

ZUR COMPUTERGESTÜTZTEN STEINGERECHTEN REKONSTRUKTION DES OKTOGONS IN EPHEOS

Am Oktagon in Ephesos werden derzeit im Rahmen eines Forschungsprojekts, das die steingerechte Rekonstruktion und in weiterer Folge den zumindest teilweisen Wiederaufbau des Monuments zum Ziel hat, neue Technologien zum Einsatz gebracht, die den Forschungs- und Arbeitsprozess in vielerlei Hinsicht erleichtern und beschleunigen. Das computergestützte Arbeiten bietet neben dem schonungsvollen Umgang mit dem Denkmalbestand durch berührungsfreie Vermessung und dem Arbeiten mit virtuellen Modellen langfristig auch finanzielle Vorteile, da wesentliche Arbeitsschritte an den Schreibtisch verlegt werden und auf diese Weise sowohl der personelle als auch der technische Aufwand vor Ort auf ein Minimum reduziert werden können.

Dabei bleiben die klassischen Arbeitsschritte des Bauforschers nahezu unverändert. Die traditionelle Vorgehensweise bildet den Rahmen, innerhalb dessen die neuen Werkzeuge ihre Anwendung finden. So treten im Zuge der Bauaufnahme an die Stelle von Lot und Winkel moderne 3-D-Scanner. Sie liefern virtuelle, dreidimensionale Abbilder der zu bearbeitenden Steine, die eine ungleich größere Informationsdichte bereitstellen als die zweidimensionale Zeichnung. Folglich können völlig ortsungebunden Maße genommen, Schnitte gelegt und Oberflächendetails überprüft werden. Weiters erlauben die virtuellen Werkstücke ein in hohem Maße experimentelles Arbeiten, ein Zugang, der insbesondere bei mehrdeutigen Kombinationsmöglichkeiten oft rasch zu Lösungen führen kann. Zuletzt erschließt der Einsatz neuer Medien auch hinsichtlich der Präsentation von Denkmälern neue Wege. Durch das Zusammenfügen der dreidimensionalen Bauteile bis hin zur virtuellen Anastylose können unterschiedliche Wiederaufbauvarianten dargestellt und deren Wirkung auf den Standort und dessen Umgebung ausführlich geprüft werden.

Am Beispiel des Oktogons in Ephesos wird versucht, den Forschungsprozess von der Bauaufnahme bis hin zur virtuellen Anastylose mit moderner Technologie und computergestützten Systemen zu begleiten. Dies ist insofern bemerkenswert, als die Geisteswissenschaften und hier im Besonderen die klassische Archäologie dem EDV-unterstützten Arbeiten nach wie vor mit großer Skepsis gegenüberstehen¹. Oft entsteht die Scheu vor den neuen Medien aus der Sorge, dass traditionelle Methoden einfach eliminiert und ersetzt werden könnten. Das vorliegende Beispiel zeigt jedoch, dass in der Systematik keineswegs von den konventionellen Arbeitsschritten abgegangen wird, um schließlich am Ziel der steingerechten Rekonstruktion und der darauf basierenden Anastylose anzugelangen. Jeder einzelne Schritt orientiert sich an der bisher in der Bauforschung gebräuchlichen Vorgehensweise, lediglich die verwendeten Werkzeuge können in vielerlei Hinsicht den üblichen Arbeitsprozess vereinfachen und beschleunigen. Die Möglichkeit der computergestützten Modellbildung erlaubt es, Rekonstruktionsversuche am Bildschirm durchzuführen. Die virtuellen 3-D-Modelle gestatten einerseits das experimentelle Arbeiten am Objekt, andererseits besteht praktisch kein Schadensrisiko für die Originalbauteile. Der Einsatz von Computermodellen entspricht somit auch der in der Charta von Venedig geforderten zerstörungsfreien Denkmalpflege. Überdies ermöglicht das computergestützte Arbeiten in jeder Phase auch das Zurückkehren zu traditionellen Methoden, d. h., am Ende jedes Arbeitsschrittes liegt ein Ergebnis vor, das dem der traditionellen Methoden jedenfalls entspricht, häufig jedoch weit über dessen Informationsinhalt hinausgeht.

Das Oktagon in Ephesos ist ein Grabmonument aus der zweiten Hälfte des 1. vorchristlichen Jahrhunderts² (Abb. 1). Die folgende Baubeschreibung des Oktogons folgt im Wesentlichen den Ausführungen von W. Wil-

¹ s. dazu A. RIECHE, 200 Jahre Archäologie und »Neue Medien«, in: A. RIECHE – B. SCHNEIDER (Hrsg.), *Archäologie virtuell* (Bonn 2002) 90–94.

² Zur Datierung zusammenfassend: THÜR 1990, 49–51; s. dazu auch den Beitrag von A. WALDNER in diesem Band.

berg, der das Monument unmittelbar nach dessen Freilegung untersuchte und beschrieb³. Das Gebäude besitzt einen quadratischen Sockel aus Bruchstein-Mörtel-Mauerwerk, welcher mit konkav geschwungenen Orthostatenplatten verkleidet ist. Auf diesem Sockel wurde ein dreistufiger, achtseitiger Unterbau für einen Monopteros mit Cella und oktogonaler Säulenhalle errichtet. Die Cella besaß eine umlaufende Sitzbank und wird mehrfach mit einer Scheintür beschrieben, deren Existenz durch jüngste Forschungsergebnisse zweifelsfrei belegt werden konnte. Der Kern der Cella war wohl massiv in Bruchstein-Mörtel-Mauerwerk ausgeführt. Im oberen Bereich der Cellawand war ein Girlandenfries angebracht, dessen Fruchtgirlanden von Bukranien getragen wurden. Die oktogonale Cella war von einer Peristasis umgeben, deren kannelierte Säulen auf attischen Basen mit Plinthe standen und korinthische Kapitelle trugen. Über der Ringhalle war eine Kassettendecke mit einfachen, teils mit schlichten Blütenornamenten geschmückten Kassettensfeldern gespannt. Das Hauptgeschoss wurde von einem Gebälk aus einem Dreifascienarchitrav mit ionischem Kyma sowie einem Palmettenfries bekrönt. Darüber lag ein Gesims, dessen Konsolen von Greifen und Akanthusblättern gestützt wurden. Den Abschluss schließlich bildete ein steiles, achtseitiges Pyramidendach, das von einer Kugel bekrönt wurde. Im Inneren des Sockelbaus lag eine aus Werksteinen gefügte Grabkammer mit einem Tonnengewölbe. Ein Zugang liegt an der Rückseite des Gebäudes in Form eines niedrigen, ebenfalls mit Marmorblöcken ausgekleideten Ganges. In der Grabkammer steht ein einfacher, schmuckloser Sarkophag, in welchem man das Skelett einer jungen Frau vorfand⁴.

Da eine Publikation des Baus bislang fehlt, folgen alle Kommentare und Abhandlungen⁵ zu dem Gebäude der kurzen Darstellung bei W. Alzinger⁶ sowie den Aufzeichnungen im Grabungstagebuch von Ephesos. Mit der Freilegung des Monuments wurde bereits im Jahre 1904 begonnen. Im Oktober desselben Jahres traten im Zuge der Ausgrabungsarbeiten an der Südseite der unteren Kuretenstraße erstmals Bauteile eines »polygonalen Gebäudes«⁷ zutage, das bereits zu diesem frühen Zeitpunkt die Bezeichnung »Octogon« erhielt. In rascher Folge wurden zahlreiche weitere Werkstücke sowie der quadratische Sockel des Monuments freigelegt. Noch im selben Jahr konnte W. Wilberg nach einer ersten summarischen Bauaufnahme eine schematische Rekonstruktion des Monuments anfertigen, die bis heute unser Bild des Gebäudes bestimmt⁸ (Abb. 2).

Diese erste Beschreibung des Gebäudes konnte im Jahr 1926 ergänzt werden, als M. Theuer im Sockel die Grabkammer freilegte⁹. Die Deutung als Siegesdenkmal, die R. Heberdey noch 1905 vorschlug¹⁰, musste damit jedoch revidiert werden.

Die Bauteile des Oktogons erlebten seit ihrer Freilegung eine wechselvolle Geschichte. So wurden die Werkstücke eines Jochs bereits kurz nach deren Freilegung im Zuge der damals vereinbarten Fundteilung nach Wien transportiert. Hier führten sie vorerst ein Schattendasein, bis sie im Jahr 1957 im Keller des Kunsthistorischen Museums im Rahmen der Studiensammlung aufgestellt wurden. Erst viele Jahre später wurden die Bauteile der Öffentlichkeit zugänglich gemacht: Im Jahr 1978 wurde ein vollständiges Joch in Form einer Architekturprobe im Ephesos Museum in Wien aufgestellt.

Die nach der Freilegung in Ephesos verbliebenen Bauteile ließ man vorerst in der Nähe des noch *in situ* befindlichen Sockels auf der Kuretenstraße liegen. Im September 1906 wurde jedoch der untere Bereich der Kuretenstraße gereinigt und die Werkstücke wurden »hinter den Kuretensäulen aufgeschichtet«¹¹. Das Gra-

³ Das von WILBERG 1904 verfasste Manuskript ist heute verschollen. Die Verf. stützt sich daher im Folgenden auf die Kommentare und Beschreibungen der Forscher, denen das Originalskript noch zur Verfügung stand.

⁴ Zur Grabinhaberschaft: THÜR 1990, 43–56.

⁵ Erwähnt seien hier: W. HEILMEYER, Korinthische Normalkapitelle, RM Ergh. 16 (Heidelberg 1970) 79 f.; H. v. HESBERG, Konsolengeisa des Hellenismus und der frühen Kaiserzeit, RM Ergh. 24 (Mainz 1980) 56 f. 62. 64 f.; W. OBERLEITNER u. a., Funde aus Ephesos und Samothrake. Kunsthistorisches Museum. Katalog der Antikensammlung II (Wien 1978) 95–98; THÜR 1990, 43–56; F. RUMSCHEID, Untersuchungen zur kleinasiatischen Bauornamentik des Hellenismus I (Mainz 1994) 160–165; II 19 Kat. 48; I. KADER, Heroa und Memorialbauten, in: M. WÖRRLE – P. ZANKER, Stadtbild und Bürgerbild im Hellenismus, Kolloquium München 24. bis 26. Juni 1993, Vestigia 47 (München 1995) 199–229; C. BERNIS, Untersuchungen zu den Grabbauten der frühen Kaiserzeit in Kleinasien, AMS 51 (Bonn 2003); S. CORMACK, The Space of Death in Roman Asia Minor (Wien 2004) 222.

⁶ ALZINGER 1974, 40–42.

⁷ Tagebuch der Ausgrabungen in Ephesos 1904–1908, Eintrag vom 03.–05.10.1904.

⁸ WILBERG 1904.

⁹ J. KEIL, 15. Vorläufiger Bericht über die Ausgrabungen in Ephesos, ÖJh 26, 1930, Beibl. 41–46.

¹⁰ R. HEBERDEY, Vorläufiger Bericht über die Grabungen in Ephesos 1904, ÖJh 8, 1905, Beibl. 70.

¹¹ Tagebuch der Ausgrabungen in Ephesos 1904–1908, Einträge ab dem 10.09.1906.

bungstagebuch verweist ebenfalls darauf, dass »eine Ecke der Oktogonarchitektur wieder aufgestellt« wurde. Es handelte sich hierbei wohl um den Gebälkbereich, den auch ein Foto aus dem Archiv des Österreichischen Archäologischen Instituts (ÖAI) zeigt¹² (Abb. 3). Weiters wurden im September 1906 die Orthostaten mit den Inschriften an der Vorderseite des Sockels sowie die darübersitzenden Gesimsblöcke »wieder an ihre Stelle gesetzt, hintermauert und verklammert«¹³.

Die zahlreich erhaltenen Bauteile wurden bis vor Kurzem nie detailliert aufgenommen und steingerecht aneinander gefügt. Zwar fand das Gebäude häufig Erwähnung als Vergleichsbeispiel¹⁴ – W. Alzinger verfasste im Rahmen seiner Publikation über »Augusteische Architektur in Ephesos«¹⁵ sogar eine kurze Beschreibung des Denkmals und im Jahr 1990 erschien H. Thürs Aufsatz zur Grabinhaberschaft des Monuments¹⁶ –, eine umfassende Bearbeitung des Monuments blieb aber bis heute aus.

Seit Anfang der 1990er-Jahre nahm das Interesse an dem Bauwerk wieder zu. Im Hinblick auf die Publikation des Gebäudes wurde in den Jahren 1993–1996 im Rahmen eines vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) unterstützten Projekts damit begonnen, die Werkstücke des Oktogons zeichnerisch aufzunehmen. Diese herkömmliche Methode brachte zwar eine sehr detaillierte Auseinandersetzung mit jedem einzelnen abzubildenden Bauteil vor Ort mit sich, dennoch führte der hohe Zeitaufwand letztlich dazu, auch über andere Aufnahmetechniken nachzudenken. So wurde einige Jahre später ein anderer Ansatz zur Aufnahme der Werkstücke gewählt: Die Steine des Oktogons wurden fotogrammetrisch aufgenommen. Die dabei erzielten Ergebnisse bildeten die Grundlage für eine im Jahr 1999 von K. Schindler an der Technischen Universität Wien vorgelegte Diplomarbeit¹⁷. Im Vordergrund dieser Arbeit stand jedoch nicht die Bauaufnahme selbst, Ziel war es vielmehr, den Vorgang der steingerechten Rekonstruktion mithilfe eines EDV-Systems zu simulieren. Auch wenn K. Schindlers Arbeit noch zu keiner steingerechten Rekonstruktion des Oktogons führte, war die dahinterstehende Idee richtungweisend: Schindlers Ansätze stellen einen ersten Schritt dar, die steingerechte Rekonstruktion des Oktogons computergestützt zu automatisieren.

In den vergangenen Jahren waren eine Anastylose des Oktogons oder die Aufstellung einer Architekturprobe mehrfach im Gespräch, da sich das Gebäude aus mehreren Gründen für einen Wiederaufbau anbietet. Zum einen sind relativ viele Werkstücke erhalten. Insbesondere die schmuckreichen Architekturteile sowie jene, welche für die Gestalt des Gebäudes besonders formgebend sind – das sind im Besonderen Säulen, Kapitelle sowie die Teile der Gebälkzone –, liegen in großer Zahl vor. Zum anderen steht auch aufgrund des Standorts im Ruinenfeld immer wieder der Wunsch im Raum, an dieser auch für den heutigen Besucher der Grabungsstätte Ephesos sehr zentralen und prominenten Stelle, ein Bauwerk wiederzuerrichten. Nach den Anastylosen des Hadrianstempels¹⁸, der berühmten Celsusbibliothek¹⁹ und des Südtors der Agora²⁰ sowie der Teilanastylose des Hadrianstores²¹ könnte ein weiterer positiver Akzent gesetzt werden, der sich zudem als Kontrast vor der Fassade des modern überdachten Hanghauses 2 erhebt.

Nicht zuletzt vor diesem Hintergrund wurden die Arbeiten am Oktogon unter der Leitung von H. Thür im Jahr 2005 erneut aufgenommen. Das Projekt wurde als Kooperation des Österreichischen Archäologischen

¹² Archiv des ÖAI, Inv. III 196.

¹³ Tagebuch der Ausgrabungen in Ephesos 1904–1908, Einträge ab dem 10.09.1906.

¹⁴ Vgl. z. B. BERNS a. O. (Anm. 5); S. CORMACK, *The Space of Death in Roman Asia Minor* (Wien 2004) 41 f. 99.

¹⁵ ALZINGER 1974, 40–43.

¹⁶ THÜR 1990, 43–56.

¹⁷ K. SCHINDLER, Konzept eines Systems zur EDV-unterstützten Rekonstruktion antiker Baudenkmäler (unpubl. Dipl.-Arbeit TU Wien 1999).

¹⁸ s. dazu: F. MILTNER, 20. Vorläufiger Bericht über die Ausgrabungen in Ephesos, *ÖJh* 42, 1955, Beibl. 34–36; F. MILTNER, 21. Vorläufiger Bericht über die Ausgrabungen in Ephesos, *ÖJh* 43, 1956–1958, Beibl. 17–24; F. MILTNER, 22. Vorläufiger Bericht über die Ausgrabungen in Ephesos, *ÖJh* 44, 1959, Beibl. 250–290; F. MILTNER, *Denkmalpflege in Ephesos*, in: *ÖZKD* 13, 1959, 1–10; R. FLEISCHER, Zwei eklektische Statuen aus Ephesos, in: *Festschrift Fritz Eichler, ÖJh Beih. 1* (Wien 1967) 123–129.

¹⁹ Dazu: F. EICHLER – R. HEBERDEY – J. KEIL u. a., in: *Die Bibliothek, FiE* 5, 1 (Wien 1944); W. WILBERG, Die Fassade der Bibliothek, *ÖJh* 11, 1908, 118–135; zum Wiederaufbau: F. HUEBER – V. M. STROCKA, Die Bibliothek des Celsus. Eine Prachtfassade und das Problem ihrer Wiederaufrichtung, *AW* 4, 1975, 3–14; F. HUEBER, Der Embolos, ein urbanes Zentrum von Ephesos, *AW* 15/4, 1984, 3–22; F. HUEBER, *Bauforschung und Restaurierung am unteren Embolos in Ephesos*, in: *ÖZKD* 43, 1989, 120–143.

²⁰ HUEBER a. O. (Anm. 20: 1984) 3–22; G. LANG, Ein Zwischenbericht zur Anastylose des Südtors der Agora von Ephesos, *AW* 15/4, 1984, 23–30; HUEBER a. O. (Anm. 20: 1989) 120–143.

²¹ H. THÜR, Das Hadrianstor in Ephesos, *FiE* 11, 1 (Wien 1989).

Instituts, des Instituts für Kulturgeschichte der Antike der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und des Instituts für Architektur- und Kunstgeschichte, Bauforschung und Denkmalpflege – Fachgebiet Architekturgeschichte und Bauforschung – der Technischen Universität Wien geplant und begonnen. Sowohl zur Aufnahme der Bauteile als auch zur weiteren Verarbeitung sollten verstärkt computergestützte Methoden zur Anwendung kommen.

Das Arbeitsfeld des klassischen Bauforschers umfasst die Untersuchung des erhaltenen Bestandes, die detaillierte Aufnahme aller erhaltenen Teile und die Erforschung der Entwicklung des Gebäudes bis zum heutigen Zustand, oder wie es G. U. Großmann formuliert: »Historische Bauforschung ist die Erforschung baulicher Zustände und Zusammenhänge von der ältesten Erscheinung des bestehenden Bauwerks bis zum heutigen Bestand. [...] Erste Quelle der Bauforschung ist das Bauwerk selbst, in diesem Sinne ist die historische Bauforschung die Quellenkritik der Architekturgeschichte²².« Zum Aufgabengebiet der Bauforschung gehören neben der Untersuchung und Dokumentation des erhaltenen Bestandes auch die Rekonstruktion und die Restaurierung sowie gegebenenfalls die Wiederaufrichtung des zu behandelnden Denkmals²³.

In der vorliegenden Arbeit wird, von den traditionellen Arbeitsschritten der Bauforschung geleitet, der Weg von der Bauaufnahme bis hin zur steingerechten Rekonstruktion unter Anwendung moderner Technologien umrissen. Zuvor seien diese Arbeitsschritte kurz vorgestellt: Am Beginn der bauforscherischen Arbeit steht zunächst die Aufnahme des Bestandes. Und bereits hier müssen – meist vor Ort – wichtige Entscheidungen getroffen werden, die den weiteren Forschungsprozess wesentlich beeinflussen können. Hierzu zählen beispielsweise die Wahl des Maßstabs sowie die Fragen nach dem Detaillierungsgrad oder dem Legen von Schnitten. Nach der Bauaufnahme erfolgt die schematische Rekonstruktion des Gebäudes. Dafür werden einerseits die aufgenommenen Bauteile nach Typen – beispielsweise Gesimsblöcke, Wandsteine, Architrave etc. – sortiert und ein Katalog aller Bauteile angefertigt, andererseits müssen in diesem Arbeitsschritt auch Fragen zur Bauabfolge, zu Reparaturen und Umbauten geklärt werden. Auf Basis dieser Arbeiten erhält der Forscher nun ein Bild des Gebäudes in seinem ursprünglichen Zustand. Nach dieser Analyse und Vorsortierung der Bauglieder erfolgt die steingerechte Rekonstruktion. Ziel ist es, jedes Bauteil so zuzuordnen, dass es wieder an seinen ursprünglichen Ort im Gebäudeverband sitzt. Der letzte Abschnitt der bauforscherischen Tätigkeit schließlich ist die Konservierung und die denkmalpflegerische Gestaltung des zu bearbeitenden Objekts. Die denkmalpflegerischen Maßnahmen können vom erneuten Zuschütten eines ergrabenen Gebäudes über das Konservieren der erhaltenen Reste und den Schutz vor weiterem Verfall bis hin zum Wiederaufbau des Monuments in Form von Architekturproben oder einer Anastylose definiert sein.

Im folgenden Abschnitt soll die Vermessung der Architekturteile des Oktogons mithilfe moderner, computergestützter 3-D-Vermessungsmethoden beschrieben werden. Dabei werden zu Beginn die unterschiedlichen Scan-Technologien diskutiert. Weiters wird auf die Schwierigkeiten eingegangen, welche sich in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Verwahrungsorten der Bauteile im Zuge der Arbeiten ergaben. Schließlich wird auf die Problematik bei der Verarbeitung der anfallenden, äußerst umfangreichen Datenmengen eingegangen.

Im Sommer 2005 wurde damit begonnen, die Bauteile des Oktogons mittels 3-D-Scannern aufzunehmen²⁴. Im Zuge einer einwöchigen Kampagne wurden die im Wiener Ephesos Museum aufgestellten Bauteile vermessen. Anschließend folgte eine Scankampagne im Grabungsgelände in Ephesos, in welcher der Sockelbau des Monuments sowie ein Großteil der losen Bauteile aufgenommen wurden. Im November 2006 wurden im Zuge einer zweiwöchigen Kampagne in Ephesos die Scans des Vorjahres ergänzt sowie weitere, neu hinzugekommene Bauteile erfasst. Zuletzt wurden im Sommer 2007 auch die im Ephesos Museum in Wien erstellten Scans durch neue Ergänzungsscans vervollständigt.

Die im Nachstehenden beschriebenen unterschiedlichen Technologien wurden abhängig von der jeweiligen Situation vor Ort sowie der Beschaffenheit der Bauteile verwendet.

²² G. U. GROSSMANN, Einführung in die historische Bauforschung (Darmstadt 1993) 6.

²³ GRUBEN 2000, 251–257.

²⁴ Aufgrund der teilweise mangelhaften Ergebnisse, die vom ursprünglichen Auftragnehmer, der Firma ArcTron GmbH, im Frühjahr 2006 geliefert wurden, starteten die das Projekt betreuenden Institute im November 2006 eine neuerliche Scan-Kampagne mit eigenen Mitarbeitern. In weiterer Folge konnten bis zum Sommer 2007 dreidimensionale Abbilder aller derzeit bekannten Bauteile des Oktogons erstellt werden.

Für großflächige Scans kam der Laserscanner LMS-Z 420i der Firma RIEGL-Laser-Measurement-Systems GmbH zum Einsatz²⁵. Mit diesem Gerät können Objekte in einem Abstand von 2–600 m eingemessen werden. In vertikaler Richtung erreicht der Scanner Objekte innerhalb eines Winkels von maximal 80°, horizontal kann die gesamte Umgebung in einem Winkel von 360° erfasst werden. Damit verfügt der Scanner über ein sehr großes Aufnahmefeld, das in verhältnismäßig kurzer Zeit erfasst werden kann. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, das Gerät mit einer hochauflösenden Digitalkamera auszustatten, die fix am Scannerkopf montiert wird. Nach jedem Scanvorgang wird mit dieser Kamera eine den Scanbereich überlappend abdeckende Bildersequenz aufgenommen. Das Tiefenbild des Scanners kann mit den Fotoinformationen aus den 360°-Panoramaaufnahmen der Kamera so kombiniert werden, dass für jeden Messpunkt die entsprechende Farbinformation an dessen Position ermittelt wird. Das Ergebnis ist eine (annähernd) fotorealistische Darstellung des über das Punktmodell beschriebenen Objekts (Abb. 4 a. b).

Der große Messraum sowie die rasche Datenaufnahme, verbunden mit einer im Verhältnis zu den großen messbaren Distanzen hohen Messgenauigkeit, lassen das Gerät insbesondere für weiträumige Objekte wie Topografie, städtebauliche Gesamtensembles sowie für Übersichtsscans von Einzelgebäuden besonders geeignet erscheinen.

Für kleinere Objekte wurde das Streifenprojektionssystem PT-M 1024 in Verbindung mit der Software QT Sculptor verwendet. Das Gerät erfordert einen Objektabstand von 0,5–3 m und erreicht eine Messgenauigkeit von maximal 0,1 mm. Der Scanner besteht aus einem LCD-Projektor und zwei Hochgeschwindigkeitskameras, die auf einer Aluminiumschiene montiert werden. Weder die Kameras noch der Projektor verfügen über mechanisch bewegliche Teile, wodurch eine besonders hohe Messgenauigkeit erzielt wird. Mittels des Projektors werden Streifenmuster in rascher Abfolge auf das zu vermessende Objekt projiziert und gleichzeitig durch die Kameras aufgenommen. Die Geometrie des Objekts errechnet sich aus den durch die Projektion entstandenen Verzerrungen der Streifenmuster.

Aufgrund der Exaktheit der Messergebnisse ist das Gerät für kleinere Objekte sowie Werkstücke mit kleinteiliger Oberflächenstruktur optimal geeignet. Es ist verhältnismäßig klein und handlich und kann daher gut transportiert und an beliebigen Orten eingesetzt werden. Dennoch ist der Einsatz auch mit diversen Hindernissen verbunden. Wie auch bei anderen 3-D-Scannern ist es notwendig, das Gerät so aufzustellen, dass es sich während des Messvorgangs nicht bewegen kann und keinerlei Erschütterungen ausgesetzt ist. Dies stellt in geschlossenen Räumen und auf festem Untergrund kein Problem dar. Die Vermessungsarbeiten in der Bauforschung finden allerdings meist im freien Feld statt. Gerade das Arbeiten im Freien erweist sich insofern als schwierig, als bereits leichter Wind die an das Gerät angeschlossenen Kabel in Schwingung versetzt und damit zu unbrauchbaren Messergebnissen führt. Häufig muss auch mit Gerüsten gearbeitet werden, um sämtliche Oberflächenbereiche der aufzunehmenden Objekte erreichen zu können. Und auch hier stellt das Gewährleisten absoluter Schwingungsfreiheit eine große Herausforderung dar. Jeder Einzelscan muss daher bereits unmittelbar nach dem Scanvorgang kontrolliert und gegebenenfalls wiederholt werden. Ein weiteres Hindernis bringen die für den Messvorgang notwendigen Lichtverhältnisse mit sich. Um im projizierten Streifenmuster möglichst starke Kontraste erzeugen zu können, ist es notwendig, bei annähernder Dunkelheit zu arbeiten. Die Möglichkeit sämtliche Bauteile in einen abgedunkelten Innenraum zu bringen, schied im Fall des Oktogons aus, da die Werkstücke bis zu 1,5 t schwer sind und der Transport folglich einen unverhältnismäßig großen Aufwand mit sich brächte. Stattdessen wurde bei den Scankampagnen in Ephesos teilweise erst nach Einbruch der Dunkelheit mit der Aufnahme begonnen.

Aufgrund der unterschiedlichen Aufbewahrungsorte der Werkstücke des Oktogons sah sich das Scan-Team je nach Standort mit völlig unterschiedlichen Gegebenheiten konfrontiert. Bezogen auf den Aufbewahrungsort können daher drei Gruppen von aufzunehmenden Bauteilen unterschieden werden:

1. Der Sockelbau *in situ*: Am ursprünglichen Standort des Objekts an der unteren Kuretenstraße in Ephesos befindet sich heute lediglich der bis zur Höhe des Stylobats erhaltene Sockel des Gebäudes, der auch die Grabkammer enthält. Die Ruine steht verhältnismäßig eng zwischen anderen Monumenten und wurde bis in spätantike Zeit hinein teilweise überbaut, sodass Teile der Sockelkonstruktion auch zum Zeitpunkt der Vermessung im Sommer 2005 schlecht oder gar nicht zugänglich waren.

²⁵ Zu einem früheren Einsatz eines 3-D-Laserscanners s.: S. GROH – W. NEUBAUER, Einsatz eines terrestrischen 3-D-Laserscanners in Ephesos, *ÖJh* 72, 2003, 111–122.

Als Haupterfassungsmethode kam für den Sockel der 3-D-Laserscanner LMS-Z 420i zum Einsatz. Von insgesamt 41 Standpunkten aus wurden Panoramaaufnahmen der Gesamtsituation sowie ausgewählte Detailaufnahmen durchgeführt. Der 3-D-Laserscanner wurde gewählt, weil er auch bei Tageslicht und bei starker Sonneneinstrahlung eingesetzt werden kann. Da das Oktogon an einer von Besuchern besonders stark frequentierten Stelle des Grabungsgeländes liegt, musste der Sockelbau in verhältnismäßig kurzer Zeit mit großflächigen Scans aufgenommen werden.

Einzelne Werkstücke auf dem Sockelbau konnten aufgrund ihrer Kleinteiligkeit und ihrer Detaillausprägung mit dem Laserscanner nicht in ausreichender Qualität erfasst werden. Hier wurden die Laserscans mit Streifenlichtscans ergänzt. Die betreffenden Bauteile, welche hier mit dem Streifenlichtscanner aufgenommen wurden, saßen größtenteils *in situ* oder waren fix am Sockelbau versetzt, verklammert und hintermörtelt. Es bestand daher keine Möglichkeit, sie an einen Ort zu verbringen, der die für den Scanner optimalen Bedingungen aufgewiesen hätte. Die Aufnahme musste direkt auf dem Sockel selbst stattfinden, was die Wahl der Scannerstandorte erheblich einschränkte. Weiters wurde, da keine Möglichkeit bestand, das Monument entsprechend einzuhüllen und abzudunkeln, nachts gearbeitet, weil das Gerät, wie bereits oben beschrieben, nicht bei Tageslicht eingesetzt werden kann.

2. Die Erfassung der insgesamt etwa 150, aus dem Verband geratene Bauteile im Grabungsgelände erfolgte ausschließlich mit dem Streifenlichtscanner, um den vor allem bei den Gesimsblöcken und den Architraven ausgearbeiteten Bauschmuck in ausreichender Qualität darstellen zu können. Der überwiegende Teil der losen Einzelbauteile, die bei der Freilegung des Objekts bereits aus dem Verband geraten waren, wurde in den vergangenen Jahrzehnten sukzessive auf einem Steinauslegeplatz im Grabungsgelände hinter der Celsusbibliothek gesammelt²⁶. Die Werkstücke am Steinauslegeplatz waren für die Vermessung gut zugänglich und konnten entsprechend den Erfordernissen gehoben und gedreht werden, um sämtliche Seitenflächen aufzunehmen. Außerdem bot der Steingarten ausreichend Platz, um einen entsprechenden Arbeitsbereich einzurichten. Hierfür wurden zwei Plattformen errichtet, auf denen die größeren Baublöcke ausgelegt wurden. Die Aufnahme der Werkstücke fand nachts statt. Tagsüber wurden mit dem Kran jeweils jene Steine vorbereitet, welche in der darauffolgenden Nacht vermessen werden sollten. Um auch tagsüber arbeiten zu können, wurde zusätzlich für die Aufnahme der kleineren Bauteile ein Arbeitszelt errichtet, das ausreichend abgedunkelt werden konnte. Der nachteilige Einfluss der großen Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht auf das Gerät, der leicht zu verfälschten Messergebnissen führt, machte vor jeder Arbeitsschicht das sorgfältige Kalibrieren notwendig.

Einige Bauteile befanden sich noch in der Nähe des Sockelbaus oder waren entlang der Besucherwege aufgestellt. Die Friesplatten befanden sich an der Marmorstraße im Bereich vor der Celsusbibliothek. Die Vorderseiten waren unverdeckt und konnten daher von der Straße aus gut aufgenommen werden. Um auch die Rückseiten und die seitlichen Stoßflächen scannen zu können, wurden die Platten gedreht und in ausreichend großem Abstand voneinander auf der Marmorstraße aufgestellt. Ihre Rückseiten mussten so schnell wie möglich in einer einzigen Nacht aufgenommen werden, damit die Platten tags darauf wieder von der von Touristen stark frequentierten Straße entfernt werden konnten. Pro Stein wurden abhängig von der Komplexität der Oberfläche zwischen 20 und 100 Einzelscans angefertigt, weshalb pro Werkstück eine Gesamtarbeitszeit von ein bis zwei Stunden kalkuliert wurde. Als einfacher erwies sich die Aufnahme der Säulenschäfte, welche in einer Kammer östlich der Marmorstraße verwahrt wurden. Sie wurden nebeneinander in einem unfrequentierten Bereich neben der Marmorstraße aufgelegt und konnten ohne Einsatz eines Krans oder eines anderen Hebewerkzeugs durch einfaches Rollen bewegt werden. Die Platten der Kassettendecke wurden im Brunnenbecken vor dem Heroon verwahrt, wo sie zu dicht aneinander standen, um eine Aufnahme an Ort und Stelle zuzulassen. Sie mussten daher mit dem Kran herausgehoben werden, was hier einen erheblichen logistischen Aufwand darstellte. Zudem war es notwendig, hinter dem Hadrianstor Erde aufzuschütten, sodass der Kran sicher aufgestellt werden konnte.

Die Arbeiten im Grabungsgelände zeigen besonders deutlich, dass der Organisation des Arbeitsablaufs bereits im Vorfeld der Scanarbeiten besondere Bedeutung beigemessen werden muss. Die Erfordernis eines

²⁶ Schon in antiker Zeit wurden Bauteile von eingestürzten Gebäuden häufig für andere Bauten wieder verwendet, weshalb sich viele Steine bereits zum Zeitpunkt der Freilegung nicht mehr in der näheren Umgebung des ursprünglichen Standorts befanden und heute über das gesamte Grabungsgelände verteilt aufzufinden sind.

Krans zum Bewegen der Bauteile, die Abhängigkeit von Lichtverhältnissen oder auch die notwendige Rücksichtnahme auf Touristen sind Faktoren, die eine detaillierte Planung unerlässlich machen.

3. Die dritte Gruppe bilden schließlich die im Jahr 1978 im Ephesos Museum in der Wiener Hofburg als Architekturprobe aufgestellten Bauteile. Auch diese Verbauung stellte für die Aufnahme ein nicht unwesentliches Problem dar. Einerseits war auch hier, wie schon beim Sockel, die Zugänglichkeit einzelner Ansichten, insbesondere die der Ober- und Rückseiten, sehr eingeschränkt. Andererseits werden durch das Zusammensetzen der Bauteile die Anschlussflächen verdeckt, welche jedoch später für die Rekonstruktion die größte Aussagekraft besitzen.

Wie beim Sockelbau in Ephesos wurde die Gesamtsituation im Ephesos Museum in Wien mit mehreren Aufnahmen des 3-D-Laserscanners erfasst. Parallel dazu wurden die Bauteile im Museum aber flächendeckend auch mittels Streifenlichtscanner aufgenommen. Die Daten des Laserscanners dienten hier als Bezugssystem für die Streifenlichtscans. Das Arbeiten in einem geschlossenen Innenraum gestaltete sich wesentlich einfacher als im Grabungsgelände in Ephesos. Der Raum konnte gut abgedunkelt werden, weiters stand zur Erfassung der Oberseiten der Bauteile ein stabiles Gerüst zur Verfügung.

Unabhängig von der Messtechnologie liefern beide Systeme Messergebnisse in Form sogenannter Punktwolken, d. h. von gleichwertigen, unklassifizierten und zufällig auf dem Messobjekt verteilten Punkten²⁷. Im Unterschied zu manuellen oder halbautomatischen Messverfahren, bei denen geometrische Referenzpunkte am Objekt gezielt ausgewählt werden, um dessen Oberfläche hinreichend exakt zu beschreiben, sind Messpunkte von 3-D-Scannern – abhängig von Geräteabstand, gewählter oder vorgegebener (Scan-)Auflösung und dem Winkel zwischen Messstrahl und Objekt – über die gesamte Oberfläche des aufzunehmenden Objekts verteilt. Während insbesondere detailreiche, komplexe Formen durch die erreichbare Punktdichte effizient diskretisiert werden, nimmt mit abnehmender Komplexität der Form das Ausmaß der geometrischen Überbestimmung zu. Es ergibt sich also im Zuge des Erfassungsprozesses ein Missverhältnis aus Daten- und Informationsdichte. Wie redundante Punkte mittels geeigneter Methoden der Nachbearbeitung aus dem Modell eliminiert werden können, ohne dabei Information zu verlieren, ist derzeit Gegenstand zahlreicher Forschungsprojekte.

Im November 2006 konnten die Scanarbeiten zum überwiegenden Teil abgeschlossen und die erhaltenen Daten weiterverarbeitet werden. Der Weg vom Scannen bis hin zum dreidimensionalen Modell des jeweiligen Bauteils soll kurz vorgestellt werden: Beim Scanvorgang selbst werden für jeden Bauteil zahlreiche Einzelscans erstellt. Ein Einzelscan erfasst nur jenen Teilbereich der Objektoberfläche, der vom jeweiligen Scannerstandort aus sichtbar ist. Es müssen also in Bezug auf Anzahl und Verteilung die Scanstandorte so gewählt werden, dass letztlich die gesamte Objektoberfläche abgedeckt wird. Das Ergebnis eines Einzelscans sind Punkte im Raum, welche die Oberfläche des Objekts beschreiben. Zu beachten ist dabei die Notwendigkeit von Überlappungsbereichen, die durch die mehrfache Abbildung ein und derselben Oberfläche in verschiedenen Scans die Möglichkeit geben, die Ergebnisse der Einzelaufnahme mittels der sog. Registrierung aneinander zu fügen. Fügt man sämtliche Einzelscans zusammen, erhält man die 3-D-Informationen für die gesamte Objektoberfläche (Abb. 5). Der Scanner liefert jedoch ausschließlich Punkte, die je nach Auflösung unterschiedlich dicht auf der Oberfläche des Objekts liegen und diese somit in Form einer sogenannten Punktwolke definieren. Das Registrieren kann einerseits ›händisch‹ mit der Software QT Sculptor erfolgen, indem innerhalb des Überlappungsbereichs zweier Scans drei oder mehr identische Referenzpunkte ausgewählt werden, anhand derer das Programm diese beiden Scans verbindet. Angesichts der Anzahl an Einzelscans je Objekt sowie der Gesamtzahl der Objekte stellte sich diese Vorgangsweise als wenig effizient heraus. Darüber hinaus traten vor allem bei lang gestreckten, großen Objekten störende Abweichungen auf. In unserem Projekt konnten M. Hofer (Institut für diskrete Mathematik und Geometrie der TU Wien) und Q.-X. Huang (Stanford University) für eine Zusammenarbeit gewonnen werden. Letzterer entwickelte einen Algorithmus²⁸ mit dessen Hilfe das Registrieren der Scans automatisiert werden konnte.

²⁷ Vgl. W. NIEMEIER u. a., 3-D-Geometrieerfassung mit terrestrischen Laserscannern, in: T. LUHMANN (Hrsg.), *Photogrammetrie und Laserscanning* (Heidelberg 2002) 17.

²⁸ Q.-X. HUANG – B. ADAMS – M. WAND, *Bayesian Surface Reconstruction via Iterative Scan Alignment to an Optimized Prototype*. Proceedings of the Eurographics Symposium on Geometry Processing, Prag 2.–3. September 2007 (in Druck).

Um aus der vom Scanner gelieferten Punktwolke einen virtuellen Körper mit geschlossener Oberfläche zu erhalten, ist ein weiterer Arbeitsschritt, das ›Vermaschen‹ der Punkte, notwendig. Hierbei werden jeweils zwischen die Punkte Dreiecksflächen gelegt. Dieser Arbeitsschritt liefert räumliche Modelle jedes einzelnen Bauteils, die sogenannten *meshes*. Erst nach dieser Vermaschung der Punkte ist das Modell für 3-D-Programme als Körper zu fassen und zu bearbeiten (Abb. 6).

Um das realistische Abbild der Bauteile zu komplettieren, ist es möglich, die *meshes* mit der entsprechenden Oberflächentextur zu versehen. Zu diesem Zweck wurden von sämtlichen Werkstücken flächendeckend Fotos angefertigt, welche mit der Software QT Sculptor auf die fertigen Oberflächen aufgebracht werden können. Im gegenständlichen Fall wurden lediglich einige wenige Bauteile exemplarisch mit der entsprechenden Oberflächentextur versehen. Dabei zeigte sich, dass die teilweise schwärzlichen Verwitterungsspuren sowie Flechten und Verschmutzungen das Bild der Steine dahingehend verfälschen, als deren fleckiges Erscheinungsbild feine Bearbeitungsspuren und Details nur noch sehr schlecht erkennen lässt (Abb. 7 a. b). Es wurde daher entschieden, bei der steingerechten Rekonstruktion des Monuments vorerst mit untexturierten Modellen zu arbeiten, da gerade hierbei Oberflächenbearbeitungen und technische Details von Bedeutung sind.

Die virtuellen Modelle der Bauteile stellen eine völlig neue Art der Bauwerks- und Bauteildokumentation dar. Die Modellierung bei der konventionellen Methode (Zeichnungen von Ansichten) beruht auf der Interpretation des Objekts. Während also bei der konventionellen Erfassung – und damit auch Modellierung – von Bauteilen diese Interpretation sowohl den Inhalt als auch die Aussagekraft des Modells maßgeblich bestimmt, ist bei der 3-D-Erfassung beides lediglich durch die technischen Parameter des Geräts vorgegeben und hängt somit von der Messgenauigkeit, der Qualität der Registrierung sowie den eingesetzten Methoden der Nachbearbeitung ab.

Durch die räumliche und zeitliche Entkopplung von Dokumentation (im Sinn von maßgenauer Abbildung) und Interpretation wird der Wert der Auseinandersetzung mit dem Einzelobjekt keineswegs vermindert. Geändert wird vielmehr nur der Arbeitsablauf. Eine einmal im Zuge dieser inhaltlichen Auseinandersetzung hinsichtlich des Maßstabs und damit auch des Detaillierungsgrads der Aufnahme getroffene Entscheidung bestimmt die Aussagekraft des ›Fertigprodukts Zeichnung‹ dauerhaft. Veränderte Erkenntnisse, die sich vor allem in der Phase der steingerechten Rekonstruktion fast zwangsläufig ergeben, ziehen im Grunde auch veränderte Anforderungen an das Modell nach sich. Schließlich ist die Zeichnung – wie jedes Modell – eine zweckmäßige Abstraktion der Realität und als solche genau so gut, wie es mit gegebenen Mitteln für den beabsichtigten Einsatzzweck angemessen erscheint. Diese Aussage gilt selbstverständlich auch für die Erfassung mit 3-D-Scannern. Das Ausmaß der Abstraktion wird hier allerdings durch die technische Machbarkeit bestimmt. Dennoch ersetzt das Modell nicht die physische Auseinandersetzung mit den Eigenschaften des Objekts vor Ort, vielmehr ist es als ergänzender Informationsträger zu betrachten, dessen entscheidendes Merkmal darin besteht, ortsunabhängig zur Verfügung zu stehen.

Die skeptische Einstellung gegenüber digitalen Vermessungstechniken zeigt sich beispielsweise in einer Aussage G. Grubens: »Moderne ›Zauberbesen‹ wie die Photogrammetrie oder digitale Methoden der Vermessung und Darstellung sparen zwar tatsächlich Zeit, haben aber einen Nachteil: Der Apparat denkt nicht.«²⁹ Dabei ist es unbestritten, dass die Auseinandersetzung vor Ort mit jedem einzelnen Bauteil unerlässlich ist, doch ermöglicht der Einsatz neuer Technologien in vielerlei Hinsicht ein bequemerer Arbeiten. So auch im Falle des Oktogons. Anhand der 3-D-Modelle der Bauteile sowie mithilfe von Fotografien wurden die Werkstücke entsprechend ihrer Form sortiert und den unterschiedlichen Schichten zugeordnet. Bereits vor Ort wurde ein Katalog der Bauteile erstellt, in welchem jeder Stein einzeln und detailliert beschrieben wird. Der Katalog enthält ferner Angaben zur Hauptmasse der einzelnen Werkstücke, zu Oberflächenbearbeitung, Art und Lage technischer Verbindungen wie Dübel- oder Klammerlöcher sowie Beschreibungen von eventuell vorhandenem Schmuck. Jeder Bauteil muss hierfür auf seine Form, seine Oberflächenbeschaffenheit, auf unterschiedliche Bearbeitungen und spezifische Merkmale untersucht werden. Am digitalen Modell können durch die Nutzung entsprechender Werkzeuge in 3-D-Modellierungs- und Visualisierungssoftware Maße einfach und mit großer Genauigkeit genommen werden. Dabei ist die Überprüfung von bereits genommenen Maßen jederzeit und ohne besonderen Aufwand möglich. Die freie Wahl von Ansichten in orthogonaler und perspektivischer Darstellung erlaubt die Analyse der Steine, wie sie mit technischen Hilfsmitteln vor Ort nur bedingt möglich ist.

²⁹ GRUBEN 2000, 253.

Vor allem bei großen Bauteilen, die nur mit einem Kran bewegt werden können, erfolgt die Bearbeitung auf herkömmlichem Wege meist in mehreren Etappen, wobei die in der Regel im Steingarten aufgelegten Teile für die vollständige Erfassung aller Seitenflächen oft mehrfach gewendet werden müssen. Aufgrund des notwendigen technischen und personellen Aufwands beansprucht die Aufnahme vielfach einen längeren Zeitraum. Ein Umstand, der die integrative Gesamtsicht auf das Einzelobjekt erschwert. Das digitale Modell kann dagegen beliebig bewegt werden, wodurch beispielsweise Zusammenhänge zwischen Vorder- und Rückseite leichter zu erkennen sind. Darüber hinaus kann diese Arbeit am Schreibtisch erfolgen und Datenträger ermöglichen ein »Mitnehmen« der Bauteile an jeden beliebigen Ort.

Einen besonderen Vorteil bildet das digitale Modell zur Analyse der Oberflächenbearbeitung: Feine Bearbeitungen und Strukturen treten insbesondere bei Streiflicht deutlich hervor. Am digitalen Modell können unterschiedliche Lichteinfallswinkel eingestellt werden, sodass die Oberflächenstruktur optimal dargestellt wird (Abb. 8 a. b). Darüber hinaus besteht, wie oben bereits erwähnt, die Möglichkeit, die Textur des Objekts auszublenden (Abb. 7 a. b). Vielfach sind insbesondere sehr feine Oberflächenbearbeitungen durch Verschmutzungen und Verwitterungsspuren schlecht oder auch gar nicht zu erkennen. Das Wegblenden dieser Textur kann helfen, verschiedene Details und Bearbeitungsspuren besser sichtbar zu machen. Schließlich bietet das virtuelle Modell auch die Möglichkeit, Details in großem Maßstab darzustellen. Die Vermessung mittels Streifenlichtscanner liefert originalgetreue Abbilder der Bauteile, die Frage nach Maßstab und Detaillierungsgrad bei der Aufnahme der Werkstücke stellt sich nicht. Im Zuge der weiteren Arbeitsschritte kann der für die jeweilige Untersuchung notwendige Maßstab gewählt und beliebig verändert und variiert werden. So erfordert etwa die Beschreibung der Bauteile einen sehr hohen Detaillierungsgrad, während später für das virtuelle Gesamtmodell auf verschiedene Details verzichtet werden kann, um die Datenmenge zu reduzieren.

Schließlich wurde der Katalog der Bauteile durch maßstäbliche Ansichten aller Seiten jedes Steines ergänzt. Von allen Seiten eines Bauteils werden hierbei Orthoansichten erstellt, aus welchen maßstäblich unverzerrt Höhen und Längen ablesbar sind (Abb. 9). Zwar können diese Ansichten lediglich einen Bruchteil der Information wiedergeben, die das virtuelle 3-D-Modell bereitstellt, das Ergebnis ist aber druckbar und somit auch für diejenigen verwendbar, die nicht über entsprechende 3-D-Software verfügen.

Beim Erstellen der Orthoansichten musste nach einem geeigneten Softwareprodukt gesucht werden. Benötigt wurde ein Programm, das zum einen die großen Datenvolumina lesen und darstellen konnte, zum anderen musste die Möglichkeit geboten werden, maßstäbliche Abbildungen der Steinansichten herzustellen und diese als Bilddatei zu speichern. Schließlich wurde die von der Firma RIEGL-Laser-Measurement-Systems GmbH entwickelte Scansoftware RiSCAN PRO verwendet. In dem Programm können die Bauteile geladen und mittels einfachen Maus- und Tastenkombinationen so rotiert und verschoben werden, dass Normalprojektionen jeder erwünschten Ansicht abgebildet werden können. Zudem erlaubt das Programm, die so erstellten Bildschirmansichten maßstäblich als Bild mit vordefinierter Größe zu speichern.

Die Orthoansichten ergänzen auf anschauliche Weise den Bauteilkatalog. Will der Forscher nun an dieser Stelle aus dem computergestützten Arbeiten aussteigen oder stehen plötzlich Hardware und Software nicht mehr zur Verfügung, so besteht die Möglichkeit, mit dem bisher erstellten Material wie gewohnt auf traditionellem Wege weiterzuarbeiten.

Unter steingerechter Rekonstruktion versteht man das (zeichnerische) Zusammenfügen der Bauteile eines Monuments, sodass jedes Bauglied exakt an seiner ursprünglichen Position im Gesamtverband des Gebäudes zu liegen kommt³⁰. Technische Verbindungen wie Dübel- oder Klammerlöcher sowie Oberflächenbearbeitungen, welche sich auf benachbarten Blöcken fortsetzen, geben jene Hinweise, aufgrund derer das zerstörte Monument Schicht für Schicht wiederersteht.

Gerade der Arbeitsschritt der steingerechten Rekonstruktion erlaubt am Beispiel des Oktogons besonders gut, die herkömmliche Arbeitsweise mit der neuen computergestützten zu vergleichen. Noch bevor die 3-D-Modelle der einzelnen Bauteile vorlagen, wurde im Sommer 2005 damit begonnen, Teile der Gesimszone auf traditionelle Weise aneinander zu passen. Der Gesimsbereich ist im konkreten Fall nahezu vollständig erhalten. Er setzte sich ursprünglich aus 16 Blöcken zusammen, acht Eckblöcke waren jeweils durch acht Zwischenstücke zu dem oktogonalen Gesimskranz zusammengefügt. Ein Mittelstück fehlt heute, alle übrigen Steine sind mit mehr oder weniger starken Beschädigungen erhalten geblieben. Die Bauteile waren unterei-

³⁰ Zur zeichnerischen Rekonstruktion s. GRUBEN 2000, 254–256.

einander verklammert, an der Oberseite wurde der vordere Bereich bossiert belassen, der rückwärtige Teil der Fläche diente als Auflager für die Dachsteine und ist dementsprechend geglättet. Anhand der Position der Klammerlöcher konnte rasch festgestellt werden, welche Bauteile mit hoher Wahrscheinlichkeit nebeneinander liegen müssen, letzte Sicherheit gab ein versuchsweises Anpassen der Bauteile vor Ort (Abb. 10). Mit dem Kran wurden die Blöcke auf hölzerne Plattformen gehoben. Aufgrund der unebenen Auflagerflächen mussten die Steine mit Holzklötzen aufgebockt werden, um die Anschlussflächen eines Paares bestmöglich zusammenschieben zu können. Gerade beim physischen Zusammensetzen der Proben ist die Gefahr, die Steine zu beschädigen, erheblich. Dennoch ist der Vorgang notwendig. Erst wenn die Steine aneinander liegen wird sichtbar, ob die Stoßflächen auch wirklich zueinander passen. Die Stoßflächen wurden meist erst direkt vor dem Versetzen bearbeitet, um die des neu zu versetzenden Blockes möglichst exakt an diejenigen des bereits versetzten anpassen zu können. Da die Flächen meist nicht völlig eben und auch selten exakt zu Ober- oder Unterseite stehen, müssen Form und Winkel innerhalb eines gewissen Spielraumes komplementär sein. Zeichnerisch sind diese Unregelmäßigkeiten der Anschlussflächen oft nur schlecht erfassbar, da sie meist sehr gering sind. Die Probe mit den Originalteilen zeigt jedoch zweifelsfrei, ob zwei Blöcke tatsächlich aneinander passen oder nicht. Und auch das Weiterlaufen von Abarbeitungen auf benachbarten Blöcken wird erst an den zusammengesetzten Originalbauteilen offenkundig (Abb. 11). Der bossierte Rand an der Oberseite der Blöcke beispielsweise endet nach hinten hin leicht verlaufend. In einer Zeichnung liegt es im Ermessen des Zeichners, wo der Rand exakt endet und die Auflagerfläche beginnt und an welcher Stelle nun das Maß genommen wird. An den Originalbauteilen entspricht die Abarbeitung über die Stossfuge hinweg – sowohl hinsichtlich des Verlaufs als auch bezüglich der Struktur – der der benachbarten Oberseite, womit auch hier erst durch die Beobachtung am Stein deutlich wird, ob die richtigen Blöcke zusammengefügt wurden.

Nachdem von Q.-X. Huang die ersten Modelle der Bauteile fertig gestellt worden waren, konnte schließlich damit begonnen werden, die für Stein und Mensch eher heiklen, aber im Arbeitsprozess dennoch notwendigen Schritte an den Schreibtisch zu verlegen. Die virtuelle steingerechte Rekonstruktion des Oktogons ist vollkommenes Neuland. Zunächst stellte sich wieder die Frage nach der geeigneten Software. Fertige Softwarepakete, welche exakt den Anforderungen des Bauforschers entsprechen, sind derzeit noch nicht am Markt. Es galt also, zu Beginn zu formulieren, welche Funktionen zum Bewegen und Aneinanderfügen der Bauteile notwendig sind, um in der Folge jene 3-D-Software zu finden, die diese Anforderungen am besten abdecken konnte. Hier zeigte sich rasch, dass die enormen Datenvolumina der einzelnen Bauteile mit gängiger CAD- und 3-D-Visualisierungssoftware kaum zu bewältigen sind. Diese Software arbeitet gewöhnlich mit 3-D-Modellen, die auf einfachen geometrischen Grundformen wie Kugel, Prisma, Zylinder etc. basieren. Die Programme stellen Werkzeuge zum Konstruieren mit diesen Grundformen und zur Visualisierung der konstruierten Modelle bereit. Diesen mathematisch beschriebenen Modellen liegt also eine Formel zugrunde, mit deren Hilfe die Oberfläche eindeutig definiert ist. Für die Konstruktion beispielsweise einer Zylinderfläche sind lediglich die Angabe eines Mittelpunktes, ein Richtungsvektor sowie Radius und Höhe vonnöten. Auf diesem Wege werden die Datenvolumina auch bei eher komplexen Objekten verhältnismäßig klein gehalten. Die Flächen der Bauteile des Oktogons lassen sich jedoch nicht auf einfache geometrische Formen zurückführen. Die Oberflächen werden nicht mathematisch, sondern geometrisch beschrieben und definieren sich durch Punktkoordinaten im Raum. Durch die Vermaschung der Punkte wird die Oberfläche durch viele, zwischen den Punkten liegende Dreiecksflächen angenähert, was insbesondere bei komplexen Oberflächen zu einem ungleich größeren Datenvolumen führt. Als Beispiel sei hier das vermaschte Modell eines Kapitells des Oktogons angeführt, dessen Oberfläche sich im nicht komprimierten Zustand aus rund 6,5 mio. Dreiecken zusammensetzt. Je mehr Punkte vermessen wurden und je mehr Dreiecksflächen in der Folge die Modelloberfläche bilden, desto ähnlicher ist das Modell freilich dem Original, umso größer aber auch die zu verarbeitende Datenmenge.

CAE (Computer Aided Engineering)-Software ist, im Gegensatz zu den oben beschriebenen CAD-Programmen, dafür konzipiert, mit solchen dreiecksvermaschten Freiformflächen und den damit verbundenen großen Datenmengen zu arbeiten. Die Hauptanforderung an die Software besteht vor allem darin, interaktives Arbeiten, d. h. das Rotieren, Verschieben und Zoomen von 3-D-Objekten, in der 3-D-Ansicht zu ermöglichen. Idealerweise können mehrere Objekte in ein und dieselbe Umgebung geladen werden. Schließlich erweist es sich als vorteilhaft, wenn die geladenen Objekte gleichzeitig in mehreren unterschiedlichen Ansichten gezeigt werden können, welche im besten Fall frei wählbar sind.

Neben komplexer CAE-Software kamen aber auch 2-D-Bildbearbeitungsprogramme zum Einsatz, mit deren Hilfe die Vorarbeiten zum dreidimensionalen Zusammenfügen geleistet wurden.

Anhand der 3-D-Modelle und der entsprechenden Software konnte nun mit der virtuellen, steingerechten Rekonstruktion des Oktogons begonnen werden. Wie bereits oben beschrieben, unterscheiden sich die zeichnerisch erfassten Modelle von den gescannten besonders durch den Umstand, dass die Zeichnung bereits zum Zeitpunkt ihrer Erstellung eine Interpretation der Wirklichkeit darstellt. Das virtuelle 3-D-Modell hingegen bildet die Wirklichkeit ab, ohne Entscheidungen darüber zu treffen, welche Informationen zu verdeutlichen und welche wegzulassen sind. Fehlinterpretationen, die bei herkömmlicher Arbeitsweise eine neuerliche Untersuchung der Objekte vor Ort erfordern, oder im ungünstigsten Fall unbemerkt bleiben und zu einer Reihe falscher Schlüsse führen können, werden weitestgehend vermieden. Die Interpretation erfolgt erst bei der Weiterbearbeitung im Zuge der Rekonstruktion. Getroffene Entscheidungen können jederzeit überprüft und gegebenenfalls revidiert werden.

Wesentlich erscheint auch, dass jeder Arbeitsschritt Modelle in unterschiedlichem Maßstab und variierender Detaildichte erfordert. Die zeichnerische Aufnahme der Bauteile ist hier wenig flexibel, während das virtuelle Arbeiten die Möglichkeit bietet, Modelle gemäß den jeweiligen Anforderungen beliebig zu modifizieren. Dabei bewegt sich der Forscher innerhalb der Grenzen, die einerseits durch die erforderliche Detailtreue zur effizienten Bearbeitung, andererseits durch die Leistungsfähigkeit von Hard- und Software gegeben sind. Das heißt, dass das Modell jeweils die Detaildichte aufweisen muss, die für den Arbeitsschritt notwendig ist, immer aber unter Berücksichtigung des verarbeitbaren Datenvolumens. Für die detaillierte Analyse eines einzelnen Bauteils ist eine hohe Punktdichte zur Wiedergabe seiner Details wie Klammer- oder Dübellöcher sowie Oberflächenbearbeitung erforderlich. Damit dennoch das interaktive Bewegen der Modelle möglich ist, können diese oft nur einzeln geladen und bearbeitet werden. Zum Aneinanderpassen kleinerer Gruppen können dagegen bereits leicht komprimierte Datensätze verwendet werden, in welchen zwar die Position von Klammer- und Dübellöchern noch gut zu erkennen ist, nicht aber Oberflächenstrukturen, wie sie beispielsweise feine Steinbearbeitungsmethoden hinterlassen. Für das Zusammenfügen größerer Gruppen, die bereits in Detailproben aneinandergesamt wurden und als gesichert gelten, kann eine weitere Reduktion der die Oberflächen beschreibenden Punkte erfolgen.

Im konkreten Fall wurde zu Beginn mit den für den Katalog der Bauteile erstellten Orthoansichten gearbeitet. Die einzelnen Arbeitsschritte sollen hier anhand der Rekonstruktion des achtseitigen Stylobats illustriert werden. Mithilfe einer 2-D-Bildbearbeitungssoftware wurden über der Draufsicht des Sockelbaus die Umrisslinien der fehlenden Stufen anhand der bestehenden Architektur schematisch ergänzt. Die Draufsichten aller erhaltenen Stylobatblöcke wurden nun ebenfalls in das Programm geladen und konnten so innerhalb der Umrisslinien gemäß ihrer Geometrie aneinandergesamt werden (Abb. 12). Weiters konnten die Bauteile an unterschiedliche Positionen verschoben werden. Für Steine, die aufgrund ihrer Anschlüsse oder Bearbeitungsmerkmale nicht eindeutig eingeordnet werden konnten, wurden mehrere Varianten erarbeitet. Dabei ist immer ein rasches Wechseln von der Detailansicht zur Gesamtansicht möglich. Parallel dazu konnten die dreidimensionalen Modelle in einem speziellen *Viewer* im Detail betrachtet werden, um Fragen zu Oberflächenbearbeitung oder Ausbildung der Anschlussflächen klären zu können. Auf diesem Wege war es möglich, kleinere Gruppen mit hoher Wahrscheinlichkeit benachbarter Steine zu bilden. Erst jetzt wurde damit begonnen virtuelle Architekturproben aneinander zu fügen, ein Arbeitsschritt, der hier mittels der bereits weitgehend gesicherten Gesimszone detailliert dargestellt werden soll (Abb. 13). Dieser Schritt entspricht dem beschriebenen Zusammenfügen von Architekturproben mit den Originalbauteilen. Die Vorteile liegen jedoch auf der Hand. Die virtuellen Bauteile können einfach und schnell bewegt werden. Dadurch ist ein viel exakteres Aneinanderpassen möglich, als es die tonnenschweren Bauteile vor Ort zulassen würden. Durch Legen von Schnitten können die Positionen von Dübellöchern überprüft und Durchdringungen dargestellt werden (Abb. 14 a. b). Weiters gewährt das Arbeiten am Bildschirm auch eine experimentelle Herangehensweise und regt an, auf den ersten Blick eher unwahrscheinliche Kombinationsmöglichkeiten ebenfalls auszuprobieren. Der Arbeitsprozess, beginnend beim zweidimensionalen Vorsortieren möglicher Paare bis zum Test mithilfe der virtuellen Modelle, kann bei geringem Zusatzaufwand mehrmals in unterschiedlichen Varianten durchlaufen werden.

Wie oben beschrieben, erfolgt das Aneinanderpassen der Bauteile anhand unterschiedlicher Beobachtungen am Objekt. Die zueinander passenden Flächen werden hinsichtlich verschiedener Kriterien wie Abmessungen (Höhe/Tiefe), Position von Klammer- und Dübellöchern, Art und Qualität von Abarbeitungen sowie Form und

Winkel untersucht. In der jüngsten Forschung wird anhand dieser Parameter derzeit versucht³¹, einen Algorithmus zu entwickeln, der den Vorgang der steingerechten Rekonstruktion automatisieren soll³².

Wurden letztlich alle Steine ihrer ursprünglichen Position im Gebäudeverband zugeordnet, können mithilfe der Orthoansichten Schichtpläne angefertigt werden (Abb. 15). Auch hier steht das Ziel im Vordergrund, die Ergebnisse in druckbarer Form darzustellen, um auch hier den Zugriff ohne entsprechende Software zu ermöglichen. Darüber hinaus bilden die zweidimensionalen Darstellungen die Plangrundlage im Falle eines Wiederaufbaus des Monuments am Originalstandort. Sie können gegebenenfalls um erforderliche technische Details und Stützkonstruktionen erweitert werden.

Zuletzt muss entschieden werden, was aus denkmalpflegerischer Sicht mit den Resten des Monuments, nicht zuletzt vor dem Hintergrund der Ergebnisse der steingerechten Rekonstruktion, zu geschehen hat. Das Oktogon legt aufgrund der in hoher Zahl erhaltenen Bauteile sowie des *in situ* befindlichen Sockels eine Präsentation in Form einer – wenigstens teilweisen – Anastylose nahe. Unter Anastylose versteht man gemäß der 1964 verfassten Charta von Venedig »...das Wiederaussetzen vorhandener, jedoch aus dem Zusammenhang gelöster Bestandteile«³³. Neben dem Vermitteln des ursprünglichen Erscheinungsbildes eines Monuments bietet die Anastylose aber auch den besten Schutz für die aus dem Verband geratenen Architekturteile³⁴.

Gerade beim Vorgang der Entscheidungsfindung und der Frage nach Art und Umfang eines Wiederaufbaus kann das virtuelle Modell helfen, Fehlentscheidungen im Vorfeld zu verhindern. K. Nohlen spricht im Zusammenhang mit der Anastylose auch von einem Entwurfsprozess, in dem entschieden wird, wie und in welchem Umfang ein Gebäude wieder aufgerichtet wird³⁵. Und gerade dieser Entwurfsprozess kann durch das virtuelle Modell entscheidend unterstützt werden.

Anhand der steingerechten Rekonstruktion kann mithilfe der 3-D-Modelle eine virtuelle Anastylose erstellt werden. Für das virtuelle Zusammenfügen aller Werkstücke zu einem vollständigen Modell ist eine weitere Datenreduktion der einzelnen Bauteile notwendig. Dabei muss zwar auf Details der Oberflächenbearbeitung verzichtet werden, im Gesamtverband ist diese Vereinfachung der Einzelmodelle jedoch kaum wahrzunehmen. Vielmehr stellt die virtuelle Anastylose ein sehr realistisches Abbild des wieder aufzurichtenden Monuments dar. Beschädigungen an den Bauteilen und fehlende Bauglieder, die entweder weggelassen oder durch neue Bausubstanz ergänzt werden, sind deutlich sichtbar, sodass das tatsächliche Erscheinungsbild wiedergegeben wird. Ferner kann der Wiederaufbau in unterschiedlichem Umfang, von der einfachen Architekturprobe bis hin zur vollständigen Anastylose dargestellt werden.

Die Entscheidung, wie die Anastylose letztlich auszusehen hat, ist freilich nicht nur vom Erscheinungsbild des zusammengefügten Monuments selbst abhängig. Die Präsentation des Bauwerks soll einerseits gut verständlich sein, andererseits soll das wieder errichtete Gebäude sich aber auch in das Gesamtbild des Ruinenfeldes einfügen. Zu berücksichtigen sind andere Monumente in der unmittelbaren Umgebung, Blickachsen und die Wegeführung für die Besucher einer Grabungsstätte. Im gegenständlichen Fall muss der veränderte Blick entlang der Kuretenstraße auf die Fassade der Celsusbibliothek ebenso geprüft werden wie die Wirkung des wieder aufgerichteten Oktogons vor dem Hintergrund der modernen Hanghausüberdachung.

Ein weiterer Maßstabswechsel bietet die Möglichkeit, die künftige Gesamtsituation in unterschiedlichen Varianten zu zeigen. In den Jahren 2004 und 2005 wurde mithilfe des oben beschriebenen Laserscanners der gesamte Verlauf der Kuretenstraße aufgenommen. Im Sommer 2008 wurde der das Oktogon unmittelbar

³¹ s. dazu das FWF-Projekt »18865« am Institut für diskrete Mathematik und Geometrie an der TU Wien, das von S. Flöry und M. Hofer durchgeführt wird.

³² Q.-X. HUANG – S. FLÖRY – N. GELFAND u. a., Reassembling Fractured Objects by Geometric Matching, in: ACM Siggraph 2006. Proceedings of the 33rd International Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques, Boston, 30 July–3 August 2006, ACM Trans. Graphics 25/3, 2006, 569–578; M. HOFER – S. FLÖRY – B. THUSWALDNER u. a., 3D Technology Research Challenges for Anastylosis of Ancient Monuments, Geometry Preprint 171 (TU Wien 2006); S. FLÖRY – M. HOFER – B. THUSWALDNER u. a., Reassembling Ancient Monuments Via Constrained Registration (Poster Presentation), ACM SIGGRAPH 2007. Abstracts and Applications of the 34th Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques, San Diego 5.–9. August 2007 (elektronische Publ.).

³³ Die Charta von Venedig wurde in deutscher Übersetzung u. a. in ÖZKD 22, 1968 veröffentlicht.

³⁴ Vgl. F. HUEBER, Zu Schutz und Pflege archäologischen Erbes, in: M. KUBELIK – M. SCHWARZ, Von der Bauforschung zur Denkmalpflege. Festschrift Alois Machatschek (Wien 1993) 99.

³⁵ K. NOHLEN, Anastylosis und Entwurf, IstMitt 54, 2004, 35–54.

umgebende Bereich erneut durch 15 weitere Scanstandorte verdichtet. Das in der Folge angefertigte Modell bietet die Möglichkeit, die virtuelle Anastylose des Oktogons in das Umgebungsmodell einzusetzen. Der Wiederaufbau kann so in realistischer Umgebung von jedem beliebigen Standort aus betrachtet werden, sodass die Wirkung unterschiedlicher Maßnahmen überprüft werden kann.

Die steingerechte Rekonstruktion des Oktogons ist derzeit noch nicht abgeschlossen. Dennoch zeigt sich bereits jetzt, dass der Einsatz neuer Technologien in vielerlei Hinsicht zu rascheren und teilweise auch exakteren Ergebnissen führt, als sie mit herkömmlichen Methoden zu erzielen wären. Allein die 3-D-Vermessung der einzelnen Bauteile lieferte Resultate, die aufgrund der Detailgenauigkeit und Informationsdichte völlig neue Maßstäbe hinsichtlich Bauaufnahme und Dokumentation setzen. Als vorteilhaft erwies sich auch die Möglichkeit, im Zuge der steingerechten Rekonstruktion auf experimentelle Weise unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten auszuprobieren. Durch das unkomplizierte Wiederholen einzelner Arbeitsvorgänge konnten neue Perspektiven und Sichtweisen gewonnen werden. Schlussendlich hat sich gezeigt, dass auch denkmalpflegerischen Forderungen durch berührungsfreie Messtechniken einerseits, andererseits durch das Arbeiten mit virtuellen Modellen in großem Maße entsprochen wird, weshalb der Einsatz neuer Technologien in der Archäologie und Bauforschung wohl in Zukunft nicht mehr aus diesen Disziplinen wegzudenken sein wird.

Abgekürzt zitierte Literatur

Die Zitierweise entspricht den Richtlinien des Deutschen Archäologischen Instituts <www.dainst.org> (16.01.2009) und denen des Österreichischen Archäologischen Instituts <www.oeai.at/publik/autoren.html> (16.01.2009).

- | | |
|---------------|--|
| ALZINGER 1974 | W. ALZINGER, Augusteische Architektur in Ephesos, SoSchrÖAI 16 (Wien 1974). |
| GRUBEN 2000 | G. GRUBEN, Klassische Bauforschung, in: A. H. BORBEIN – T. HÖLSCHER – P. ZANKER (Hrsg.), Klassische Archäologie (Berlin 2000) 251–257. |
| THÜR 1990 | H. THÜR, Arsinoe IV, eine Schwester Kleopatras VII, Grabinhaberin des Oktogons in Ephesos? Ein Vorschlag, ÖJh 60, 1990, 43–56. |
| WILBERG 1904 | W. WILBERG, Handschriftliches Manuskript zur zeichnerischen Wiederherstellung des Oktogons aus dem Jahr 1904 (Planarchiv des ÖAI, Inv. III 1399, heute verschollen). |

DI Barbara Thuswaldner
% Österreichisches Archäologisches Institut
Franz Klein-Gasse 1
A-1190 Wien

Abbildungsnachweis

Abb. 1: Foto B. Thuswaldner; Abb. 2: THÜR 1990, Abb. 3; Abb. 3: Aufnahme ÖAI, Fotoarchiv Inv. III 196; Abb. 4 a. b: Graphik R. Kalasek; Abb. 5: Graphik B. Thuswaldner; Abb. 6: Graphik J. Kanngießner; Abb. 7 a. b: Graphik R. Kalasek; Abb. 8 a. b; 9: Graphik R. Kalasek/B. Thuswaldner; Abb. 10. 11: Foto B. Thuswaldner; Abb. 12: Graphik B. Thuswaldner; Abb. 13. 14 a. b: Graphik R. Kalasek; Abb. 15: Graphik B. Thuswaldner.



Abb. 1: Der *in situ* befindliche Sockelbau an der Kuretenstraße

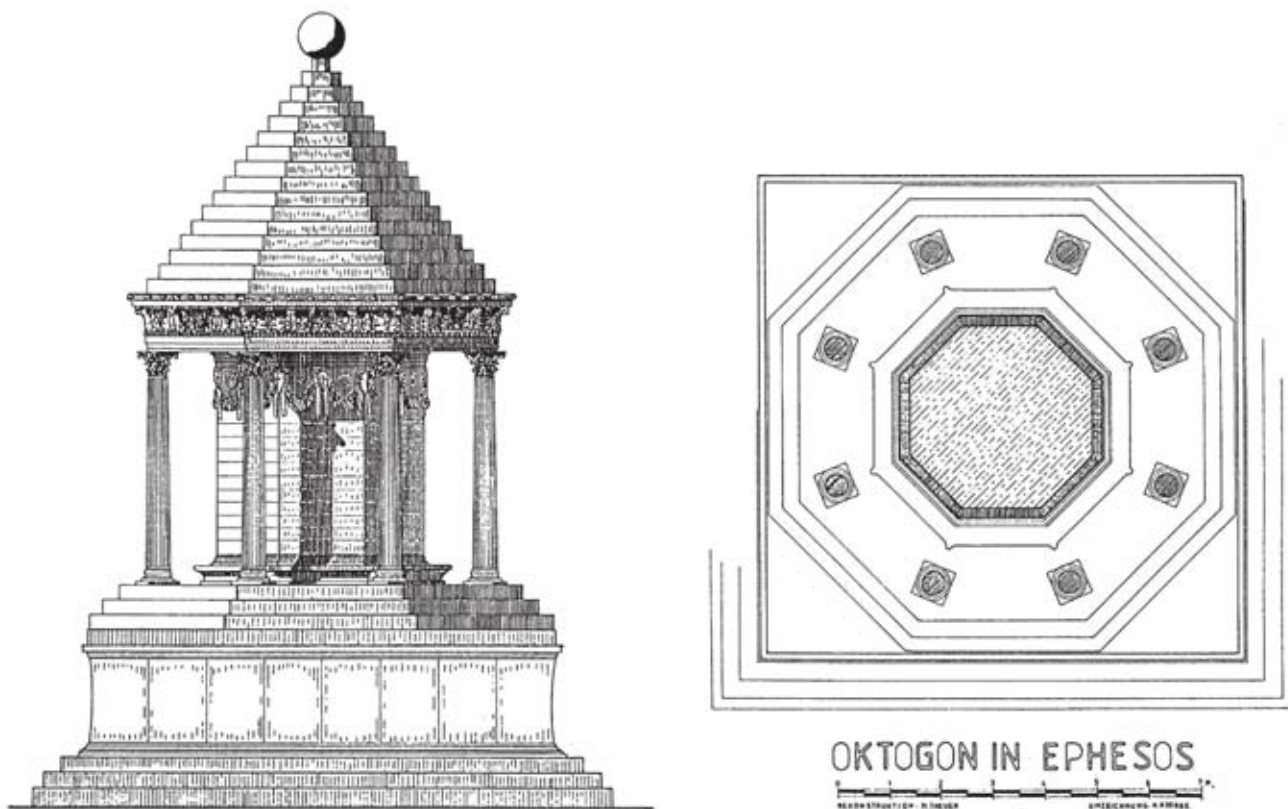


Abb. 2: Oktagon, Rekonstruktion der Ansicht und Grundriss



Abb. 3: Architekturprobe



Abb. 4 a: Punktwolke von der Kuretenstraße mit Farbinformation

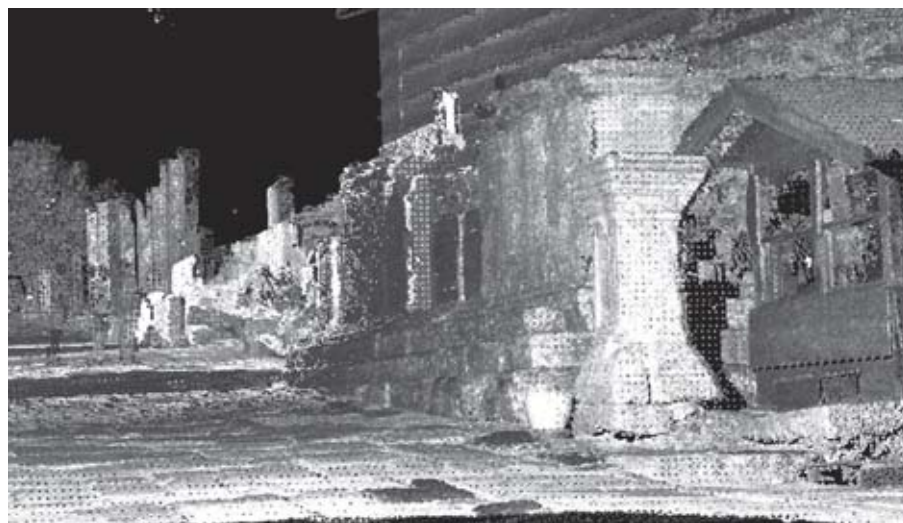


Abb. 4 b: Punktwolke von der Kuretenstraße ohne Farbinformation

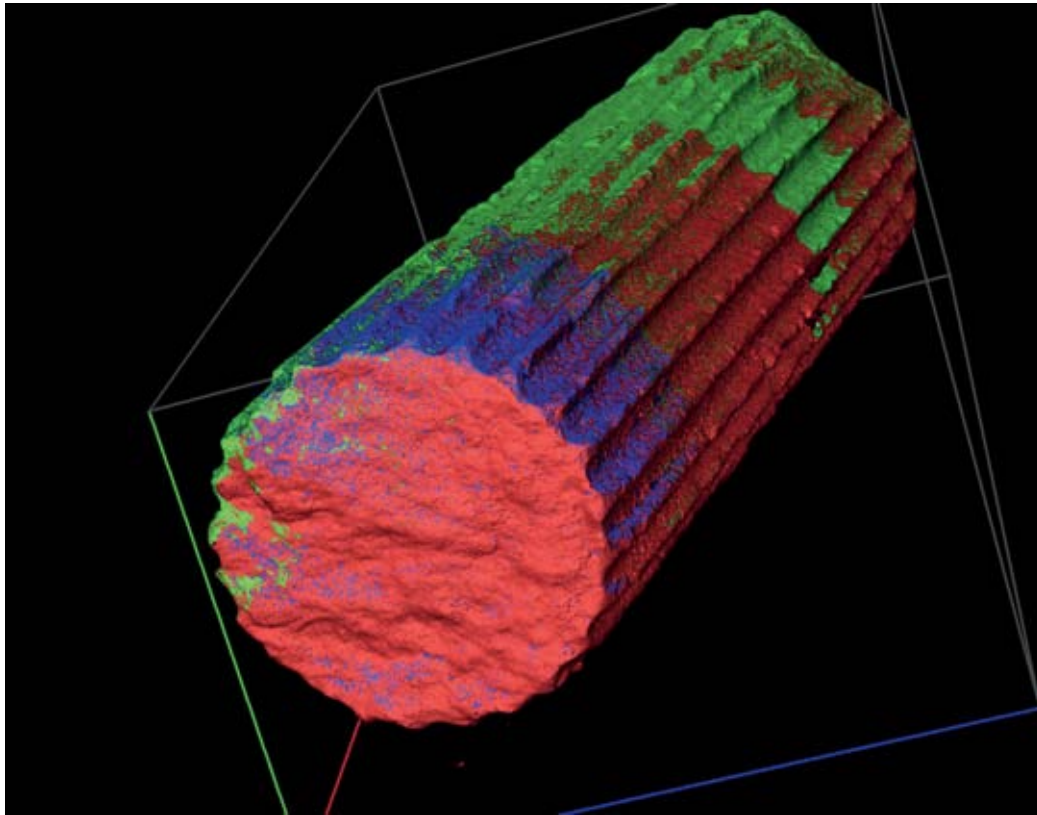


Abb. 5: *mesh* eines Bauteils mit Textur

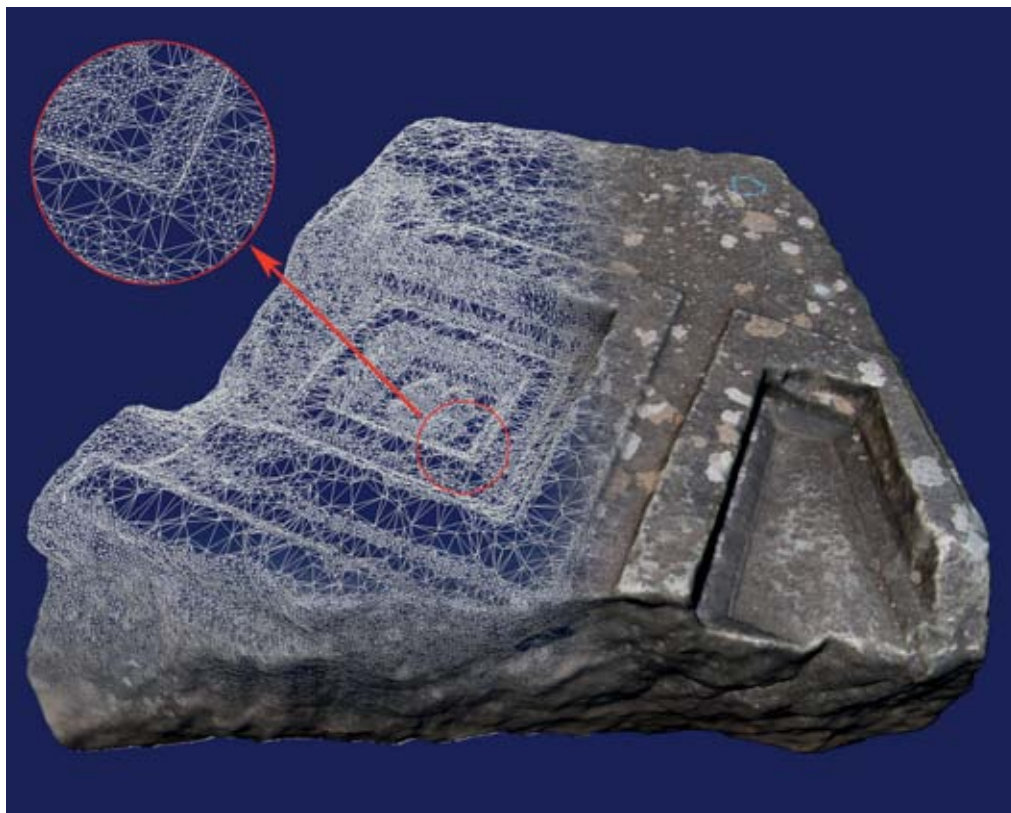


Abb. 6: *mesh* eines Bauteils mit Textur



Abb. 7 a: Bukranienfriesplatte ohne Textur



Abb. 7 b: Bukranienfriesplatte mit Textur

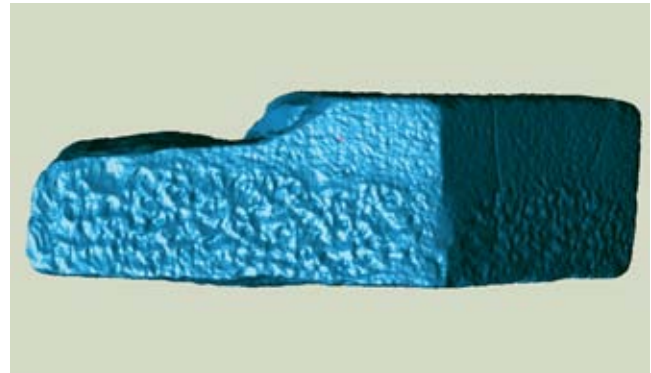
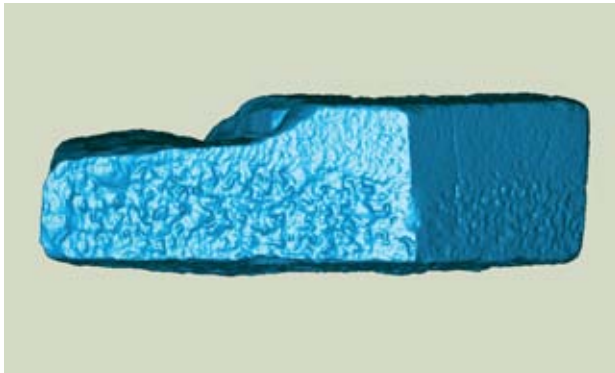


Abb. 8 a, b: Darstellen der Oberflächenstruktur mittels unterschiedlicher Beleuchtung

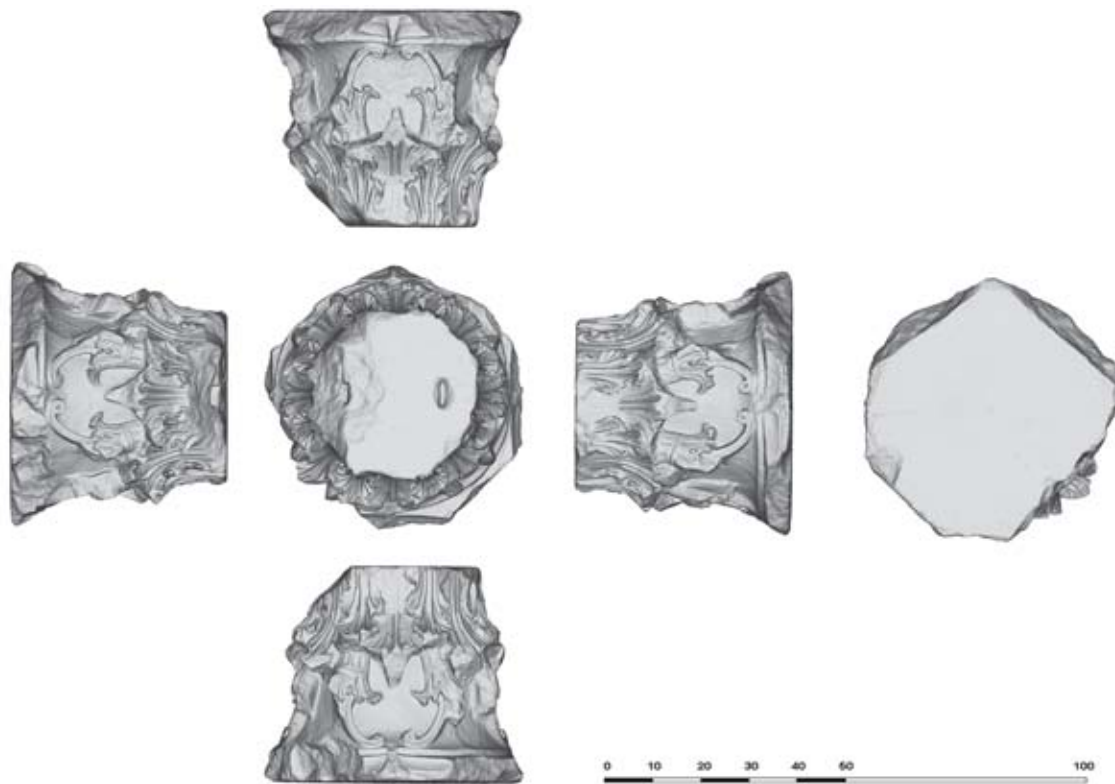


Abb. 9: Orthoansichten eines Kapitells



Abb. 10: Zusammensetzen von Architekturproben im Steingarten in Ephesos



Abb. 11: Durchlaufende Abarbeitung an der Oberseite zweier benachbarter Blöcke



Abb. 12: Zusammenfügen von Bauteilen mithilfe der zweidimensionalen Orthoansichten

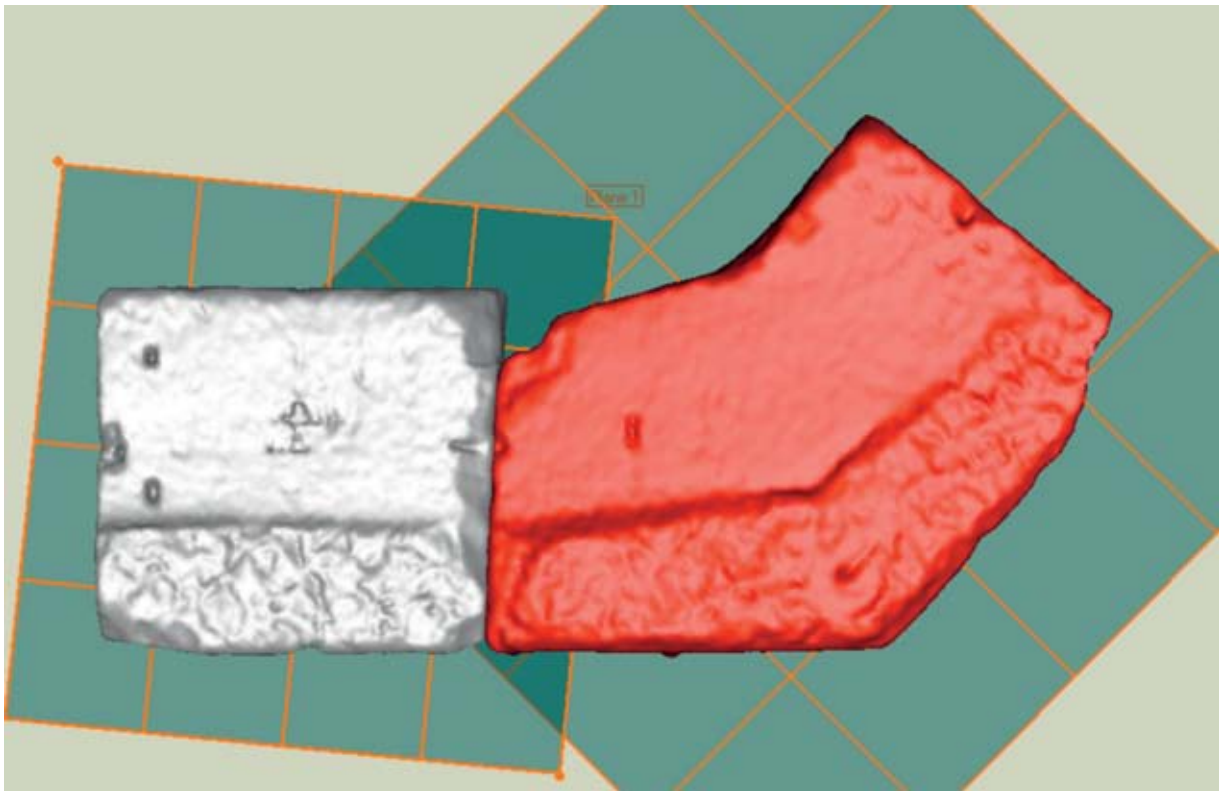


Abb. 13: Durchlaufende Abarbeitung: virtuelle Architekturprobe

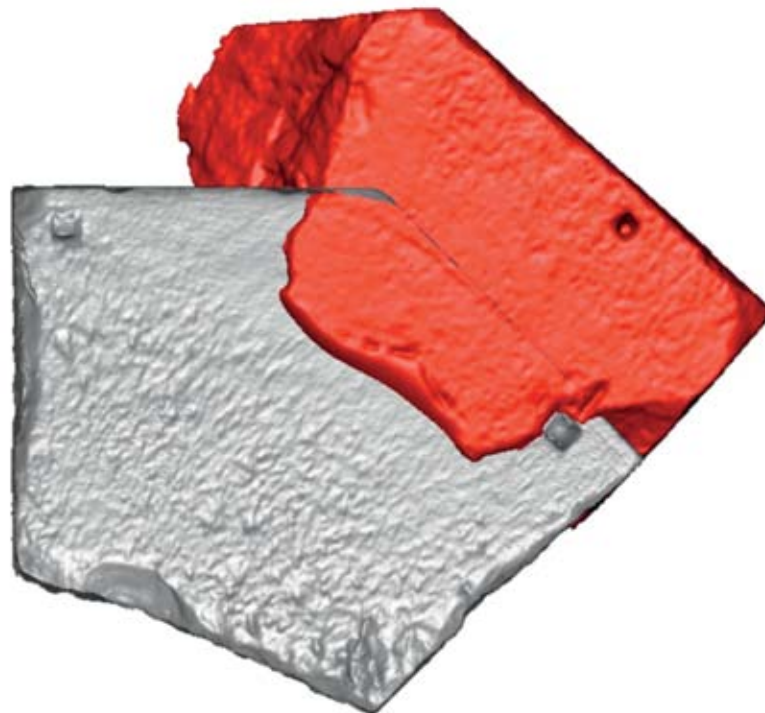


Abb. 14a: Darstellen von Durchdringungen und von zueinanderpassenden Dübellöchern

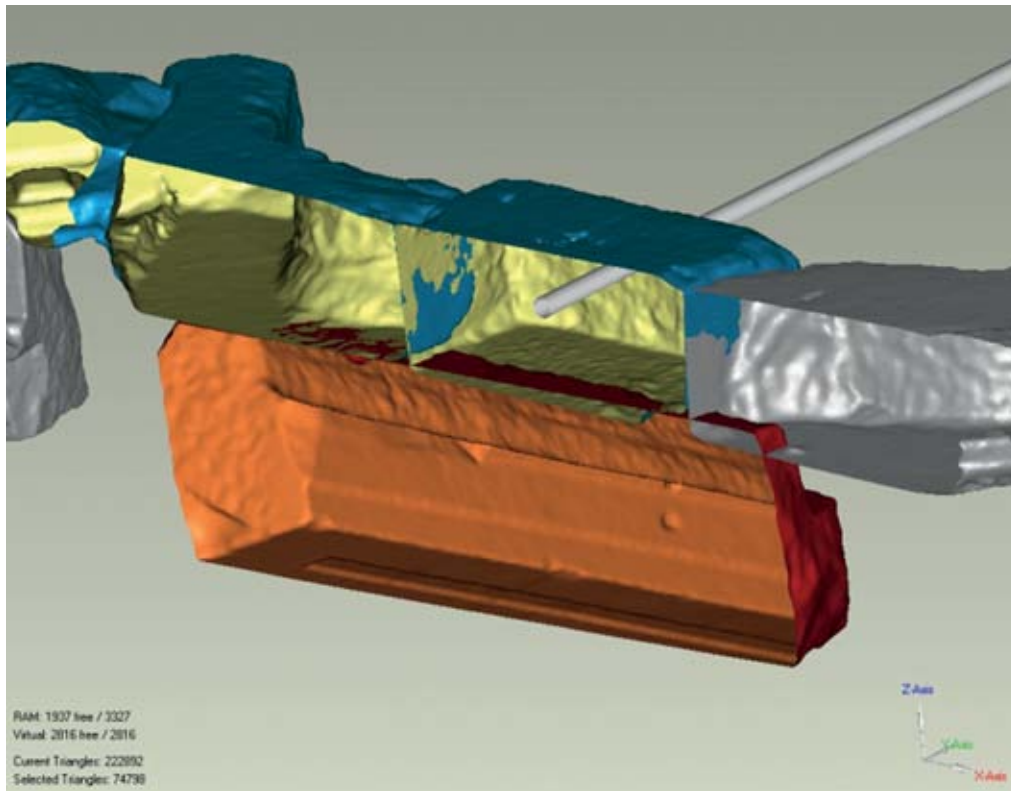


Abb. 14b: Darstellen von Durchdringungen und von zueinanderpassenden Dübellöchern

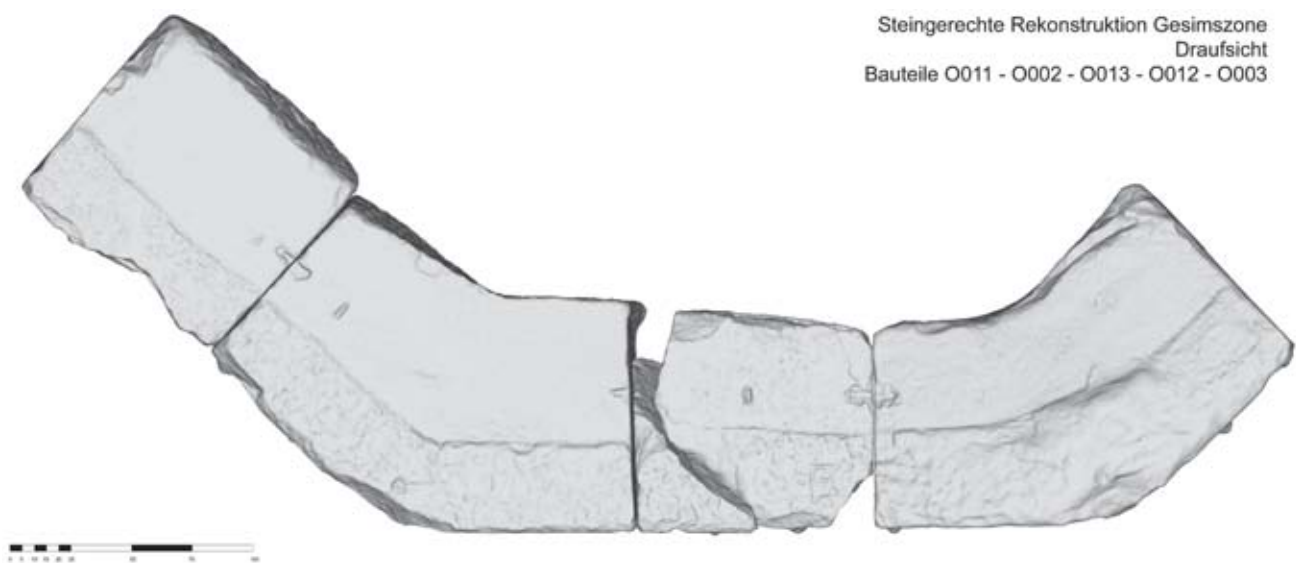


Abb. 15: Teil eines Schichtplanes für die Gesimszone

