsprechende Punktwolke bzw. Punktwolken geladen (Abb. 27). Die Punktwolke kann dabei in mehreren Ansichten dargestellt werden (Abb. 28). Zur Definition der Kanten können die vom Ansichtswinkel optimal geeigneten Bilder einzeln geladen werden. Dabei ist zu beachten, dass die Bildinformation mit dem zugehörigen Scan korreliert, bei zusätzlich dazugeladenen Scans kann es aufgrund des Ansichtswinkels zu Problemen bei der Kantendefinition kommen. Dies kann zwar theoretisch in PHIDIAS durch die Definition von Ebenen, welche die Kante bilden

präzise gelöst werden. Der hohe Aufwand den die dazu notwendigen Arbeitsschritte fordern, reduziert jedoch die praktische Anwendbarkeit für eine dermaßen komplexe Situation wie im vorliegenden Projekt. Generell ist mit dieser Software jedoch die Erstellung eines hochgenauen Modells im Bereich weit unter der Auflösung der Punktwolke möglich.

Aus praktischen Gesichtspunkten wurden daher gewisse Ungenauigkeiten in Kauf genommen, um einen Arbeitsvorgang zu finden, der möglichst rasch zum Ziel führt. Für das vorliegende Modell wurde mit der Funktion SCAN3D LOCK gearbeitet. Mit dieser Funktion kann direkt auf der Punktwolke in beliebigen Ansichten digitalisiert werden. Der aufgrund des Fotos definierte Punkt wird anhand der darunter liegenden Punktwolke mittels der umliegenden Punkte interpoliert. Dazu werden einzelne Dreiecksflächen in der Umgebung berechnet, die für die Interpolation herangezogen werden. Der verwendete Suchradius und ein maximaler Abstand für die Sperrung zu weit entfernter Punkte kann interaktiv eingestellt werden. Probleme entstehen dann, wenn in Bereichen digitalisiert wird, die für den Scanner sichtbar waren, oder wenn mit zu weit entfernten Punkten interpoliert wird. Der Offset der Kamera im Vergleich zum Scannerzentrum kann für Nahaufnahmen zu Problemen führen, da das Sichtfeld der beiden Geräte voneinander differiert.

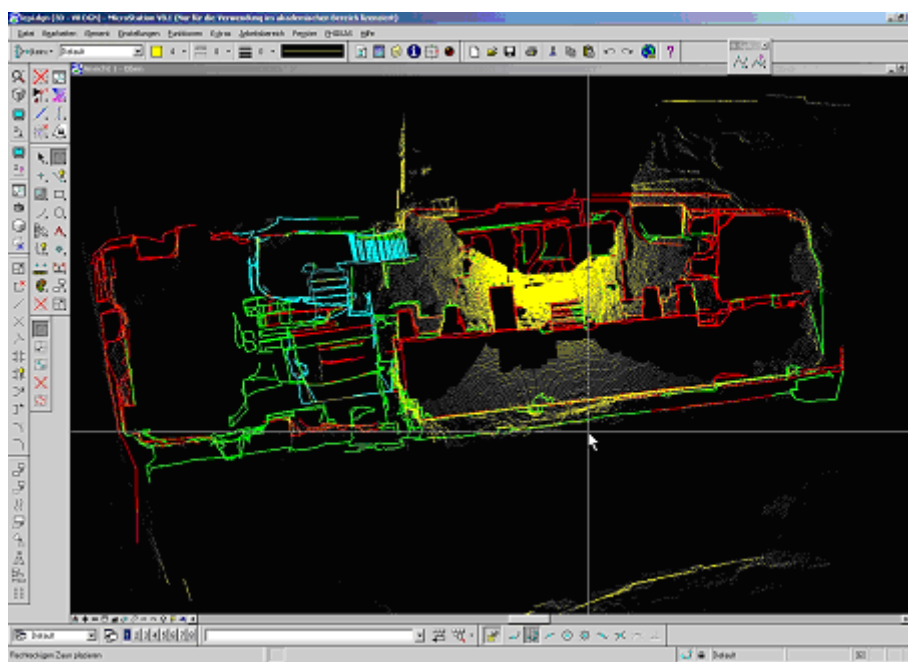


Abb. 27: Screenshot des PHIDIAS-Projekts zur Erstellung eines Drahtgittermodells mit geladener Punktwolke eines einzelnen Scans in der Draufsicht. Blau dargestellt sind der Zugang und das tieferliegende Gewölbe.

Mit dieser Funktion können Polylinien oder Polygone gezeichnet werden. Da jedoch in solch komplexen Situationen wie in diesem Projekt selten größere Flächen von einer Ansicht digitalisiert werden können, wäre für archäologische Anwendungen eine Funktion wünschenswert, die es erlaubt geschlossene Polygone zu zeichnen, weitere Polygone an bestehende Polygone anzuschließen bzw. bestehende Polygone mit einander zu vereinigen

bzw. zu kombinieren um ringförmige oder im Inneren offene Polygone zu erzeugen. Die derzeit möglichen Funktionen bedingen zu viele anschließende Editierschritte um effizient einsetzbar zu sein. So könnte nicht nur ein Drahtgittermodell sondern auch ein 3D Flächenmodell direkt auf der Punktwolke digitalisiert werden, das anschließend gerendert werden kann. Das Fehlen dieser Funktion ist ein deutlicher Nachteil gegenüber einer tachymetrischen Aufnahme wo geschlossene Polygone definiert aufgenommen werden können. Ein Problem, dass sowohl bei der tachymetrischen Aufnahme wie auch bei der Digitalisierung aus der Punktwolke besteht betrifft die Auswahl der Punkte und damit den Grad der Generalisierung des Modells.

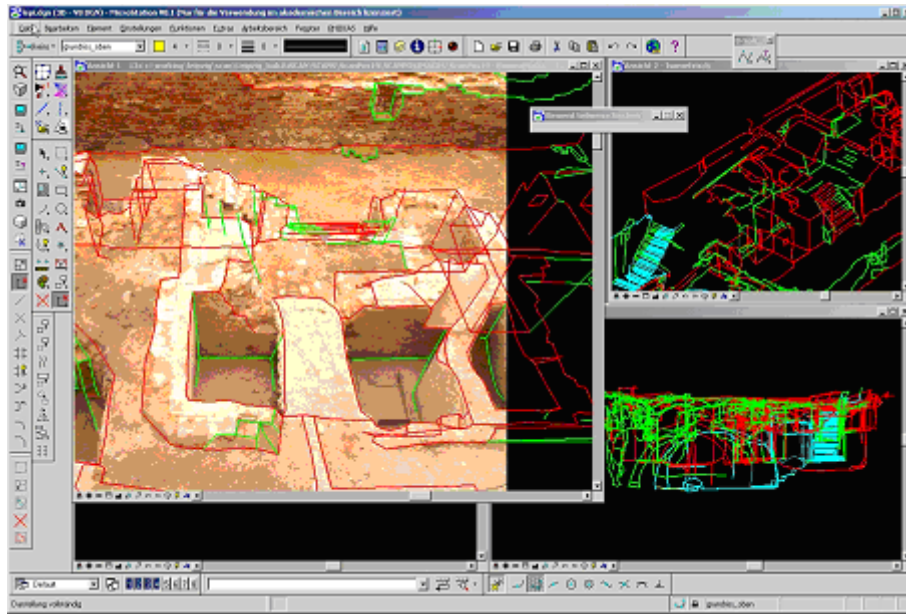


Abb. 28: Screenshot des PHIDIAS-Projekts zur Erstellung eines Drahtgittermodells mit mehreren Ansichten.

4.7 Orthofoto in PHIDIAS

In der Software PHIDIAS lassen sich ebenfalls Orthofotos erzeugen. Im Gegensatz zu RiSCAN PRO ist dies jedoch nur für die Einzelbildentzerrung geeignet (Abb. 29). Dazu wird das zu entzerrende Bild mit der Punktwolke geladen. Die Entzerrungsebene muss in einem ersten Schritt definiert werden, Punkte außerhalb dieser Ebene sollten deaktiviert werden. Für die weitere Entzerrung ist die Auflösung des zu erstellenden Orthofotos zu definieren. Im Rahmen dieses Projekts wurde PHIDIAS so erweitert, dass neben dem Orthofotos auch ein Word File erstellt wird, sodass das georeferenzierte Bild in einem GIS weiter verwendet werden kann



Abb. 29: In PHIDIAS erstelltes Orthofoto eines Einzelbildes.

Dadurch, dass nur Einzelbilder entzerrt werden können ist der Vorgang in PHIDIAS für größere Bildsequenzen oder topographisch komplexe Situationen wie im vorliegenden Fall arbeitsaufwändiger als in RiSCAN PRO.



Abb. 30: Zusammengesetztes Orthofoto aus mehreren Einzelbildern erstellt in PHIDIAS.

Für die Erstellung von Orthofotos sollte nicht mit einer sehr hohen Punktauflösung gearbeitet werden, da dadurch das Rauschen der Punktwolke zu sichtbaren Distortionen im Orthofoto führt. Linear reduzierte Punktwolken bergen hingegen den Nachteil, dass die Kantendefinition des Orthofotos schlechter wird. Der Weg der derzeit in RiSCAN PRO verfolgt wird, nämlich das triangulierte mesh in Abhängigkeit der Topographie intelligent zu dezimieren führt zu glatteren Flächen und schärferen Kanten im Orthofoto.

4.8 Archäologische Interpretation im GIS

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, wie eine mit einem 3D Laser Scanner aufgenommene Punktwolke mit entsprechenden digitalen Bildern weiter ausgewertet werden kann. Die dabei erzielten Ergebnisse: Triangulierte Punktwolke, Höhengichtenmodell, Drahtgittermodell und Orthofotos können jedoch nicht als archäologisch relevante Auswertung gesehen werden. Es handelt sich dabei um weitere Produkte zur Dokumentation der aufgenommenen Befundsituation. Aufgrund dieser Unterlagen hat im Anschluss eine archäologische Interpretation zu erfolgen. Die meisten der bisher besprochenen Schritte lassen sich bereits parallel zur Grabung im Anschluss auf die Scanneraufnahme vornehmen. Damit ist gewährleistet, dass die weitere Auswertung am Originalbefund verifiziert werden kann.

Die weitere archäologische Interpretation der dreidimensionalen Dokumentation kann in unterschiedlichen Softwarepaketen oder in Form von Handzeichnungen auf der Grundlage von Orthofotos erfolgen. Wir haben uns exemplarisch für eine archäologische Interpretation in einem GIS entschieden, da die GIS-Funktionalität den Anforderungen einer umfassenden archäologischen Interpretation, wie auch der systematischen Archivierung der Information unserer Ansicht nach am besten entspricht (NEUBAUER 2005).

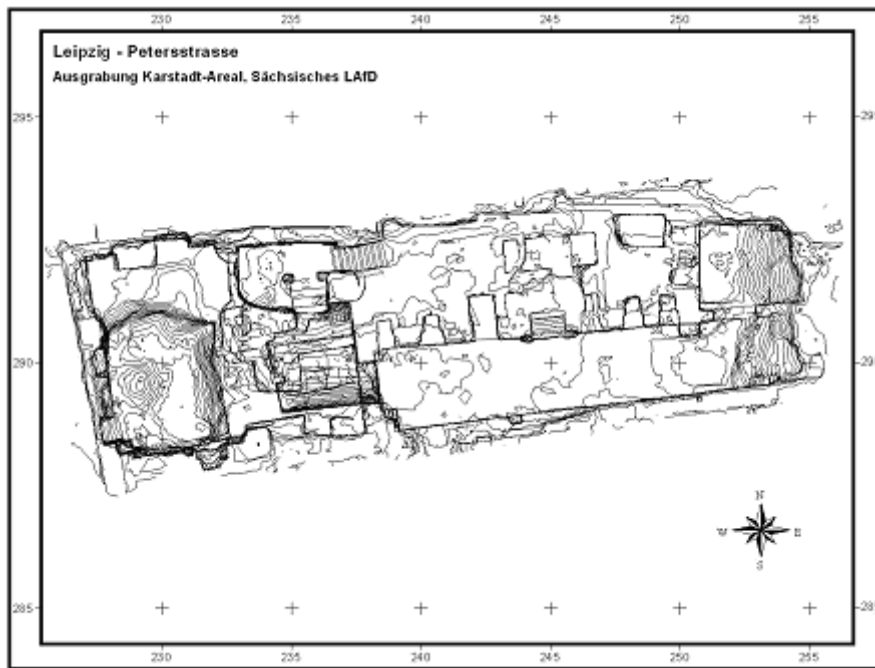


Abb. 31: Im GIS erstellter Übersichtsplan der Grabung Petersstrasse 33 in Leipzig mit 10 cm Höhenschichtlinien.

Im vorliegenden Fall wurde mit dem GIS ArcView gearbeitet. In das GIS lassen sich sowohl Punktwolken, Liniendarstellungen wie Höhenschichtlinien, einzeln digitalisierte Kanten oder Orthofotos importieren und weiter im Sinne einer thematischen archäologischen Interpretation verarbeiten. Das GIS bietet eine gute Funktionalität zur systematischen Erstellung von Plänen in beliebigem Maßstab, mit Legenden, Nordpfeil, Koordinatengitter, zusätzlichen Beschriftungen und erläuternde Grafiken (Abb. 31, 32, 33).

Von besonderer Bedeutung ist jedoch die Möglichkeit der thematischen grafischen Interpretation mit einer direkten Verbindung mit einer Datenbank. Im vorliegenden Fall wurde auf der Grundlage der Orthofotos eine thematische Interpretation von Teilbereichen erstellt. Baufugen, Ausbruchkanten oder Bodenniveaus wurden als Linien dargestellt. Einzelne Bauteile wie Mauern, Gewölbebögen, Gewölbeansätze wurden als Polygone mit unterschiedlicher Farbcodierung oder Schraffur in Form von Polygonen dargestellt. Ebenfalls als Polygone wurden Verputzreste wie auch unterschiedliche Mörtel der verschiedenen Mauern und Bauphasen umgezeichnet und mit entsprechend farbcodierten Schraffuren versehen. Steine und Ziegel wurden in Abhängigkeit der einzelnen Baubefunde ebenfalls als Polygone dargestellt (Abb. 32, 33). Mit diesem Werkzeug lässt sich aus den aus den Scannerdaten abgeleiteten Darstellung eine effiziente archäologische Interpretation durch den Fachmann erstellen.

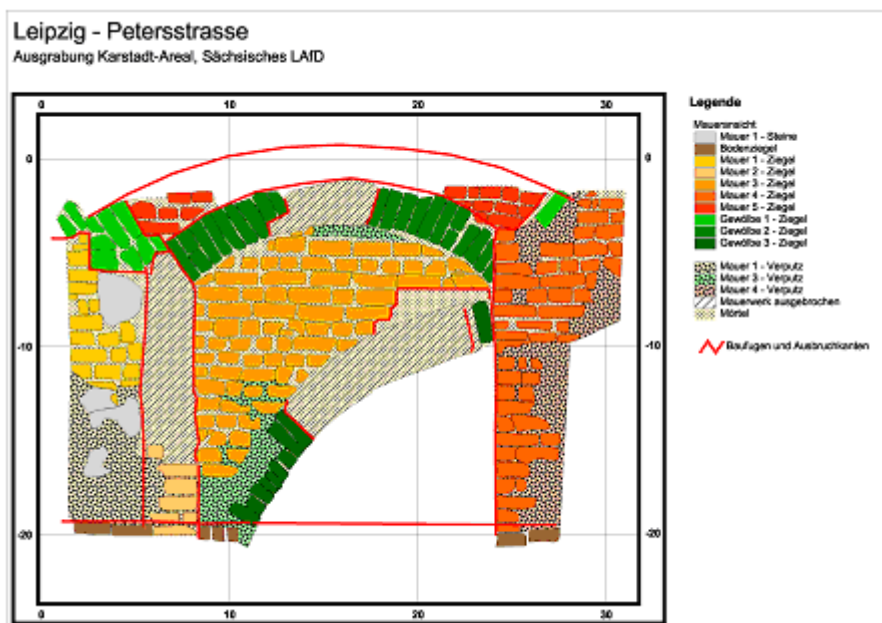


Abb. 32: Archäologische Interpretation des Gewölbedurchgangs erstellt im GIS.

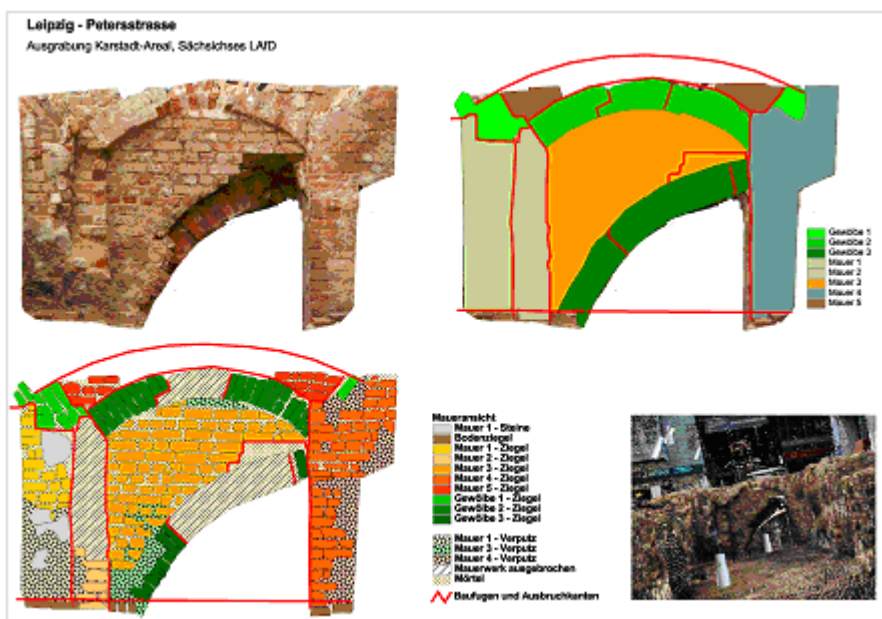


Abb. 33: Zusammenstellung des Orthofotos, der generalisierten und detaillierten Mauerbefunde mit 3D Darstellung der texturierten Punktwolke des Gewölbedurchgangs.

5 Literatur

Afshar, M., Boroumand M., Studnicka N. (2002). Archaeological Scanning of Persepolis. Using 3D laser scanning for mapping archaeological sites in Iran. *GIM international*, 6, 16, 2002.

Doneus, M., Neubauer, W., Studnicka, N. (2003). Digital Recording of Stratigraphic Excavations. In: *Proceedings of the XIXth International Symposium CIPA 2003 "New Perspectives to Save Cultural Heritage"*. The CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage, Vol. XIX, 2003, 451-456.

- Doneus, M., Neubauer, W. (2004). Digital recording of stratigraphic excavations. Enter the Past. The E-way into the four dimensions of cultural heritage. BAR International Series 1227, 2004, 113-116.
- Effkemann C. (2003): Integrierte Auswertung photogrammetrischer Aufnahmen und Laserscannerdaten mit PHIDAS. In „Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik“, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003, Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 203-208.
- Groh, S., Neubauer, W. (2003). Einsatz eines terrestrischen 3D-Laserscanners in Ephesos. Jahreshefte des ÖAI in Wien, Bd. 72, 2003, 111-122.
- Innovmetric (2004). Hersteller von Polyworks, Homepage www.innovmetric.com, zuletzt besucht Februar 2004.
- Kitware (2004). Hersteller/Open Source Manager des Visualisation Tool Kits (VTK). Homepage www.vtk.org , zuletzt besucht Februar 2004.
- Kubit (2004). Programm PointCloud, Homepage www.kubit.de, zuletzt besucht Februar 2004.
- Marschallinger & Stejskal (2004). Programm ScanDig3D als Plugin zu AUTOCAD, Homepage www.scandig3d.com, zuletzt besucht Februar 2004.
- Neubauer, W. (2005). GIS in Archaeology – The Interface between Prospection and Excavation. Archaeological Prospection 2005, in press.
- Phocad (2004). Hersteller von PHIDIAS, Homepage www.phocad.de, zuletzt besucht Februar 2004.
- RIEGL* Laser Measurement Systems GmbH, technical data at www.riegl.com , 2004.
- Ullrich, A. et al. (2001). Time-of-flight-based 3D imaging sensor with true-color channel for automated texturing, Optical 3-D Measurement Techniques V, Conference Proceedings p. 2-9, Vienna, October 1-4, 2001.
- Studnicka, N., Riegl, J., Ullrich, A. (2003). Zusammenführung und Bearbeitung von Laser-Scandaten und hochauflösenden digitalen Bildern eines hybriden 3D Laser Sensor Systems. In „Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik“, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Ullrich, A., Schwarz, R., Kager, H.(2003). Using hybrid multi-station adjustment for an integrated camera laser-scanner system. In Optical 3-D Measurement Techniques VI, Volume 1, Herausgeber Grün, A. und Kahmen H., September 2003 .
- Ullrich, A., Schwarz, R., Kager, H. (2003). Using hybrid multi-station adjustment for an integrated camera laser-scanner system. In Optical 3-D Measurement Techniques VI, Volume 1, September 2003 .
- Ullrich, A., Studnicka N., Riegl J., Neubauer W. (2004). 3D laser-sensors and their application in Archaeology and modeling of historic buildings, Archaeological Prospection 2004, in press.