

Structure-from-Motion und Pole-Aerial-Photography für die Dokumentation archäologischer Grabungen

Ronny Weßling – Jakob Maurer – Alexandra Krenn-Leeb

Einführung

Der immer breiter werdende Einsatz digitaler Dokumentationsmethoden führte im Verlauf der letzten 15 Jahre zu revolutionären Fortschritten im Bereich der archäologischen Grabungstechnik. Die Einführung von Totalstation und Differential-GPS war grundlegend für die Möglichkeit einer effizienten dreidimensionalen Oberflächendokumentation (vgl. *Barceló et al. 2003*). In weiterer Folge führten terrestrische Laserscanner zu einer deutlichen Qualitätssteigerung der Oberflächenmodellierung (*Doneus et al. 2005*). Aufgrund ihrer hohen Anschaffungskosten kommen sie jedoch nach wie vor nicht flächendeckend zum Einsatz. Als kostengünstigere Alternative werden daher seit einigen Jahren vermehrt Ansätze des passiven Image-based-Modeling verfolgt (vgl. *Doneus et al. 2011*). Dies ist nicht zuletzt auf Fortschritte im Bereich von Fotogrammetrie und Computer-Vision sowie auf die Verbesserungen der Rechenleistung von handelsüblichen Computern zurückzuführen (*Verhoeven et al. 2012b, 8*). Bislang wurden Structure-from-Motion-Verfahren (SfM) jedoch eher für großflächige Geländemodellierungen (z. B. *Bogacki et al. 2010*) und für die Dokumentation von Einzelobjekten (z. B. *Koutsoudis et al. 2009*) angewendet. Immer intensiver werden jedoch auch Versuche betrieben, diese Methode systematisch in den archäologischen Ausgrabungsprozess zu implementieren (z. B. *Krenn-Leeb et al. 2012* sowie *De Reu et al. 2012*).

Wesentliche Aufgabe einer archäologischen Grabung ist es, die einzigartige Stratigrafie des Grabungsareals zu dokumentieren. Dies geschieht durch die Abgrenzung der einzelnen stratigrafischen Einheiten und durch den Versuch, sie in der umgekehrten Reihenfolge ihrer Ablagerung wieder freizulegen (*Harris 1979, 111*). Dabei werden die einzelnen stratigrafischen Einheiten zwangsläufig zerstört. Deshalb sollten die physischen und räumlichen Eigenschaften jeder einzelnen Oberfläche – die als Resultat einer Handlung oder eines Vorgangs betrachtet werden kann – dokumentiert werden. Die Darstellung von Oberflächen als georeferenziertes fotorealisiertes Geländemodell eignet sich hervorragend für eine derartige Dokumentation und die Erstellung der Oberflächenmodelle durch die Anwendung von Structure-from-Motion- und Multi-View-Stereo-Verfahren ist vergleichsweise wenig kostenintensiv. Der vorliegende Beitrag versucht am Beispiel der archäologischen Ausgrabung „Meidling im Thale/Kleiner Anzingerberg“ kurz darzulegen, welche Möglichkeiten die Single-Surface-Dokumentation mittels Structure-from-Motion bietet und wie die Datenaufnahme im Gelände standardisiert und über die Anwendung bodengestützter Luftbildarchäologie (Pole-Aerial-Photography) optimiert werden kann.

Structure-from-Motion

Mithilfe fotogrammetrischer Methoden lassen sich aus 2D-Ansichten Aussagen über die 3D-Geometrie abgebildeter Objekte generieren (*Remondino et al. 2006*). Dazu bedarf es jedoch einer Kamerakalibrierung, das heißt, es müssen Angaben über die inneren (Brennweite, Position des Bildhauptpunktes, Linsenverzeichnung) und äußeren (Position und Orientierung der Kamera im Raum) Parameter der Kamera bestimmt werden. Während stereoskopische Fotogrammetrie diese Parameter vor allem aus einem Netz an Passpunkten gewinnt, bedient sich Structure-from-Motion verschiedenster Algorithmen, die im Bereich der Computer-Vision entwickelt wurden, um sowohl Kamerastandpunkte und -orientierung als auch die 3D-Geometrie der zu analysierenden Szene zu berechnen (*Ullman 1979*). Computer-Vision, also jene Wissenschaft, die versucht, über automatisierte mathematische Berechnungen Informationen aus

Bildern zu gewinnen (Szeliski 2010), hat nicht zuletzt durch verschiedenste Softwareveröffentlichungen¹ auch in der Archäologie Beachtung erfahren.

Die Anwendung von Structure-from-Motion resultiert in einer Punktwolke sowie in der Angabe der Lage und Orientierung von Kamerastandpunkten und der inneren Parameter der Kamerakalibrierung. Jeder der Punkte in der Punktwolke stellt dabei ein auf mindestens zwei einander überlappenden Bildern gefundenes Merkmal da. Diese Merkmale können in der Folge verdichtet, miteinander vermascht und texturiert werden, so dass als fertiges Produkt ein dreidimensionales fotorealistisches Modell entsteht.

Meidling im Thale/Kleiner Anzingerberg

Auf der kupferzeitlichen Siedlung am Kleinen Anzingerberg (Katastralgemeinde Meidling, Marktgemeinde Paudorf, Verwaltungsbezirk Krems, Niederösterreich) werden seit 1999 unter der Leitung von Alexandra Krenn-Leeb archäologische Ausgrabungen durchgeführt (Krenn-Leeb 2010). Die Untersuchungen, die in ein großes Forschungsprojekt zur Umwelt-, Wirtschafts-, Landschafts- und Sozialarchäologie („Humanökologie der Kupferzeit“) eingebunden sind, werden seitens des Landes Niederösterreich und der Universität Wien gefördert.

Die exzellent erhaltene Fundstelle befindet sich am äußersten Südwestrand des Dunkelsteinerwaldes am oberen Rand eines nach Süden geneigten Hanges (Abb. 1). Der aktuell geöffnete Schnitt 5 mit einer Größe von 6 x 8 m beinhaltet mehrere übereinanderliegende Hausgrundrisse, zu denen unter anderem mehrphasige Kuppelöfen, Begehungshorizonte in Form von Stampflehböden, verstrichene Wandreste, Pfostengruben, zahlreiche Aktivitätszonen sowie diverse großflächige Lehmversturzschichten und feinste Brandschichten gehören. Das Fundmaterial wird der Jevišovice-Kultur zugeordnet.

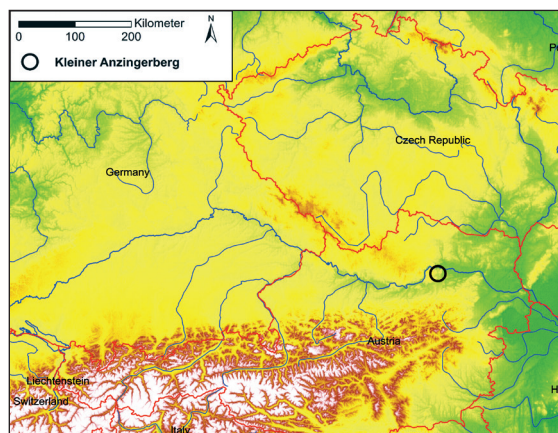


Abb. 1. Die Lage der kupferzeitlichen Siedlung Meidling im Thale/Kleiner Anzingerberg, Niederösterreich. Quelle: R. Weßling, Projekt Meidling, IUHA Wien.

Obr. 1. Poloha eneolitického sídliště Meidling im Thale/Kleiner Anzingerberg, Dolní Rakousko.

Structure-from-Motion und Single-Surface-Dokumentation

Die komplexe und äußerst konzentrierte Befundsituation am Kleinen Anzingerberg stellte die Verfasser vor besondere Herausforderungen bei der Auswahl und Gestaltung der Dokumentationsmethoden. Der eigene Anspruch war hierbei neben einer möglichst genauen und nachvollziehbaren Dokumentation vor allem eine kosten- und zeiteffiziente Umsetzung. Da die grundlegende Infrastruktur für computergestütztes Image-based-Modeling in Form einer Totalstation (Leica TCR407 Power) und einer digitalen Spiegelreflexkamera (Nikon D5000 mit 18–55 mm Nikkor Objektiv, Sensorgröße 23,6 × 15,8 mm, Pixelgröße 5,5 µm) bereits vorhanden war, wurde am Ende der Grabungskampagne 2011 zunächst ein erster Versuch gestartet. Mit der Berechnung des 3D-Modells eines Ofenbefundes wurde das Potential der Methode evaluiert (Krenn-Leeb et al. 2012). Auf diesen Erkenntnissen aufbauend wurde Image-based-Modelling während der Grabungskampagne 2012 in den Workflow der Single-Surface-Dokumentation (Doneus et al. 2005, 226) implementiert. Als Single-Surface-Dokumentation wird das

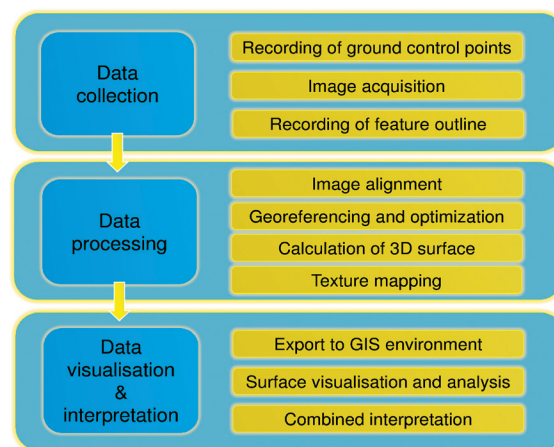


Abb. 2. Structure-from-Motion. Schematischer Arbeitsablauf bei der Dokumentation archäologischer Stratifikationseinheiten. Quelle: R. Weßling, Projekt Meidling, IUHA Wien.

Obr. 2. Structure-from-Motion. Schéma pracovního postupu při dokumentaci archeologických stratifikačních jednotek.

¹ Zu nennen sind vor allem Bundler, VisualSFM, Microsoft Photosynth, Autodesk 123D Catch und Agisoft PhotoScan.

separate Erfassen von Ober- und Unterfläche (top und bottom surface) jeder einzelnen Stratifikationseinheit bezeichnet. In der Grabungssaison 2012 wurden mit Hilfe von Structure-from-Motion 125 Einzelflächen in 84 Modellen dokumentiert. Herangezogen wurden dafür insgesamt 6.000 Fotos (im Mittel 71 Fotos je Modell).

Arbeitsablauf

Die Anwendung von Structure-from-Motion zur systematischen Dokumentation archäologischer Stratifikationseinheiten kann grundsätzlich in drei Schritte (vgl. z. B. *Ansorge 2005*, 50) unterteilt werden (*Abb. 2*).

1. Datenaufnahme

Der erste Schritt erfolgt gänzlich auf der Grabung. Nach der Verteilung von mindestens drei Passpunkten und der Identifikation der Stratifikationseinheit wird diese zur Abdeckung aller relevanten Teilflächen nach Möglichkeit von allen Seiten aus zahlreichen unterschiedlichen, in den einzelnen Schritten aber nicht zu stark voneinander abweichenden Blickwinkeln fotografiert. Die einzelnen Bilder sollten sich zu etwa 80 % überlappen und eine hohe Schärfentiefe sowie gleichmäßige Belichtungsverhältnisse aufweisen. Schattenwirkungen sind zu vermeiden (*Wenzel et al. 2013*, 257). Wie bereits eingangs erwähnt, ist keine kalibrierte Kamera vonnöten. Bei höherer Bildqualität steigt allerdings auch die Qualität des resultierenden 3D-Modells, weshalb auf möglichst hochwertige Kameramodelle zurückgegriffen werden sollte. Es wird empfohlen, das kameraeigene RAW-Format² heranzuziehen (vgl. *Verhoeven 2010*). Nach dem Abschluss der Fotodokumentation ist die genaue Lage der Passpunkte aufzunehmen. Selbige sollten keine reflektierende Oberfläche besitzen, da dies hinderlich für die automatisierte Merkmalerkennung ist. Für die Erstellung von Plänen und als Grundlage für die spätere Beschneidung der Modelle sind außer den Passpunkten auch die Umriss der einzelnen Schichtober- und unterflächen mit der Totalstation einzumessen. Die zusätzliche Aufnahme von Höhenpunkten innerhalb der Schichtgrenzen ist nicht mehr notwendig, da die Reliefinformationen später bei Bedarf direkt aus dem Modell abgegriffen werden können.

2. Datenverarbeitung

Die in dieser Studie verwendete Software Agisoft PhotoScan Professional Edition Version 0.9.0 build 1586 (64bit) weist einen dreistufigen Workflow auf:³ photo alignment, geometry building und texture building (*Abb. 3*). Im ersten Arbeitsschritt, der allgemein als „Structure-from-Motion“ bezeichnet werden kann, wird eine Punktwolke übereinstimmender Bildmerkmale erstellt. Zu diesem Zweck erkennen, beschreiben und vergleichen die Algorithmen der Software einzelne Bildmerkmale und ihre Umgebung miteinander und berechnen über die Bestimmung der inneren und äußeren Parameter der Kamerakalibrierung ihre Lage im Raum. Über einen Bündelblockausgleich wird ihre Position zusätzlich optimiert. Nach diesem ersten Schritt werden verschiedene Multi-View-Stereo-Algorithmen (MVS) angewendet, mit denen die Punktwolke auf Pixelebene verdichtet wird (*Seitz et al. 2006*). Die verdichtete Punktwolke wird in weiterer Folge zu einem detaillierten Oberflächenmodell vermascht. Im letzten Schritt des vorgegebenen PhotoScan-Workflows wird auf diese Oberfläche eine aus den Bildern abgeleitete Textur projiziert (*Verhoeven 2011*, 68).

Im Gegensatz zur Stereofotogrammetrie kann das

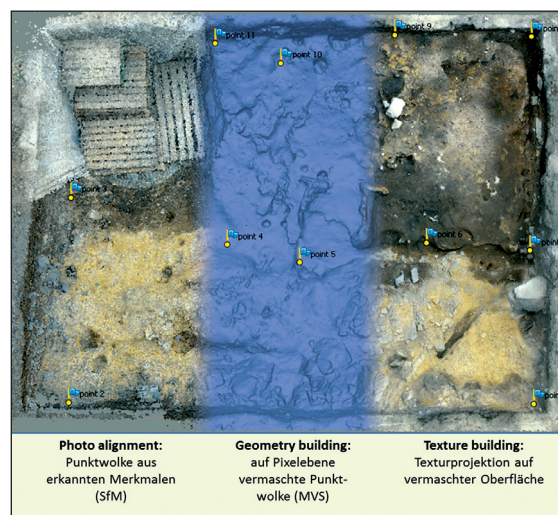


Abb. 3. Structure-from-Motion. Schrittweise Erstellung eines 3D-Modells der Ausgrabung am Kleinen Anzingerberg mit Agisoft PhotoScan. Quelle: R. Weßling, Projekt Meidling, IUHA Wien.

Obr. 3. Structure-from-Motion. Postupné vyhotovení trojrozměrného modelu archeologického výzkumu v Kleiner Anzingerberg pomocí Agisoft PhotoScan.

² Da das Bildrauschen maßgeblichen Einfluss auf die Modellgeometrie haben kann, sollte das RAW-Format nur gewählt werden, wenn die kamerainterne JPG-Komprimierung nicht über einen besseren Rauschfilter verfügt als die für die Nachbearbeitung der RAW-Aufnahmen eingesetzte Software.

³ Ein Bericht zur Anwendbarkeit von PhotoScan in der Luftbildarchäologie wurde bereits von Geert Verhoeven vorgelegt (*Verhoeven 2011*).

Oberflächenmodell bei der Anwendung von Structure-from-Motion nur in einem lokalen Koordinatensystem berechnet werden. Ohne die Angabe eines Maßstabes kann das Modell nicht skaliert und ohne jene von mindestens drei Passpunkten (ground control points) nicht georeferenziert werden. Die Skalierung beziehungsweise Georeferenzierung geschieht in PhotoScan über eine Helmert-Transformation (Remondino 2013, 120). Die Angabe von Passpunkten kann darüber hinaus aber auch zur Kontrolle und zur Verbesserung der 3D-Geometrie des Modells dienen. Aus diesem Grund ist es von Vorteil, mehr als drei Passpunkte zu verwenden und selbige gleichmäßig über die Oberfläche zu verteilen (Verhoeven et al. 2012a, 2062).

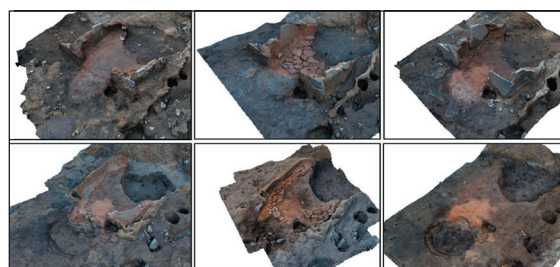


Abb. 4. Visualisierung von 3D-Daten. Ausgewählte Bauphasen eines Ofenbefundes am Kleinen Anzingerberg. Quelle: R. Weßling, Projekt Meidling, IUHA Wien.

Obr. 4. Vizualizace trojrozměrných dat. Vybrané stavební fáze pece na lokalitě Kleiner Anzingerberg.

3. Datenvisualisierung und Interpretation

Zur Visualisierung von Oberflächenmodellen gibt es verschiedene Möglichkeiten, die vor allem im Bereich der Kartografie (Imhof 2007) und Fernerkundung (Challis et al. 2011) entwickelt wurden. Die Modelle der Ober- und Unterflächen von Stratifikationseinheiten können entweder im 3D-Raum oder als 2D-Abbildung dargestellt werden. Zur 3D-Ansicht lässt sich etwa ein PDF-Dokument exportieren, das für eine rasche Ansicht, aber auch für die Datenarchivierung zu empfehlen ist. Für weitergehende Visualisierungen, Interpretationen und räumliche Analysen können die Modelle über verschiedene Dateiformate in ein Geografisches Informationssystem eingelesen werden (Opitz et al. 2012), wobei im konkreten Fall ESRI ArcGIS 10.1 eingesetzt wurde. In diesem können die eingemessenen Umrisslinien sowie alle anderen Grabungsdaten (z. B. Fundmaterial, entnommene Proben, verbale Beschreibungen) mit den Modellen verknüpft und kombiniert interpretiert werden. In der GIS-Anwendung ArcScene kann sich der Nutzer darüber hinaus interaktiv durch die texturierten Modelle bewegen. Mit dem internen Zeitschieberegler von ArcGIS lassen sich die Modelle auch in einer vierten Dimension animieren. Dazu werden die fotorealistischen und geometrisch präzisen Oberflächenmodelle der ursprünglichen Schichtabfolge gemäß angeordnet und automatisiert ein- und ausgeblendet (Abb. 4). Durch die Schaffung dieser vierdimensionalen virtuellen Realität (vgl. Reilly 1991) steht ein Instrument zur Verfügung, mit dem der Grabungsprozess und die Definition von Schichten nachträglich kontrolliert und evaluiert werden kann. Eine derartige Dokumentation und Darstellung der Oberflächenmodelle liefert einen wichtigen Beitrag zur Objektivierung der Grabungsergebnisse. Die 2D-Darstellung der Modelle erfolgt in ESRI ArcMap durch verschiedenartige Ableitungen des digitalen Oberflächenmodells (DEM). Zum Verständnis der Topografie eignen sich insbesondere Darstellungen der Hangneigung (slope), der Schummerung (hillshade) und der Isohypsen (contour). Zudem ist es möglich, an jeder beliebigen Stelle einen Profilschnitt zu erstellen und als Profillinie darzustellen (Abb. 5). Da von jeder Stratifikationseinheit der Grabung digitale Geländemodelle vorhanden sind, lässt sich die gesamte Grabung an jeder gewünschten Position schneiden und ein Profil extrahieren. Dies ist im gegenständlichen Fall zum Verständnis der komplexen Stratigrafie überaus hilfreich. Doch auch eine texturierte 2D-Darstellung ist möglich: Das Modell kann als Orthofoto exportiert werden und stellt damit eine sehr gute Grundlage zur Planerstellung dar, weil das Orthofoto an jeder Stelle eine maßstabgerechte Darstellung garantiert und nicht den Abbildungsfehlern herkömmlicher projektiver Bildentzerrungen unterliegt, die nur auf der Entzerrungsebene eine lagegerechte Wiedergabe aufweisen.

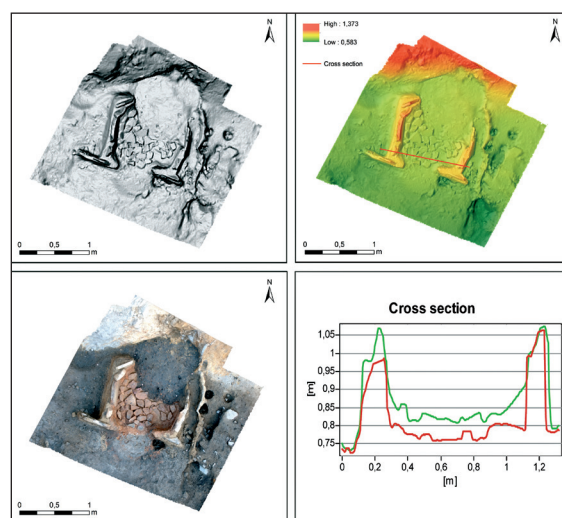


Abb. 5. Zweidimensionale Visualisierung von Oberflächenmodellen. Oben Darstellung einer Stratifikationseinheit als digitales Höhenmodell (Hillshade mit hinterlegtem Slope beziehungsweise DEM), unten Darstellung als Orthofoto beziehungsweise Profilschnitt. Der Profilschnitt zeigt zusätzlich auch die Oberfläche einer stratigrafisch älteren Schicht. Quelle: R. Weßling, Projekt Meidling, IUHA Wien.

Obr. 5. Dvojrzměrná vizualizace povrchových modelů. Nahoře znázornění stratigrafické jednotky jako digitálního výškového modelu, dole znázornění jako ortofota, resp. řezu. Řez ukazuje rovněž povrch stratigraficky starší vrstvy.

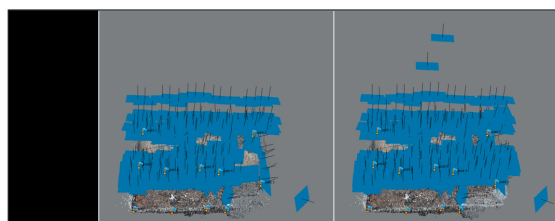
Pole-Aerial-Photography und Structure-from-Motion

Während der Grabung am Kleinen Anzingerberg war das Grabungsteam stets darum bemüht, die Genauigkeit und die Beschaffenheit der Oberflächenmodelle zu optimieren. Dies kann einerseits durch eine hohe Anzahl von aufgenommenen Bildern erreicht werden. Es ist jedoch zu beachten, dass bei einer hohen Zahl von Fotos der für die Gewinnung und Prozessierung der Daten notwendige Zeitaufwand drastisch steigen kann und dass ab einer bestimmten Anzahl von Fotos das Modell durch ein verstärktes Rauschen der Oberfläche wieder an Qualität verliert. Andererseits kann versucht werden, die Qualität der Aufnahmen selbst zu verbessern (Schärfentiefe, Belichtungsverhältnisse, Sensorrauschen, Auflösung etc.). Hier werden allerdings – abhängig von der gewählten Kamera und in Bezug auf die Belichtungsbedingungen auf der Grabung – schnell technische Grenzen erreicht. Mit einer systematischen und durchdachten Auswahl der Kamerastandpunkte werden die Algorithmen bei der Durchführung von Structure-from-Motion- und Dense-Multi-View-Stereo-Verfahren unterstützt und präzisere Modellgeometrien sowie schnellere Rechenzeiten erreicht. Die Wahl der Kamerastandpunkte sollte so gewählt werden, dass sich der Fotograf hemisphärenartig um das Objekt bewegt und dabei überlappende Bilder erzeugt. Zusätzlich wird vom Softwareentwickler Agisoft Folgendes empfohlen: *“It is better to capture only zenithal photos, yet the oblique ones are processed correctly by PhotoScan and almost do not influence the quality of the reconstruction results. If you have an excessive set of photos, you can exclude oblique photos from processing. It could slightly improve the results.”*⁴ (Agisoft Wiki).

Diese Aussage, im Zweifelsfall besser Senkrecht- statt Schrägaufnahmen zu produzieren, ist prinzipiell korrekt und bezieht sich auf die Ebene senkrecht zum Objekt. Da stratigrafische Einheiten eine Tendenz zur Horizontalität aufweisen (Harris 1979, 112), ist die Anfertigung von lotrechten Aufnahmen auf der Grabung in jedem Fall sinnvoll. Zahlreiche Tests zeigten, dass die Modellqualität und Geschwindigkeit der Modellerstellung durch einander überlappende Senkrechtaufnahmen optimiert werden können. Großflächige Überblicksaufnahmen können zudem, insbesondere bei mangelnder Stereoabdeckung durch Detailfotos, den Rechenprozess der Merkmalerkennung erheblich verbessern (Abb. 6). Dies ist ebenfalls durch das Prinzip *„one panorama each step“* (Wenzel et al. 2013, 256), das die Bedeutung von Überblicksaufnahmen mit Ansichten des ganzen Objektes aus verschiedenen Richtungen klar herausstellt, belegt. Demnach sollte im Idealfall von jedem Kamerastandpunkt zusätzlich zu den Detailansichten eine Überblicksaufnahme des ganzen Objektes erstellt werden. Am Kleinen Anzingerberg wurden derartige Überblicks- und Senkrechtaufnahmen mithilfe von Pole-Aerial-Photography erzeugt. Pole-Aerial-Photographie ist eine bodengestützte Art der Luftbildarchäologie, die verschiedenste Arten von Stäben und Stangen verwendet, um die Kamera in die Höhe zu heben. Die Verwendung von Masten zur fotografischen Dokumentation archäologischer Grabungen reicht zumindest bis ins Jahr 1928 zurück (Kriegler 1928).

Bereits vor der Verwendung von Image-based-Modelling auf der Grabung am Kleinen Anzingerberg wurden von R. Weßling zwei derartige Kameraplattformen entwickelt, um von besonders aussagekräftigen Oberflächen großflächige Senkrechtaufnahmen als Grundlage für eine projektive Bildentzerrung zu erstellen. Dabei wird das Bild in ein ebenes Koordinatensystem transformiert, um einen Fotoplan mit einheitlichem Maßstab zu erstellen. Das Problem bei ebener projektiver Entzerrung ist allerdings, dass bei Höhenabweichungen von der Entzerrungsebene außerhalb des Bildmittelpunkts Lagefehler entstehen. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde auf Techniken der Pole-Aerial-Photography zurückgegriffen.⁵ Für die problemlose Anfertigung von Senkrechtaufnahmen aus größerer Höhe wurden ein Fotokran (Opterix 2.0) sowie eine Teleskopstange (PhotoMob) entwickelt.

Der Fotokran ist an das Bauprinzip kommerzieller Kamerakräne angelehnt. Es handelt sich um einen bis zu 10,8 m langen Kameraausleger, der frei dreh- und schwenkbar auf einem Dreibeinstativ montiert ist und über Seilzüge abgefangen wird. Der mit Gegengewichten ausbalancierte Kran lässt sich ohne Kraftaufwand in die gewünschte



aligned photos	216 of 254	246 of 256
number of points (sparse point cloud)	75954	82012
computing time	1518,71 s	1474,93 s
computing time per point	0,02 s	0,018 s
reprojection error	0,010 m/ 0952 pix	0,010 m/ 0.498 pix

Abb. 6. Structure-from-Motion. Die Verwendung großflächiger Senkrechtaufnahmen führt zu einer beschleunigten und präziseren Berechnung des 3D-Modells. Links ohne, rechts mit Überblicksaufnahmen. Quelle: R. Weßling, Projekt Meidling, IUHA Wien.

Obr. 6. Structure-from-Motion. Použití veľkoplošného kolmého snímokvání vede k rýchlemu a precíznemu výpočtu trojrozmerného modelu. Vlevo bez, vpravo s prehľadovými snímkami.

4 Freie Übersetzung: „Es ist besser, nur Senkrechtaufnahmen zu erzeugen. Dennoch werden auch Schrägaufnahmen von PhotoScan korrekt prozessiert. Sie haben fast keinen Einfluss auf die Qualität des Rekonstruktionsergebnisses. Wenn besonderes viele Bilder vorhanden sind, können die Schrägaufnahmen weggelassen werden. Dies könnte das Ergebnis etwas verbessern.“

5 Für einen Überblick über verschiedene Kameraplattformen in der Archäologie vgl. Verhoeven 2009.

Position bringen. Die Kamera selbst ist frei hängend montiert und garantiert dadurch unabhängig vom Neigewinkel des Auslegers ein stets senkrecht nach unten gerichtetes Bild aus einer Höhe von bis zu 10,5 m (Abb. 7). Die Kontrolle des Bildausschnitts und die Fernauslösung der Kamera geschehen über ein Bildübertragungssystem. Ein vergleichbares System von Kameraaufhängung und Bildübertragung kommt auch bei der Teleskopstange zum Einsatz. Selbige erlaubt Aufnahmen aus einer Höhe von bis zu 4,5 m (Krenn-Leeb *et al.* 2012). Der Fotokran und die Teleskopstange sind aufgrund der Möglichkeit der Anfertigung von Senkrecht- und Überblicksaufnahmen auch für die Dokumentation mittels Image-based-Modelling sehr gut nutzbar. Der Fotokran dient hierbei für großflächige (gesamter Grabungsschnitt), die Teleskopstange eher für kleinflächige Überblicksaufnahmen. Außerdem können mit Hilfe der Teleskopstange überlappende Bildfolgen (sowohl overlap als auch sidelap) erstellt werden, so dass eine „Befliegung“ des Schnittes gemäß dem Prinzip stereoskopisch auswertbarer Reihenluftaufnahmen erfolgt (Abb. 8). Von steilen, nicht horizontal gelegenen Oberflächen im Grabungsbereich, müssen im Anschluss allerdings auch noch ausgewählte Schrägaufnahmen angefertigt werden.



Abb. 7. Fotodokumentation. Der Fotokran erlaubt großflächige Überblicksaufnahmen aus einer Höhe von bis zu 10,5 m. Quelle: A. Krenn-Leeb, Projekt Meidling, IUHA Wien.

Obr. 7. Fotodokumentace. Fotografické rameno umožňuje velkoplošné snímky z výšky až 10,5 m.

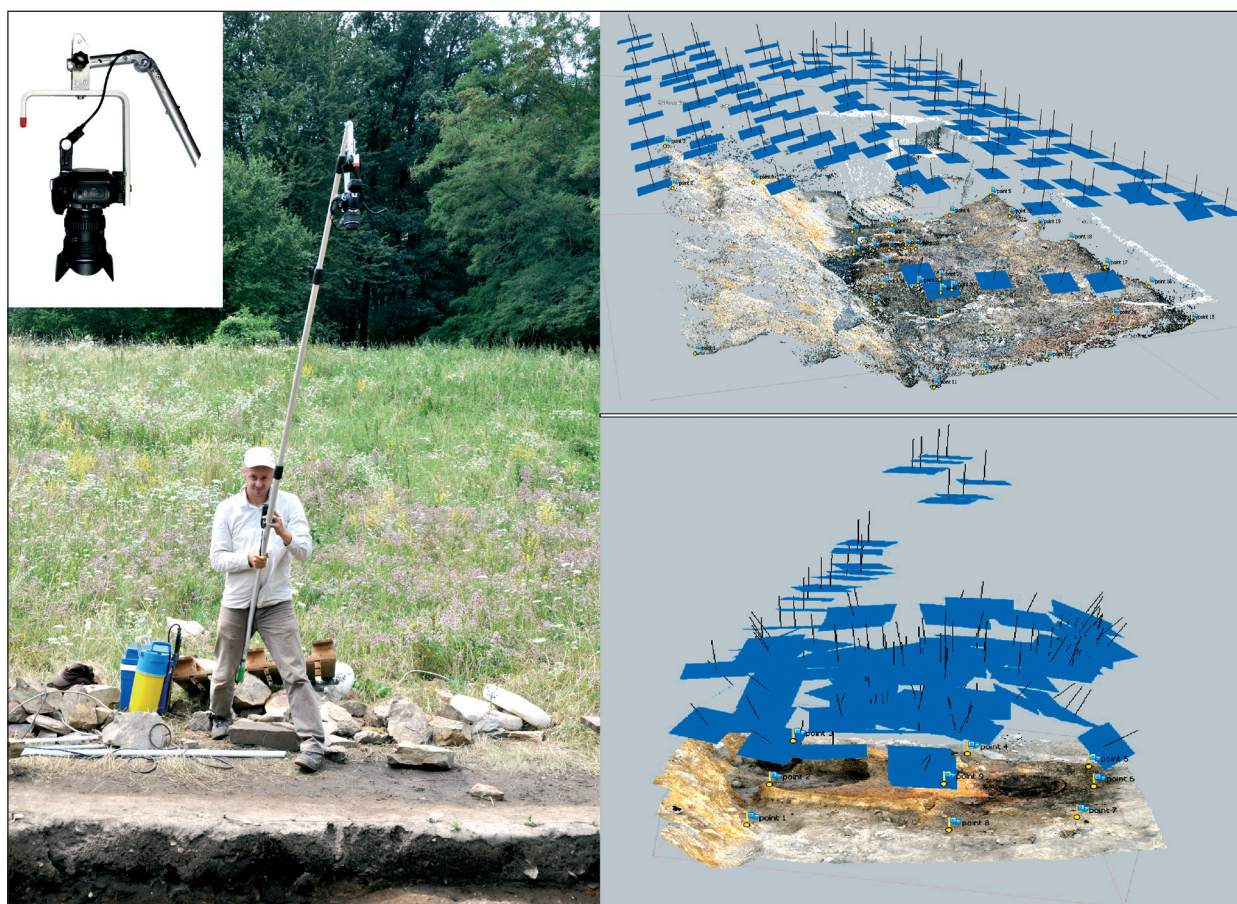


Abb. 8. Fotodokumentation. Die Teleskopstange erlaubt Aufnahmen aus einer Höhe von bis zu 4,5 m und dient der „Befliegung“ des Grabungsschnittes sowie der Erstellung kleinflächiger Überblicksaufnahmen. Quelle: R. Weßling, J. Maurer, Projekt Meidling, IUHA Wien.

Obr. 8. Fotodokumentace. Teleskopická tyč umožňuje provádět snímky z výšky až 4,5 m a slouží k dokumentaci výzkumných segmentů či k maloplošnému přehledovému snímkování.

Evaluierung des Einsatzes von Structure-from-Motion im Rahmen einer systematischen und standardisierten Grabungsdokumentation

Als Anforderungen an dreidimensionale Dokumentationsmethoden für den alltäglichen Einsatz auf archäologischen Grabungen werden von Fabio Remondino (*Remondino et al. 2010*, 85–86) folgende Faktoren genannt: Genauigkeit und Zuverlässigkeit, Mobilität, niedrige Kosten, hohe Geschwindigkeit der Datenaufnahme sowie Flexibilität. Der benötigte Aufwand für die Datennachbearbeitung kann ebenfalls dazu gezählt werden.

Genauigkeit und Zuverlässigkeit

Die Ermittlung der Kameraparameter und damit auch die Rückprojektion der 2D-Geometrie der Fotos in einen dreidimensionalen Raum beruhen auf Structure-from-Motion-Algorithmen. Diese Berechnungen liefern nur Annäherungen an die tatsächlichen Werte und unterliegen einem gewissen Fehler, der durch die Angabe des Reprojektionsfehlers dargestellt werden kann. Er gibt die Distanz zwischen Originalpunkten und den durch den SfM-Prozess rekonstruierten Punkten wieder und kann zur Beurteilung der Raumgeometrie herangezogen werden. Im Rahmen des Structure-from-Motion-Prozesses erfolgt eine automatische Berechnung des Reprojektionsfehlers. Er wird absolut in Metern und relativ als mittlere quadratische Abweichung in Pixelwerten angegeben. Durch in die Software eingebundene Optimierungsprozesse kann er zusätzlich verringert werden. Bei allen im Rahmen der Ausgrabung am Kleinen Anzingerberg berechneten Modellen wurde diesbezüglich auf einen mittleren relativen Reprojektionsfehler von unter einem Pixel geachtet. Dieser Wert wurde in allen Fällen erreicht.

Zur Evaluierung von Structure-from-Motion wurden bereits zahlreiche Vergleiche mit Laserscandaten veröffentlicht (zuletzt *Briese et al. 2012* und *Westoby et al. 2012*), die zu dem Ergebnis kommen, dass SfM zwar weniger genau als Laserscanning ist, die Abweichungen aber als sehr gering einzuschätzen sind (*Koutsoudis et al. 2013*). Die Genauigkeit des Modells hängt hierbei stark von der Qualität und Auflösung des verwendeten Bildmaterials ab. Bildgestützte Verfahren weisen im Vergleich zu Laserscanning allgemein eine weniger dichte und unregelmäßigere Punktwolke auf als Laserscandaten. Insbesondere im Bereich scharfer Kanten und klarer Konturen können Laserscandaten mehr Details wiedergeben als Structure-from-Motion-Daten. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass die Genauigkeit und Detailwiedergabe für die Dokumentation der meisten archäologischen Grabungen wohl ausreichend ist und in jedem Fall die Qualität von Oberflächenmodellen aus händisch eingemessenen Punktwolken um ein Vielfaches übersteigt. Dazu kommt, dass Oberflächenmodelle, die mittels Laserscan angefertigt wurden, üblicherweise nur eine grobe Fototextur aufweisen, wohingegen fotobasierte Modelle einen hohen Detailgrad an Textur- und Farbwiedergabe zeigen.

Die Zuverlässigkeit von Structure-from-Motion ist von der Qualität der Datenaufnahme abhängig. Eine überlegte und gewissenhafte Bilderstellung ist deshalb eine zwingende Voraussetzung für eine zuverlässige Modellberechnung. Da die Berechnung zumeist nicht direkt auf der Grabung durchgeführt werden kann und folglich keine Möglichkeit einer unmittelbaren Kontrolle existiert, besteht immer ein gewisses Risiko, dass kein präzises 3D-Modell erstellt werden kann. Durch entsprechende Richtlinien zur fotografischen Dokumentation und durch den Einsatz von erfahrenem Personal lässt sich dieses Risiko jedoch minimieren. Für den Kleinen Anzingerberg sei angemerkt, dass von sämtlichen dokumentierten Oberflächen Modelle anfertigt werden konnten. In Hinblick auf die zukünftige Entwicklung von Structure-from-Motion bleibt abzuwarten, wie On-the-fly-Rekonstruktionen (*Wendel et al. 2012*) und Berechnungsverfahren zur Wahl optimaler Kamerastandpunkte (*Hoppe et al. 2012*) im Rahmen der Grabungsdokumentation zu nutzen sind.

Mobilität

Leichte Handhabung und Beweglichkeit der zur Datenaufnahme benötigten Geräte spielen im Grabungsalltag eine große Rolle bei der Einschätzung ihrer Praktikabilität. Die Anwendung von Structure-from-Motion weist einen hohen Mobilitätsindex auf. Dies gilt sowohl für den Transport zur als auch für die Nutzung auf der Grabung, da die Methode an allen Orten anwendbar ist, über die eine Kamera bewegt werden kann. Dabei kann der Aktionsradius durch die Zuhilfenahme von weiteren technischen Geräten, wie etwa Teleskopstangen oder Fotokränen, erweitert werden.

Kosten

Da für die Aufnahme der Rohdaten kein zusätzliches technisches Equipment benötigt wird, sondern auf die auf den meisten Grabungen in Österreich bereits vorhandenen Dokumentationsmittel Kamera und Totalstation (beziehungsweise GPS-Gerät) zurückgegriffen werden kann, fallen im ersten Schritt keine Anschaffungskosten an. Wenn mit dauerhaften Referenzpunkten oder in einem lokalen Bezugssystem gearbeitet wird, könnte unter Umständen sogar auf den kontinuierlichen Einsatz der Totalstation verzichtet werden.

Die Datenverarbeitung verlangt unter Umständen zusätzliche Hard- und Software. Diesbezüglich sei darauf hingewiesen, dass die aktuell angebotenen Softwarelösungen noch einer ständigen Entwicklung unterliegen und zukünftig vermutlich auch leistungsschwächere Rechner schnellere und bessere Resultate liefern werden. Außerdem werden leistungsstarke Computer immer preisgünstiger. Es sei auch angemerkt, dass die Daten nicht zwingend im unmittelbaren Anschluss an die Grabung prozessiert werden müssen. Dies ist mitunter erst für die Beantwortung konkreter Fragestellungen im Rahmen der wissenschaftlichen Auswertung vonnöten.

Geschwindigkeit der Datenaufnahme

Die Geschwindigkeit der Datenaufnahme beeinflusst gleichfalls die Gesamtkosten. Für beinahe alle Aufnahmeverfahren gilt Folgendes: Je komplexer die Oberfläche beschaffen ist, desto zeitaufwändiger ist ihre Dokumentation. Durch den hohen Bewegungsgrad des/der Fotografierenden ist in der Regel eine zügige Arbeitsweise möglich. Als zeit- und personalaufwändig erwies sich hingegen die Abschattung der zu dokumentierenden Oberflächen. Außerdem ist darauf zu achten, dass der Hintergrund möglichst frei von bewegten Objekten und Personen ist, was bei unmittelbar nebeneinander gelegenen Ausgrabungs- und Dokumentationstätigkeiten problematisch sein kann. Da sich der/die Fotografierende mit der Kamera um das gesamte Objekt herum bewegen und dabei eventuell bereits geputzte oder nicht belastbare Bereiche betreten muss, erfordert der Einsatz systematischer bildgestützter Dokumentationsmethoden ein höheres Maß an vorausschauender Arbeitsplanung.

Aufwand der Datennachbearbeitung

Eine konkrete Angabe der für die Modellerstellung benötigten Zeit ist kaum möglich. Sie hängt von der gewählten Soft- und Hardware, der Erfahrung des Anwenders/ der Anwenderin, der zur Verfügung stehenden Datengrundlage (Anzahl und Qualität der Bilder und der gewählten Kamerastandpunkte) sowie vom gewünschten Ergebnis ab. Ein erhöhtes Maß an Nachbearbeitung ist immer dann notwendig, wenn während der Datenaufnahme Fehler passiert sind: In diesem Fall müssen Bilder manuell aussortiert oder beschnitten beziehungsweise falsch berechnete Bildanordnungen entfernt werden.

Grundsätzlich sind die Modellerstellungen sehr rechenintensiv, weshalb längere Computerlaufzeiten von bis zu einigen Stunden pro Modell einzuplanen sind und sich die Nutzung von Stapelverarbeitung anbietet.

Flexibilität

Structure-from-Motion ist eine vielseitige Methode und kann in allen denkbaren Größenmaßstäben angewandt werden kann. Ihre Grenzen findet die Methode bei reflektierenden oder monochromen Oberflächen. Starke Schlagschatten, stark wechselnde Belichtungsbedingungen sowie Niederschläge sollten vermieden werden.

Ausblick

Obwohl bisher stets von dreidimensionalen Modellen gesprochen wurde, werden auf archäologischen Ausgrabungen *de facto* zweidimensionale Oberflächen dokumentiert, denen Höhenwerte zugewiesen werden. Dreidimensionalität zeichnet sich durch Volumenkörper aus (*Wycisk et al. 2003*). Jede archäologische Verfüllung bildet einen solchen Volumenkörper, der aber nur als 2,5D-Modell der Ober- und Unterfläche vorliegt. Deshalb gilt es in einem weiteren Schritt, der mit den Daten vom Kleinen Anzingerberg noch nicht durchgeführt wurde, die einzelnen Flächen der Verfüllungen zu 3D-Körpern zusammenzufügen. Da jeder 3D-Körper eine stratigrafische Einheit darstellt, kann in weiterer Folge über topologische Beziehungen semiautomatisiert eine Matrix extrahiert werden. Bisher erfolgt die zeitliche Anordnung der Modelle nach der während der Grabung definierten Schichtabfolge.

Zusammenfassung

Die Technik des „maschinellen Sehens“ (Computer-Vision) hält immer stärkeren Einzug in den archäologischen Alltag und eignet sich mittlerweile ausgezeichnet zur systematischen Anwendung auf archäologischen Ausgrabungen. Im vorliegenden Beitrag wird der Einsatz von Structure-from-Motion auf der Ausgrabung am Kleinen Anzingerberg bei Meidling im Thale in Niederösterreich vorgestellt. Zur Anwendung kam die kommerzielle Software Agisoft PhotoScan, die vollautomatisiert die inneren und äußeren Parameter der Kamerakalibrierung berechnet und daraus eine dreidimensionale Punktwolke erstellt. Selbige wird mit Hilfe von Multi-View-Stereo-Algorithmen in ein fotorealistisches Oberflächenmodell umgewandelt. Zur Visualisierung der Oberflächenmodelle und für die Zusammenführung mit den übrigen Grabungsdaten bietet sich der Import in ein Geografisches Informationssystem an. Mit dessen Hilfe können herkömmliche Ableitungen der Oberflächenmodelle, wie beispielsweise Schummerungen, Darstellungen der Hangneigung und Profilschnitte, visualisiert werden. Die fotorealistischen Modelle können aber auch der Erzeugung wahrer Orthofotos dienen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, sich als Betrachter bzw. Betrachterin interaktiv durch die texturierten dreidimensionalen Modelle zu bewegen. Eine Anordnung der Modelle gemäß ihrer stratigrafischen Position erlaubt in dieser Form sogar eine vierdimensionale Betrachtung.

Da die Qualität der Fotografien und die Auswahl der Aufnahmestandorte für die Genauigkeit der fertigen Modelle maßgeblich verantwortlich sind, muss bei der Anwendung von Structure-from-Motion dem Prozess der Datenaufnahme eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Wichtig sind eine hohe Bildqualität bei einer hohen Schärfentiefe, gleichmäßige Lichtbedingungen, eine ausreichende Überlappung der Einzelbilder sowie die Auswahl unterschiedlicher, in den einzelnen Schritten jedoch nicht zu stark voneinander abweichender Kamerastandpunkte. Zur besseren Stereoabdeckung wurden am Kleinen Anzingerberg Techniken der bodengestützten Luftbildarchäologie zum Einsatz gebracht. Ein Fotokran sowie eine Teleskopstange dienten als Kameraplattform zur Generierung von Senkrecht- und Überblicksaufnahmen, neben der Präzision und Punktdichte des Modells auch die benötigte Rechenzeit bei der Modellerstellung verbessern.

Structure-from-Motion bietet durch die Verwendung von archäologischer Standardausrüstung (Vermessungsgerät und Fotoapparat) eine kostengünstige, einfach zu handhabende und genaue Dokumentationsmöglichkeit für stratigrafische Ausgrabungen. Die fotorealistischen dreidimensionalen Modelle können als virtuelle Nachbildungen der einzelnen Stratifikationseinheiten betrachtet werden und erlauben dadurch eine vergleichsweise objektive und überprüfbare Dokumentation archäologischer Hinterlassenschaften, was sie zu einer ausgezeichneten Interpretationsgrundlage macht.

Literatur und Quellen

- Agisoft Wiki*: http://www.agisoft.ru/wiki/PhotoScan/Tips_and_Tricks (letzter Zugriff 05. 03. 2013)
- Ansorge, C.* 2005: Digitale Grabungsdokumentation in der Praxis der Rettungsgrabungen, *Archäologie Österreichs* 16/1, 50–54.
- Barceló, J. A. – De Castro, O. – Traver, D. – Vicente, O.* 2003: A 3D model of an archaeological excavation. In: Doerr, M. – Sarris, A. (eds.), *The Digital Heritage of Archaeology. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, Proceedings of the 30th Conference, Heraklion, Crete, April 2002*. Herakleion, 85–87.
- Bogacki, M. – Giersz, M. – Prządka-Giersz, P. – Malkowski, W. – Misiewicz, K.* 2010: GPS RTK Mapping, Kite Aerial Photogrammetry, Geophysical Survey and GIS Based Analysis of Surface Artifact Distribution at the pre-Hispanic site of the Castillo de Huarmey, North Coast of Peru. In: Reuter, R. (ed.), *Proceedings of 30th EARSeL Symposium: Remote Sensing for Science, Education and Culture*, 31. May – 3. June 2010. Paris, 121–130.
- Bruno, F. – Bruno, S. – De Sensi, G. – Luchi, M. L. – Mancuso, S. – Muzzupappa, M.* 2010: From 3D reconstruction to virtual reality: a complete methodology for digital archaeological exhibition, *Journal of Cultural Heritage* 11 (1), 42–49.
- Challis, K. – Forlin, P. – Kincey, M.* 2011: A generic toolkit for the visualisation of archaeological features on airborne lidar elevation data, *Archaeological Prospection* 18 (4), 279–289.
- De Reu, J. – Plets, G. – Verhoeven, G. – De Smedt, P. – Bats, M. – Cherretté, B. – De Maeyer, W. – Deconynck, J. – Herremans, D. – Laloo, P. – Van Meirvenne, M. – De Clercq, W.* 2012: Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage, *Journal of Archaeological Science* 40, 1108–1121.
- Doneus, M. – Neubauer, W.* 2005: 3D laser scanners on archaeological excavations. In: Dequal, S. (ed.), *Proceedings of the XXth International Symposium CIPA, Torino 2005*. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 36–5/C34/1, 226–231.
- Doneus, M. – Verhoeven, G. – Fera, M. – Briese, Ch. – Kucera, M. – Neubauer, W.* 2011: From deposit to point cloud – A study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations, *Geoinformatics 6 (XXIIIrd International CIPA Symposium)*, 81–88.
- Harris, E. C.* 1979: *The Laws of Archaeological Stratigraphy*, *World Archaeology*, Vol. 11, No 1. Early Chemical Technology (Jun., 1979), 111–117.
- Hoppe, C. – Wendel, A. – Zollmann, S. – Pirker, K. – Irschara, A. – Bischof, H. – Kluckner, S.* 2012: Photogrammetric Camera Network Design for Micro Aerial Vehicles. *Proceedings of the Computer Vision Winter Workshop (CVWW)*. Mala Nedelja (Slovenia).

- Imhof, E. 2007:* Cartographic relief presentation. English language edition edited by H. J. Steward. Redlands.
- Koutsoudis, A. – Pavlidis, G. – Arnaoutoglou, F. – Tsiafakis, D. – Chamzas, C. 2009:* Qp: a tool for generating 3D models of ancient Greek pottery, *Journal of Cultural Heritage* 10 (2), 281–295.
- Koutsoudis, A. – Vidmar, B. – Ioannakis, G. – Arnaoutoglou, F. – Pavlidis, G. – Chamzas, C. 2013:* Multi-image 3D reconstruction data evaluation, *Journal of Cultural Heritage* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2012.12.003>.
- Krenn-Leeb, A. 2010:* Humanökologie der Kupferzeit – Interaktionen und Wirkungszusammenhänge zwischen Mensch, Gesellschaft und Umwelt am Beispiel der Jevišovice-Kultur: Zwischenbilanz des Forschungsprogramms. In: Lauermaier, E. – Rosner, W. (Hrsg.), *Urgeschichte in Niederösterreich. Eine Bestandsaufnahme. Einundzwanzigstes Symposium des NÖ Instituts für Landeskunde*, 2. bis 5. Juli 2001, Retz/Althof. *Archäologische Forschungen in Niederösterreich* 4. St. Pölten, 28–47.
- Krenn-Leeb, A. – Maurer, J. – Weßling, R. 2012:* Der Einsatz neuer Dokumentationsmethoden am Kleinen Anzingerberg. Ein Erfahrungsbericht, *Archäologie Österreichs* 23/1, 17–26.
- Kriegler, K. 1928:* Über photographische Aufnahmen prähistorischer Gräber, *Mitteilungen der Anthropologischen Gesellschaft in Wien* 58, 113–116.
- Opitz, R. – Nowlin, J. 2012:* Photogrammetric Modeling + GIS. Better methods for working with mesh data, *ArcUser* 57, 46–49.
- Reilly, P. 1991:* Towards a Virtual Archaeology. In: Lockyear, K. – Rahtz, S. (eds.), *CAA90: Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990*. BAR International Series 565, 133–139.
- Remondino, F. 2013:* Worth a thousand words – Photogrammetry for archaeological 3D surveying. In: Opitz, R. – Cowley, D. (eds.), *Interpreting archaeological topography – airborne laser scanning, 3D data and ground observation*. Oxbow Books (Oxford), 115–122.
- Remondino, F. – El-Hakim, S. 2006:* Image-based 3D modelling: a review, *The Photogrammetric Record* 21 (115), 269–291.
- Remondino, F. – Rizzi, A. 2010:* Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritages sites – techniques, problems, and examples, *Applied Geomatics* 2 (3), 85–100.
- Seitz, S. – Curless, B. – Diebel, J. – Scharstein, D. – Szeliski, R. 2006:* A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. *Proceedings of the CVPR '06 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition – Volume 1*. Washington, DC, 519–526.
- Szeliski, R. 2010:* *Computer Vision: Algorithms and Applications*. London.
- Ullman, S. 1979:* The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society. B: Biological Sciences*, 203 (1153), 405–426.
- Verhoeven, G. 2009:* Providing an Archaeological Bird's-Eye View – An Overall Picture of Ground-Based Means to Execute Low-Altitude Aerial Photography (LAAP) in Archaeology, *Archaeological Prospection* 16/4, 233–249.
- *2010:* It's All about the Format – Unleashing the Power of RAW Aerial Photography, *International Journal of Remote Sensing* 31 (8), 2009–2042.
- *2011:* Taking computer vision aloft – Archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with PhotoScan, *Archaeological Prospection* 18 (1), 67–73.
- Verhoeven, G. – Doneus, M. – Briese, C. – Vermeulen, F. 2012a:* Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs, *Journal of Archaeological Science* 39 (7), 2060–2070.
- Verhoeven, G. – Doneus, M. – Briese, Ch. 2012b:* Computer vision techniques: towards automated orthophoto production, *AARGnews* 44, 8–11.
- Wendel, A. – Maurer, M. – Graber, G. – Pock, T. – Bischof, H. 2012:* Dense Reconstruction On-the-Fly. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Providence (USA).
- Wenzel, K. – Rothermel, M. – Fritsch, D. – Haala, N. 2013:* Image acquisition and model selection for multi-view stereo. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5/W1, 251–258, doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-251-2013, 2013.
- Westoby, M. J. – Brasington, J. – Glasser, N. F. – Hambrey, M. J. – Reynolds, J. M. 2012:* 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology* Vol. 179, 300–314.
- Wycisk, P. – Fabritius, H. 2003:* Mehr als nur ein Bild – Digitale 3-D-Raummodelle des geologischen Untergrundes. *GeoBIT* 11/2003, 8–10.

Ronny Weßling – Jakob Maurer – Alexandra Krenn-Leeb: Trojrozměrné modelování metodou Structure-from-Motion a pozemní letecká fotografie pro dokumentaci archeologických výzkumů.

Předložený příspěvek je věnován popisu jedné z nejmodernějších dokumentačních metod na bázi trojrozměrného modelování, označované jako Structure-from-Motion. Metoda byla aplikována na eneolitické lokalitě Kleiner Anzingerberg bei Meidling im Thale v Dolním Rakousku. Metoda Structure-from-Motion nabízí levnou, jednoduchou a přesnou možnost dokumentace archeologických výzkumů.

Český překlad O. Chvojka