

DAS DANEWERK – NORDEUROPAS GRÖSSTES BODENDENKMAL IM FOKUS NEUER UNTERSUCHUNGEN

Martin Segschneider ^a, Astrid Tummuscheit ^a, Thomas P Kersten ^b

^a Archäologisches Landesamt Schleswig-Holstein, Brockdorff-Rantzau Str. 70, 24837 Schleswig –
[Martin.Segschneider, Astrid.Tummuscheit]@alsh.landsh.de

^b HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning, Überseeallee 16, 20457 Hamburg –
Thomas.Kersten@hcu-hamburg.de

KEY WORDS: 3D-Laserscanning, 3D-Modell, Archäologie, Ausgrabung, Quadrokopter, Virtuelle Tour, Wikingerzeit

KURZZUSAMMENFASSUNG:

Das Danewerk war über Jahrhunderte die südliche Grenzbefestigung des dänischen Reiches. Es bestand aus Wällen, Gräben und Mauern und riegelte den Weg von Süden nach Norden über die jütische Halbinsel ab. Im Laufe seiner Geschichte wurde das Danewerk mehrmals ausgebaut und erweitert. Ein besonders aufwendiger Ausbau erfolgte im 8. Jh. n. Chr. in Form einer Feldsteinmauer im Hauptwall. Diese aus geschätzt etwa 20 Millionen Feldsteinen bestehende Mauer war etwa 3 m hoch, ebenso breit und wahrscheinlich über 5 km lang. Im späten 12. Jh. erfolgte schließlich der letzte mittelalterliche Ausbau im Hauptwall des Danewerks. König Waldemar der Große veranlasste die Errichtung einer Ziegelmauer, die ursprünglich mehr als 5 m hoch und nahezu 5 km lang war. Ausgrabungen durch das Archäologische Landesamt Schleswig-Holstein (ALSH) in den Jahren 2010 und 2011 führten zur Entdeckung eines Tores durch die Feldsteinmauer. Auch das östliche Ende der Waldemarsmauer konnte nachgewiesen werden. Die Ziegelmauer beginnt wenige Meter westlich des Tores und erstreckt sich von dort etwa 5 km nach Westen. Mittels 3D-Laserscanning wurde das Steinwerk erstmals im November 2010 dokumentiert. 2013 konnten die Ausgrabungen durch das ALSH gemeinsam mit dem dänischen Museum Sønderjylland Arkæologi Haderslev fortgesetzt werden. Die bis zu 5 m hohen Profile und Steinbauten erfordern besondere Dokumentationstechniken. Im November 2013 wurde eine weitere Dokumentation der Ausgrabung durch 3D-Laserscanning, Panoramafotographie und durch Luftbilder von einem Quadrokopter vorgenommen. Als Ergebnisse wurden 3D-Modelle aus Laserscanning-Daten und aus Luftbildern, Orthophotos aus den Scandaten und eine virtuelle Tour aus den Panoramen zur Dokumentation des ausgegrabenen Danewerk-Tores erstellt.

1. EINLEITUNG

Zunehmend werden auf anspruchsvollen archäologischen Ausgrabungen dreidimensionale Dokumentationstechniken unterstützend eingesetzt (Lindstaedt et al., 2007; Remondino et al., 2008; Kersten et al., 2009a; Kersten et al., 2009b). Die Ausgrabung eines wikingerzeitlichen Tores im Danewerk bei Schleswig, die in den letzten Jahren durch das Archäologische Landesamt Schleswig-Holstein in Kooperation mit dem Museum Sønderjylland, Arkeologi Haderslev, durchgeführt wurde, hat so zu interessanten neuen Ergebnissen geführt, nicht zuletzt durch die Beteiligung des Labors für Photogrammetrie & Laserscanning der HafenCity Universität Hamburg bei der 3D-Dokumentation. Durch den Einsatz eines Quadrokopters vom Museum Arkeologi Vestjylland konnten zusätzlich wichtige Informationen zur Dokumentation der Ausgrabung gewonnen werden. Untersuchungsgegenstand, durchgeführte Arbeiten und erste Ergebnisse werden in diesem Beitrag vorgestellt. Die Visualisierung einer komplexen Grabungssituation durch 3D-Laserscanning und die Auswertung von Quadrokopteraufnahmen durch Structure from motion-Software werden ebenso beschrieben.

2. DAS DANEWERK

2.1 Eine kurze Geschichte des Danewerks

Die erste schriftliche Erwähnung des Danewerks stammt aus dem Jahr 808 n. Chr. Das heutige Schleswig-Holstein glich zu dieser Zeit einem „Vielvölkerstaat“ (Jankuhn, 1957;

Maixner, 2012). Im Land wurden mindestens vier verschiedene Sprachen gesprochen: im Süden und Südwesten des Landes, zwischen Elbe und Eider lebten die nordelbischen Sachsen, deren Siedlungsgebiet im Norden, markiert durch den Verlauf der Eider und eben des Danewerks an das der Dänen angrenzte – unmittelbar an dieser Grenze lag der Handelsplatz Haithabu. Im Osten des Landes verlief zwischen Kiel und der Elbe die Grenzzone zum Siedlungsgebiet der slawischen Obodriten – der so genannte *limes saxoniarum*. Ganz im Nordwesten Schleswig-Holsteins, auf Eiderstedt und auf den Inseln lebten außerdem Friesen. Das Danewerk dieser Zeit diente vor allem der Verteidigung der dänischen Grenze gegen die Sachsen im Süden, aber auch gegen die Franken, die unter Karl dem Großen versuchten, ihren Einfluss auch über die Elbe hinaus nach Norden auszudehnen.

Während das Danewerk in den historischen Quellen erstmals am Anfang des 9. Jahrhunderts erscheint, zeigen archäologische Forschungen jedoch sicher, dass die Geschichte des Bauwerks deutlich weiter zurück reicht (Jankuhn, 1937; Andersen, 1998; Andersen, 2004; Kühl & Hardt, 1999). Das Danewerk weißt dabei eine sehr lange, komplizierte und vielfach auch bis heute ungeklärte Baugeschichte auf, wobei ältere Bauphasen immer wieder überbaut und verändert wurden. Reste der älteren Phasen des Bauwerks sind deshalb zumeist als überbaute Kerne in den heute noch vorhandenen Wällen erhalten - nicht aber als eigenständige im Gelände noch sichtbare Denkmäler.

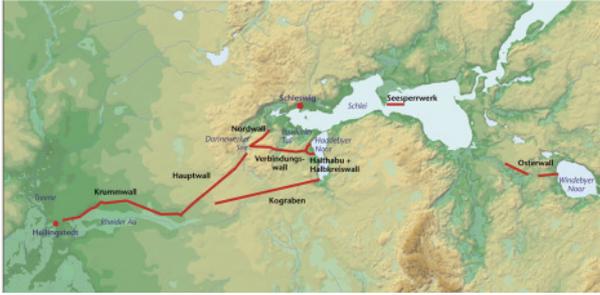


Abbildung 1. Verlauf des Danewerks südlich von Schleswig. Von der Schlei im Osten bis zur Niederung der Treene im Westen.

Die archäologische Erforschung des Danewerks reicht bis in das 19. Jahrhundert zurück. Aus vielen Einzelergebnissen, die seither durch verschiedene Untersuchungen und Ausgrabungen punktuell gewonnen werden konnten, ist es möglich, sich ein ungefähres Bild vom Aussehen und der Entwicklung des frühen Danewerks zu machen. Reste des ältesten Bauwerks finden sich an mehreren Stellen im Innern des so genannten Hauptwalls, der von Südwesten nach Nordosten verlaufend, den Bereich zwischen den Niederungen der Rheiderei Au und dem Danneberger See abriegelte (Abb. 1). Klug wurden dabei die speziellen topographischen Gegebenheiten der Landschaft ausgenutzt, denn durch die von Osten tief in das Land einschneidende Ostseeförde Schlei und die von Westen kommenden sumpfigen Niederungen der Flüsse Eider und Treene bzw. der kleineren Rheiderei Au war die nord-südliche Durchquerung der jütischen Halbinsel nur in diesem wenige Kilometer breiten Korridor möglich - der so genannten „Schleswiger Landenge“. Wahrscheinlich um eine Umgehung dieser Verteidigungslinie zu verhindern, errichtete man nach Westen an den Hauptwall anschließend den so genannten „Krummwall“, der dem Nordrand der Niederung der Rheiderei Au folgte und dadurch die Verteidigungslinie bis nach Hollingstedt fortsetzte.

Anfangs bestand das Bauwerk aus einem vergleichsweise niedrigen Erdwall mit einem unmittelbar südlich vorgelagerten Graben. Dieser wurde in der Folge mehrfach ausgebaut. Dabei kam es im 8. Jahrhundert durch die Errichtung der so genannten Feldsteinmauer zur Verstärkung des Danewerks in einem bis dahin nicht gekannten Ausmaß. Die aus geschätzt etwa 20 Millionen Feldsteinen bestehende Mauer war ursprünglich etwa 3 m hoch, ebenso breit und mindestens 3 km, wahrscheinlich aber etwas mehr als 5 km lang. Sie war aus zwei senkrechten Schalen aufgebaut, zwischen denen die Feldsteine eher ungeordnet eingefüllt worden sind. Verbunden wurden die Steine durch Mörtel aus plastischem Lehm. In der Vorder- und Rückfront der Mauer fanden sich immer wieder Bänder aus schräg stehenden plattigen Steinen, das so genannte „opus spicatum“ oder Fischgrätverband, der weniger aus ästhetischen Gründen, als vielmehr wegen einer verbesserten Stabilität der Konstruktion Verwendung fand.

Obwohl die fränkischen Reichsannalen am Anfang des 9. Jahrhunderts von einem weiteren Ausbau berichten - dem so genannten „Göttrikswall“ - ist dieser archäologisch bisher nicht in Erscheinung getreten. Erst im 10. Jahrhundert sind wieder Aktivitäten feststellbar. Haithabu, das wahrscheinlich um die Mitte des 8. Jahrhunderts als einfacher Handelsplatz begonnen hatte, war bis zu dieser Zeit zu einem stadähnlichen Gemeinwesen angewachsen. Spätestens in den 60er Jahren des 10. Jahrhunderts und

damit in der Regierungszeit des dänischen Königs Harald Blauzahn wurde Haithabu, das vorher streng genommen südlich der Grenze gelegen hatte, vom Halbkreiswall umschlossen und durch den Verbindungswall an das schon bestehende System angebunden.

Ebenfalls in der Regierungszeit Harald Blauzahns gegen Ende des 10. Jahrhunderts wurde durch den im Süden vorgelagerten schnurgeraden Kograbben die Verteidigungslinie insgesamt deutlich verkürzt. Der Kograbben bestand aus einem etwa 2 m hohen Wall mit einer hölzernen Palisade und einem etwa 3 m tiefen vorgelagerten Spitzgraben. Aufgrund seiner Bauweise und der Datierung in die Zeit um 980 gehört der Kograbben wohl in dasselbe Bauprogramm wie die gleichzeitigen Ringwallburgen in Dänemark und muss deshalb als Ergebnis eines genau geplanten reichsweiten Verteidigungskonzeptes unter dem König Harald Blauzahn angesehen werden.

Im späten 12. Jahrhundert erfolgte schließlich der letzte mittelalterliche Ausbau im Hauptwall des Danewerks. König Waldemar der Große veranlasste die Errichtung einer Ziegelmauer, die ursprünglich mehr als 5 m hoch und nahezu 5 km lang war. In ihrer Zeit stellte diese Mauer das erste und einzige Ziegelbauwerk in der Region dar. Ähnlich wie bei der Feldsteinmauer fast 500 Jahre zuvor, ließ hier ein dänischer Herrscher ein gewaltiges Bauwerk in einer Technologie errichten, die die Welt des Nordens bis dahin nicht gesehen hatte.

Im Verlauf der weiteren Geschichte verlor die Grenzbefestigung zunehmend an Bedeutung und verfiel. Zu einer Reaktivierung kam es erst während der deutsch-dänischen Kriege im 19. Jahrhundert und zuletzt während des 2. Weltkrieges.

2.2 Aktuelle Ausgrabungen am Danewerk

Bis vor wenigen Jahren stand in der Gemeinde Dannewerk (Kr. Schleswig-Flensburg) nur wenige Kilometer südwestlich von Schleswig, das Café Truberg, ein traditionsreiches Ausflugslokal. Unmittelbar am Hauptwall des Danewerks gelegen, hatte sich dieses Anwesen über einen Zeitraum von annähernd 140 Jahren entwickelt. Die verschiedenen Gebäude waren immer wieder direkt in den historischen Wall hineingebaut worden und hatten das Denkmal und dessen südliches Vorfeld nicht nur verschandelt, sondern auch massiv beschädigt. Nach Aufgabe des Cafés war es möglich, das Anwesen aufzukaufen und anschließend abreißen zu lassen, so dass der Weg für eine archäologische Untersuchung am Hauptwall des Danewerks frei war.

Bei Untersuchungen in den Jahren 2010 und 2011, bei denen u.a. die von Erde bedeckte, teilweise noch mehrere Meter hohe Ruine der Feldsteinmauer des 8. Jahrhunderts n. Chr. freigelegt wurde, kam auch eine größere, gebaute Unterbrechung in der Mauer zutage - die Stelle an der sich einmal das einzige Tor in dem Verteidigungswall befunden hatte (Abb. 2). Gleichzeitig wurden ein durch das Tor führender Weg und im Süden vorgelagerte Grabenwerke gefunden. Die Untersuchungen ergaben, dass Tor und Weg sicher über einen langen Zeitraum, d.h. mehrere hundert Jahre genutzt worden sind. Westlich des Tores wurde außerdem das östliche Ende der Waldemarsmauer entdeckt. Es ist anzunehmen, dass das alte Tor mit dem Bau der Waldemarsmauer gegen Ende des 12. Jahrhunderts verschlossen wurde, (Tummscheit, 2011; Tummscheit 2012) während die neue Ziegelmauer eine eigene, weiter westlich gelegene Durchfahrt erhielt.



Abbildung 2. Die Toröffnung im Danewerk während der Ausgrabung. Als Verfärbung ist im Zentrum der Weg erkennbar, rechts und links die Steine der Feldsteinmauer.

Im Jahr 2013 konnten die Grabungen in Zusammenarbeit des ALSH mit dem Museum Sønderjylland Arkæologi Haderslev fortgesetzt werden. Dabei wurden u. a. weitere Teile der Feldsteinmauer frei- und ein langer und bis zu 4,5 m hoher Profilschnitt durch die gesamte Wall- und Maueranlage angelegt. Unter anderem gelang es erstmals, die zweitälteste Bauphase des Danewerks, einen aus Heidesoden aufgebauten Wall, mit Hilfe der C14-Methode zu datieren. Dabei zeigte sich, dass dieser Wall im 5./6. Jahrhundert n. Chr. errichtet worden ist. Die ersten (bis jetzt noch undatierten) Anfänge der Verteidigungsanlage sind aber sicher noch älter, vielleicht stammen sie aus dem 4./5. Jahrhundert n. Chr.

Damit reichen die Anfänge des Danewerks und auch die Wurzeln der späteren Südgrenze Dänemarks sehr viel weiter in die Geschichte zurück als bisher angenommen. Nach den neuen Erkenntnissen ist auch bewiesen, dass der Grenzwall, – wenn auch nicht kontinuierlich – mindestens 1500 Jahre lang genutzt wurde. Im Vergleich mit anderen großen linearen Verteidigungsanlagen wie dem römischen Limes, dem dazu gehörigen Hadrianswall (an der Grenze zu Schottland) oder dem angelsächsischen Offas Dyke (an der Grenze zu Wales) weist das Danewerk damit eine ungleich längere Bau- und Nutzungsgeschichte auf.

3. 3D-DOKUMENTATION DURCH TERRESTRISCHES LASERSCANNING UND PANORAMAFOTOGRAPHIE

3.1 3D-Laserscanning

Im letzten Jahrzehnt haben sich terrestrische Laserscanner als typische 3D-Aufnahmetechnologie für die Dokumentation archäologischer Grabungen etabliert. Der Arbeitsablauf beim terrestrischen Laserscanning ist in Kersten et al. (2008) beschrieben. Den Einsatz von terrestrischem Laserscanning zur Dokumentation und Erforschung von Wallanlagen findet man z.B. bei Hönniger & Kersten (2005) und Lindstaedt et al. (2015). Die erste Aufnahme der Grabung am Danewerk zur Dokumentation des aktuellen Grabungszustandes wurde im November 2010 mit einem terrestrischen Laserscanner Leica ScanStation von der Firma Harnack und Partner (Hamburg) durchgeführt. Die Punktwolke wurde an der HafenCity Universität Hamburg mit der Software Geomagic so weit aufbereitet, dass aus der Dreiecksvermaschung ein hochauflösendes Orthophoto (Pixel 1,9

cm) mit Georeferenzierung durch ein TIFF-Worldfile erzeugt wurde (Abb. 3). Das Orthophoto kann direkt in das Geoinformationssystem ArcGIS eingeladen werden.

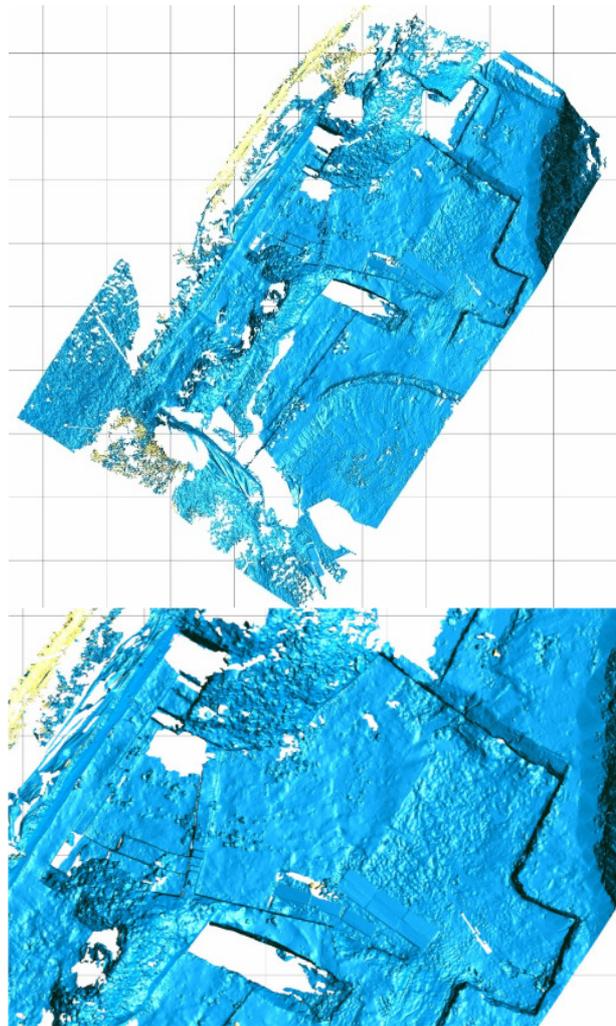


Abbildung 3. Orthogonale Projektion der Scandaten der Grabung Danewerk im Jahr 2010 mit Koordinatengitter – Übersicht (oben) und detaillierter Ausschnitt (unten).

Am 5. November 2013 wurde der aktuelle Zustand des Grabungsabschnittes am Danewerk in Dannewerk durch Studierende des Masterstudienganges Geomatik der HafenCity Universität Hamburg nochmals mit einem terrestrischen Laserscanner IMAGER 5010 in 3D dokumentiert (Abb. 4 unten li). Von insgesamt 17 gut im Objektraum verteilten Scannerstandpunkten (Abb. 5 oben) wurde der Grabungsabschnitt mit der Auflösung HIGH und der Qualitätsstufe NORMAL erfasst, was einer Auflösung von 6 mm auf 10 m Entfernung entspricht. Um die Scans in das für die Grabung verwendete Landeskoordinatensystem zu transformieren, wurden zehn Zieltafeln als Passpunkte um das Objekt verteilt aufgestellt (Abb. 5 unten). Die Zieltafeln wurden mit einer Totalstation Leica TM30 (Abb. 4 oben, Genauigkeit für die reflektorlose Distanzmessung 2 mm + 2 ppm, Winkelmessgenauigkeit Hz/V 0,3-1,5 mgon) über eine freie Stationierung auf vier Standpunkten eingemessen. Die Genauigkeit der verwendeten fünf Festpunkte (Punkte 8001, 8002, 8004, 8805 und 8007 in Abb. 5 unten) wurde mit 5 mm festgelegt und gewichtet, so dass die aus-

geglichenen Passpunktkoordinaten mit einer leicht besseren Genauigkeit von 5 mm in der Ausgleichung mit Leica GeoOffice bestimmt wurden.



Abbildung 4. Totalstation Leica TM30 (oben), Laserscanner IMAGER 5010 (unten li) und Nikon D90 auf dem Nodalpunktadapter (unten rechts)

Nach jedem Scan wurde in einem Nodalpunktadapter auf dem Scannerstandpunkt eine Panoramaaufnahme durchgeführt (Abb. 4 unten re), die später für die Einfärbung jedes Scans und für die Erstellung einer virtuellen Tour verwendet wurde. Der Nodalpunktadapter ist so konstruiert, dass das Projektionszentrum der Kamera mit dem Spiegelzentrum des Scanners übereinstimmt. Für jede Panoramaaufnahme wurden mit einer Nikon D90 (Objektiv Fisheye-Nikkor 10,5 mm) insgesamt zwölf Fotos aufgenommen – alle 60 Grad jeweils ein Foto mit Blickrichtung 45 Grad nach oben und 45 Grad nach unten. Die zwölf Aufnahmen wurden mit der Software PTGui automatisch zu einem vollständigen Panorama zusammengerechnet.

Die 17 Scans wurden mit der Software LaserControl von Zoller + Fröhlich zueinander registriert und im Landeskoordinatensystem georeferenziert. Dafür wurden alle sichtbaren Zieltafeln halbautomatisch in den Scans gemessen, so dass zwischen vier und sieben Zieltafeln je Scan für die Registrierung und Georeferenzierung in der Ausgleichung zur Verfügung standen. Als Ergebnis konnten die Scans mit einer durchschnittlichen Abweichung von 6 mm registriert und mit 5 mm georeferenziert werden. Die maximale Abweichung lag für eine Zieltafel bei 27 mm. Dieser Passpunkt hatte sich während des Scannens höchstwahrscheinlich bewegt. Anschließend wurden die Scans mit den jeweiligen errechneten Panoramabildern in LaserControl eingefärbt. Zur Bestimmung der Transformationsparameter zwischen den Panoramafotos und den korrespondierenden Punktwolken wurden jeweils identische Punkte in

beiden Daten manuell gemessen. Die anschließende Einfärbung der Scans wurde automatisch berechnet.

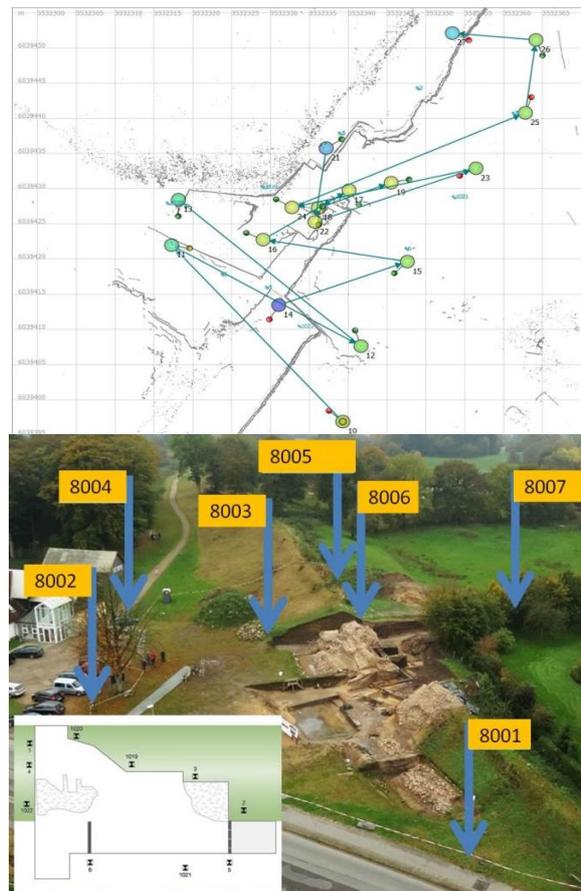


Abbildung 5. Scannerstandpunkte (oben) und Positionen der Festpunkte und Zieltafeln (unten) an der Grabung Danewerk

Durch Filterung der Punktwolken konnte die Datenmenge bereits in LaserControl signifikant reduziert werden. So konnten die Punktdichte auf 1 mm Punktabstand ausgedünnt und viele Fehlmessungen eliminiert werden. Die Punktwolken wurden in LaserControl als ASCII-Daten mit den drei Koordinatenwerten XYZ und Farbwerten RGB exportiert, so dass insgesamt 22 Mio. Punkte (Dateigröße ca. 2 GB) für die weitere Verarbeitung in Geomagic zur Verfügung standen. In Geomagic erfolgte nicht nur eine manuelle Bereinigung der Daten von Vegetation und Stativen, sondern auch eine weitere automatische Filterung zur Reduktion des Messrauschens, bevor die Punkte durch eine 3D-Triangulation zu einer Dreiecksvermaschung zusammengerechnet wurden. Löcher, die durch Abschattung und Wasserpfützen bei der Aufnahme entstanden, wurden größtenteils krümmungsbasiert gefüllt, so dass weitestgehend eine geschlossene Oberfläche für das digitale 3D-Modell des aufgenommenen Grabungsabschnittes vorlag. Das digitale farbige Oberflächenmodell wurde in Geomagic orthogonal mit einem Gitter in einem Rasterabstand von 5 m im Hintergrund projiziert und anschließend als hochauflösendes Rasterfile im Format TIFF und JPEG abgespeichert. Dazu wurde ein TIFF-Worldfile als ASCII-File generiert, das den geographischen Bezug (Koordinaten XY der linken oberen Ecke) und die Auflösung von 2,1 cm (Pixelgröße) beschreibt. Das farbige Orthophoto des Grabungszustandes vom Danewerk am 5. November 2013 ist

in Abb. 6 (Mitte) dargestellt. Zusätzlich wurde das farbige 3D-Modell von der Grabung am Danewerk mit einer reduzierten Auflösung von 10 Mio. (197 MB) und 4 Mio. (78 MB) Punkten im Stanford Polygon Fileformat PLY für eine interaktive Visualisierung exportiert. Dazu wurden in Geomagic

die Polygone krümmungsbasiert dezimiert. Abb. 6 oben links und unten rechts zeigt zwei Schrägansichten des texturierten 3D-Modells der Grabung im November 2013.

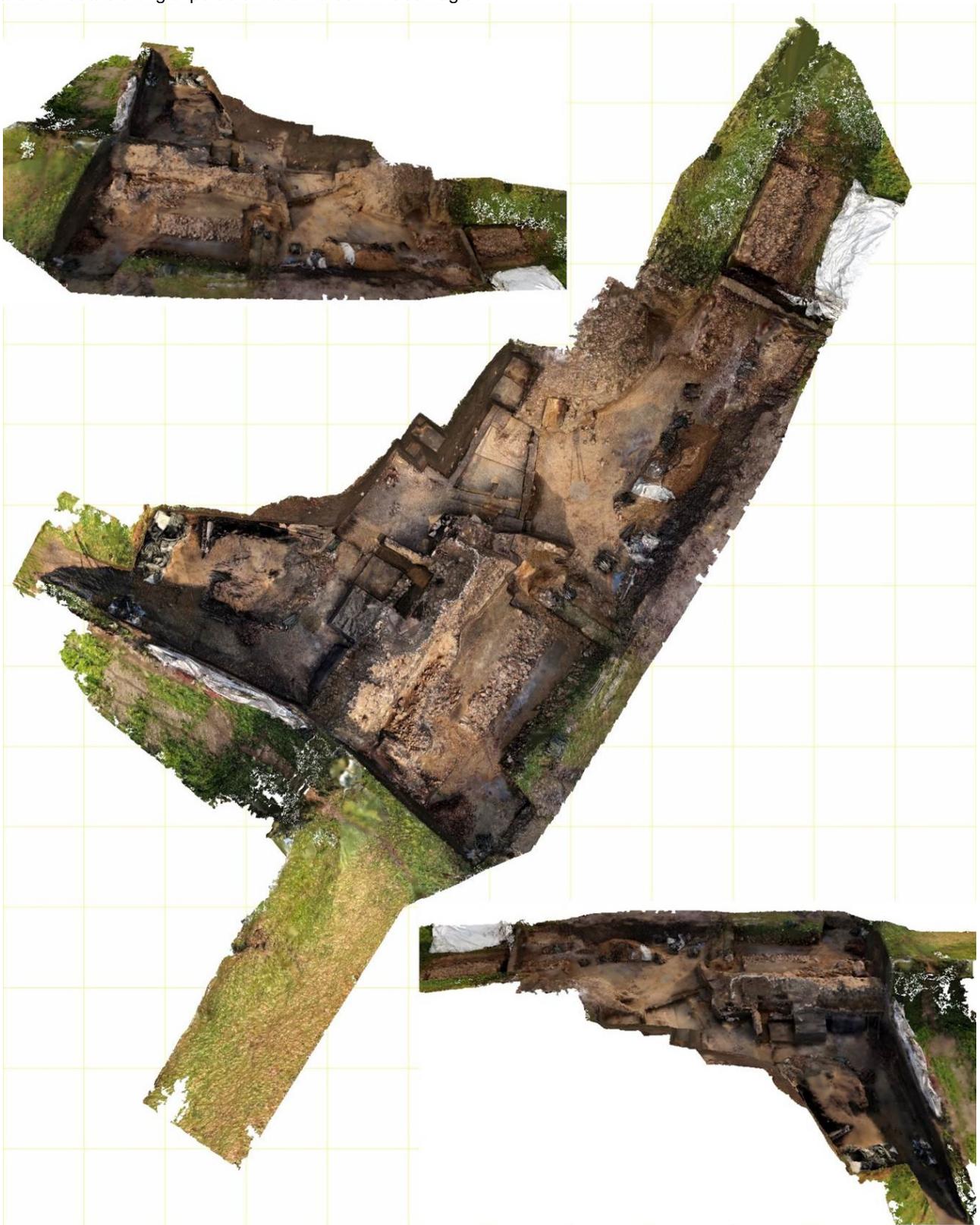


Abbildung 6. Farbiges Orthophoto der aus terrestrischen Laserscanning-Daten dokumentierten Grabung am Danewerk mit einem 5m-Raster im Hintergrund (Mitte) und zwei Schrägansichten des 3D-Modells (links oben und rechts unten).

3.2 Virtuelle Tour

Für die Erstellung der virtuellen Tour wurden 17 Panoramabilder aus PTGui in maximaler Auflösung (ca. 11700 x 5800 Pixel, 66 MB) exportiert. In einem ersten Schritt werden die Panoramabilder von einer Zylinderabwicklung in eine Würfelform (je Würfelseite ein Bildfile) automatisch umgerechnet. Dadurch wird die Bilddatenmenge auf ca. 6 MB je Panoramabild reduziert. Der interaktive Rundgang umfasst 17 Panoramen (alle 360° x 180°) und zeigt von jedem Standpunkt ein voll-sphärisches Panorama, das dem Betrachter eine 360° Rundumsicht ähnlich wie bei Google Streetview bietet. Die virtuelle Tour von der Grabung am Danewerk kann der Anwender in seinem Internetbrowser

anschauen, in dem eine HTML-Seite unter folgender Adresse aufgerufen wird (Stand Juni 2014): <http://tls-hamburg.de/vt/danewerk/Index.html>. Der Betrachter sieht zuerst in seinem Internetbrowser eine Übersicht mit dem Projektgebiet (Abb. 7 oben), die er nach Mausklick in die virtuelle Tour verlassen kann. Danach erscheint ein Teilausschnitt der Szene am Bildschirm (Abb. 7 unten), der mithilfe der Maus um 360° gedreht und hinein- und herausgezoomt werden kann. In einer Übersichtskarte – hierfür wurde ein Luftbild verwendet – sind alle verfügbaren Standpunkte eingezeichnet, die man mit der Maus anklicken kann, um den Standpunkt zu wechseln und um sich dann durch diesen Standpunkt zu navigieren.



Abbildung 7. Benutzeroberfläche der virtuellen Tour von der archäologischen Grabung im Jahr 2013 am Danewerk (oben: Einstiegsfenster, unten: Panorama mit Übersichtskarte für die individuelle Navigation).

Ein Radar in der Übersichtskarte (in der Benutzeroberfläche rechts unten) zeigt die aktuell gewählte Aufnahmerichtung an und ein Kompass mit Nordpfeil (in der Benutzeroberfläche rechts oben) liefert die wichtige Orientierung für den Betrachter. Zusätzlich können zukünftig noch Hotspots z.B. als Verlinkung der Standpunkte untereinander, Fotos von z.B. Fundstücken oder Detailaufnahmen, Texte als Erklärungen oder Beschreibungen, Musik, Videos und andere Anwenderaktionen über eine XML-basierte Programmiersprache integriert werden.

4. 3D-MODELL AUS QUADROKOPTERAUFNAHMEN

Bei der Erstellung einer Reihe aussagekräftiger Luftbilder aus verschiedenen Perspektiven und Höhen wurde das Grabungsteam dankenswerterweise von Esben Schlosser Mauritsen vom Museum Arkeologi Vestjylland unterstützt. Am 16. Oktober 2013 konnte die Fotodokumentation mittels seines Quadropters erfolgreich durchgeführt werden. Bei dem ferngesteuerten Fluggerät (UAV – Unmanned Aerial Vehicle) handelt es sich um ein relativ kleines und einfaches Gerät der Marke DJI, dessen Propeller und Kamera-Aufhängung manuell optimiert wurden, um verwickelungsfreie Aufnahmen aus der Luft zu erzielen (Abb. 8). Die mitgeführte leichte Kompaktkamera Canon PowerShot S100 verfügte über einen kleinen Sensor mit 1600 × 1200 Pixeln, so dass trotz des Gesamtgewichtes von unter einem Kilogramm ausreichend scharfe und ansprechende Bilder entstanden. Die Kamera konnte dabei je nach Arretierung für Senkrecht-, Schräg- und Seitenansichten genutzt werden, wobei sie jeweils alle zwei Sekunden automatisch ausgelöst wurde. Von den 741 so entstandenen Luftbildern aus unterschiedlichen Aufnahmepositionen wurden anschließend für die Erstellung eines 3D-Modells durch Dense Image Matching mittels der Software Agisoft PhotoScan 249 Fotos genutzt (Abb. 9).



Abbildung 8. Luftbildschrägaufnahme von Osten auf den Torbereich mit den anschließenden Erdwällen als Übersicht der Grabung Danewerk © Quadropters-Foto E. Schlosser Mauritsen 2013) und verwendeter Quadropters der Marke DJI mit Kompaktkamera (© Foto A. Tummuscheit 2013).



Abbildung 9. Mit Agisoft PhotoScan erstelltes 3D-Modell der Torgrabung im Danewerk. Grundlage UAV-Luftbilder von E. Schlosser Mauritsen 2013, Bearbeitung HCU Hamburg 2014.

5. FAZIT UND AUSBLICK

Eine für Norddeutschland außergewöhnliche archäologische Ausgrabung – sowohl im Hinblick auf ihre wissenschaftliche Bedeutung als auch auf ihre Dreidimensionalität – stellte unter anderem durch das Vorhandensein großer Steinbauten besondere Anforderungen an die wissenschaftliche Dokumentation, die mittels der vorgestellten Methoden innovativ gelöst werden konnten. Zwar ist die konventionelle Dokumentation durch Tachymeter-Einmessungen, maßstabgetreue Zeichnungen und Einzelfotos weiterhin unverzichtbar, doch erst die genannten plastischen und übergreifenden Darstellungen können Zusammenhänge aufzeigen, insbesondere durch Vergleich von Vorder- und Rückseite von Wällen und Mauern sowie auch der oft zusammengehörigen Installationen im Bereich der östlichen und westlichen Torwänge. Mit der Ausgrabung und der hier vorgestellten Dokumentation lässt sich das Vorhandensein eines aufwändig gestalteten, wikingerzeitlichen Tores klar belegen. Wichtig war weiterhin die Feststellung des Alters der frühesten Bauphasen, die nun als vorwikingerzeitlich einzustufen sind. Auch die komplexe Stratigraphie aus verfüllten Gräben, Wällen, Mauern, Pfosten beiderseits der frühmittelalterlichen Torgasse ließ sich entschlüsseln und einzelnen Bauphasen zuordnen. Über die aufgewendeten finanziellen Mittel kann durch die 3D-Darstellungen wirkungsvoll Rechenschaft abgelegt und die Akquise weiterer Mittel kann gefördert werden. Des Weiteren ist die Nutzung der Dokumentation zur Visualisierung durch 3D-Modelle besonders geeignet, die komplizierte Grabungssituation, zum Beispiel online, oder in einem musealen Rahmen, anschaulich zu vermitteln. So werden nicht nur Ausprägung und der Erhaltungszustand der Mauern und Wälle erkennbar, sondern zum Beispiel auch Form und Lage der mittelalterlichen „Steinraubgruben“. Allgemein ist zu erwarten, dass bei Ausgrabungen von größeren Denkmalbereichen mit erhaltenen Steinbauten die vorgestellten Techniken und Methoden zukünftig verstärkt genutzt werden.

6. LITERATUR

Andersen, H. H., 1998. Danevirke og Kovirke. Arkæologiske undersøgelser 1861-1993.

Andersen, H. H., 2004. Til hele rigets værn. Danevirkes arkæologi og historie.

Hönniger, C. & Kersten, Th., 2005. Einsatz des 3D-Laserscanning-Systems Mensi GS100 - Topografische Aufnahme der sächsischen Ringwallanlage Willenscharen. *Der Vermessungsingenieur - Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, Wiesbaden, 55. Jahrgang, Heft 3, 204-207.

Jankuhn, H., 1937. *Die Wehranlagen der Wikingerzeit zwischen Schlei und Treene*. Offa-Bücher 1.

Jankuhn, H., 1957. *Geschichte Schleswig-Holsteins*. 3. Band. Die Frühgeschichte. Vom Ausgang der Völkerwanderung bis zum Ende der Wikingerzeit.

Kersten, Th., Sternberg, H., Mechelke, K. Lindstaedt, M., 2008. Datenfluss im terrestrischen Laserscanning - Von der Datenerfassung bis zur Visualisierung. *Terrestrisches Laserscanning (TLS2008)*, Schriftenreihe des DVW, Band 54, Beiträge zum 79. DVW-Seminar am 6. und 7. November 2008 in Fulda, Wißner-Verlag, Augsburg, 31-56.

Kersten, Th., Lindstaedt, M., Vogt, B., 2009a. Preserve the Past for the Future - Terrestrial Laser Scanning for the Documentation and Deformation Analysis of Easter Island's Moai. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 2009 (1): 79-90.

Kersten, Th., Lindstaedt, M., Mechelke, K., Vogt, B., 2009b. Terrestrisches Laserscanning zur Dokumentation der Moai auf der Osterinsel. *Denkmäler3.de - Industriearchäologie*, Heinz-Jürgen Przybilla & Antje Grünkemeier (Hrsg.), Shaker Verlag GmbH, Aachen.

Kühl, J., Hardt, N., 1999. Danevirke. Nordens störste for-tidsminde.

Lindstaedt, M., Kersten, Th., Sauerbier, M., Peterhans, J., Fux, P., 2007. Terrestrisches Laserscanning und digitale Photogrammetrie zur archäologischen Dokumentation der Petroglyphen von Chichictara in Peru. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007*, Th. Luhmann/C. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 328-337.

Lindstaedt, M., Kersten, Th. & Nösler, D. 2015. Von historischen Luftbildern der Royal Air Force bis zum 3D-Laserscanning – Die Erforschung einer vorgeschichtlichen Wallanlage bei Oersdorf im Landkreis Stade. *Denkmäler3.de 2013 - Von low-cost bis high-tech: 3D-Dokumentation in Archäologie & Denkmalpflege*, LWL Industriemuseum Zeche Zollern Dortmund, 16.-18. Oktober 2013, 25-29.

Maixner, B., 2010. Haithabu. Fernhandelszentrum zwischen den Welten. Begleitband zur Ausstellung im Wikinger Museum Haithabu.

Remondino, F., El-Hakim, S.F., Gruen, A. & Zhang, L., 2008: Turning images into 3-D models. – *IEEE Signal Processing Magazine* 25(4): 55-65.

Tummuscheit, A., 2011. Das neu entdeckte Tor im Dane-werk – Einer der geschichtsträchtigen Orte Schleswig-Holsteins. *Archäologische Nachrichten aus Schleswig-Holstein* 17, 84-87.

Tummuscheit, A., 2012. Das Tor im Danewerk bei Rot-henkrug – Ausgrabungen 2010 und 2011. *Mitteilungen der Gesellschaft für schleswig-holsteinische Geschichte* 83, 3-15.

7. DANKSAGUNG

Besonderer Dank gilt den Masterstudierenden der Hafen-City Universität Hamburg (Studiengang Geomatik) für die Erfassung, Modellierung und Bereitstellung der Geodaten und der virtuellen Tour vom Danewerk.