

Photogrammetrische Vermessung der „Teufelssteine“

Otto NÄTHER und Matthias STEINFURTH

Kurzzusammenfassung

Im folgenden Projektbericht werden die Vorbereitung, die Durchführung und die Ergebnisbetrachtung der Projektarbeit zur photogrammetrischen Vermessung der „Teufelssteine“ bei Bautzen dargestellt. Dieses Projekt wurde im Rahmen des Moduls „Photogrammetrie - Aktuelle Verfahren“ der HTW in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Archäologie Sachsen (<https://www.lfa.sachsen.de/>) durchgeführt.

Dabei wurde der Einsatz von terrestrischem Laserscanning, mobilen Laserscanning und Positionsbestimmung mittels GNSS-Empfänger im Außenbereich so kombiniert, dass im Rahmen der Datenverarbeitung mit entsprechender Software eine georeferenzierte 3D-Punktwolke und ein georeferenziertes 3D-Modell für weitere Verarbeitung und Anwendungen erstellt werden konnten.

1 Einleitung

Die Teufelssteine zwischen Pließkowitz und Kleinbautzen stellen ein einzigartiges Naturdenkmal mit kultisch-ritueller Bedeutung dar, das häufig als „Stonehenge der Oberlausitz“ bezeichnet wird. Die besondere Anordnung der Steine und der Fund einer eingeklemmten Querplatte mit schalenförmigen Vertiefungen bieten spannende Ansätze für die wissenschaftliche Untersuchung dieser möglicherweise historischen Kultstätte.

Ziel dieses Projektes ist es, mit modernen Methoden der 3D-Vermessung eine digitale Rekonstruktion der ursprünglichen Anordnung der Steinstrukturen zu realisieren. Dies ermöglicht nicht nur die Überprüfung der Passgenauigkeit der Steinplatten, sondern auch die Einbindung der Objekte in ihr landschaftliches Umfeld sowie eine exakte Georeferenzierung. Solche digitalen Modelle schaffen die Grundlage für weiterführende Analysen, wie die Simulation potenzieller astronomischer Ausrichtungen, die Rückschlüsse auf die Nutzung der Anlage in frühgeschichtlicher Zeit zulassen. Die interdisziplinäre Verbindung von Geodäsie, Archäologie und Astronomie verleiht dem Projekt einen besonderen Reiz und bietet zugleich die Möglichkeit, aktuelle Techniken der 3D-Modellierung und -Analyse praktisch anzuwenden.

2 Aufnahmeobjekt

Der Teufelsstein bei Kleinbautzen, auch als „czerto-kamen“ bekannt, ist ein beeindruckendes Naturdenkmal mit kulturhistorischer Bedeutung. Das markante Felsgebilde besteht aus drei massiven Granitblöcken, die in ihrer Anordnung ein unregelmäßiges Viereck bilden. Auffällig ist die mittig eingekeilte Steinplatte, die auf ihren Seitenflächen beckenartige Vertiefungen aufweist. Weitere charakteristische Merkmale sind eingehauene Symbole wie eine Nadel, eine Schere und ein Fingerhut sowie eine benachbarte Steinplatte mit schüsselförmigen Vertiefungen. Zahlreiche Sagen und Legenden umgeben den Teufelsstein, der in vorchristlicher Zeit vermutlich als heidnische Kultstätte diente. Opferhandlungen, die Aufstellung von Götzenbildern und spätere christliche Eingriffe in die Struktur der Felsgruppe deuten auf die rituelle Bedeutung des Ortes hin. Archäologische Funde in Form von Scherben und Bruchstücken von Urnen bekräftigen die Annahme, dass das Gelände als Begräbnisstätte genutzt wurde.

Die Sagen, die sich um den Teufelsstein ranken, verleihen der Stätte eine mystische Aura. So wird berichtet, dass die kesselartigen Vertiefungen auf den Steinplatten als Blutschüsseln bei heidnischen Opferhandlungen gedient haben sollen. Eine weitere Steinplatte liegt neben den größeren Felsen. Sie scheint eine Aussparung zu haben und könnte somit als Auflage für die Platte mit den Vertiefungen gedient haben, sodass hier früher wohl die Formation eines „Sonnentores“ aufzufinden war. Nach der Einführung des Christentums sollen christliche Priester die Anlage teilweise zerstört, eine Felsenplatte herabgestürzt und Kreuze in die Steine gemeißelt haben, um die heidnischen Kulte zu bannen.

Neben dieser Annahme gibt es einige weitere Sagen, die sich um die „Teufelssteine“ ranken - diese lebendigen Überlieferungen verdeutlichen den hohen symbolischen und kulturellen Stellenwert des Teufelssteins in der regionalen Volkskultur.

(Wikisource, 2023; Herold & Hensel, 2023)

3 Datenakquisition

Die verwendeten Technologien repräsentieren den aktuellen Stand der Laserscanner-Technik und bieten präzise und effiziente Lösungen für die Aufnahme und Verarbeitung räumlicher Daten. Zum Einsatz kamen sowohl ein terrestrischer als auch ein mobiler Laserscanner, unterstützt durch ein Samsung S20 Ultra für ergänzende mobile Aufnahmen. Der Ansatz, zusätzliche Aufnahmen mit einer Spiegelreflexkamera durchzuführen, um mithilfe von Structure-from-Motion (SfM) ein detailliertes Modell zu erzeugen, wurde aufgrund des hohen zusätzlichen Zeitaufwands verworfen. Die erwähnten Aufnahmetechniken gehören zu den modernsten Verfahren zur Erfassung dreidimensionaler Daten und werden auch im Rahmen der Lehre an der HTW Dresden vermittelt. Dies unterstreicht die Relevanz und Aktualität der angewandten Methoden in der wissenschaftlichen und praxisorientierten Ausbildung. Für die Georeferenzierung wurden Punkte mithilfe eines GNSS-Empfängers aufgenommen.

3.1 Verwendete Messgeräte und Instrumente

- FARO Focus Scanner S150
- BLK2GO (+Samsung S20Ultra)
- GNSS Empfänger R12i (Trimble)
- passender Feldcomputer zum GNSS Empfänger
- Stativ 3v (für FARO Focus Scanner) + 3-Fußadapter
- Vermarkungsmaterial (Nägel, für temporäre Vermarkung) + Schachbrettzielmarken (Alu) + Stab

3.2 Messverfahren

Zur Erfassung der Geometrie und der räumlichen Lage des Teufelssteins wurde ein hybrider Ansatz gewählt, der die Vorteile von GNSS-Messung, terrestrischem und mobilem Laserscanning kombinieren sollte. Die eingesetzten Verfahren wurden so ausgewählt, dass sowohl die äußeren als auch die schwer zugänglichen inneren Bereiche der Felsstruktur präzise erfasst werden können.

Georeferenzierung mit GNSS und Passpunktmarken

Um das gesamte Modell georeferenziert darzustellen, werden mehrere Passpunktmarken rund um den Teufelsstein positioniert. Die Erfassung der Passpunkte erfolgt mittels GNSS-Messung. Aufgrund der dichten Vegetation, die den Empfang der Satellitensignale beeinträchtigen kann, wird der Aufnahmezeitpunkt so gewählt, dass eine bestmögliche Satellitenabdeckung gewährleistet werden kann. Dies war im November der Fall, als die Belaubung der angrenzenden Vegetation nicht mehr schmückte. Die Passpunkte dienen als Grundlage für die Einbindung der Punktwolken der Scanner in ein geodätisches Bezugssystem.

Terrestrisches Laserscanning mit FARO-Scanner

Für die flächendeckende Erfassung der äußeren Geometrie des Teufelssteins kommt der terrestrische Laserscanner FARO zum Einsatz. Der Scanner wird rund um die Steinstruktur positioniert, um eine lückenlose Erfassung der sichtbaren Oberflächen sicherzustellen. Die so erzeugten Punktwolken bilden die Grundlage für die 3D-Rekonstruktion der äußeren Struktur.

Ergänzende Aufnahme mit BLK2GO-Scanner

Um schwer zugängliche Bereiche zwischen den Steinen sowie die Hohlräume, die mit dem FARO-Scanner aufgrund der eingeschränkten Positionierungsmöglichkeiten nicht erfasst werden können, zu dokumentieren, wird der mobile Scanner BLK2GO eingesetzt. Dieser Scanner ermöglicht eine flexible Aufnahme, da er während der Bewegung Daten aufzeichnet. So können die Hohlräume zwischen den Steinblöcken sowie die Felsoberseiten, die aufgrund der Höhe des Objekts mit dem FARO-Scanner nicht erfasst werden können, präzise dokumentiert werden.

3.3 Durchführung

Planung und Vorbereitung

Bereits im Vorfeld wurden im Innendienst die Aufnahmekonfigurationen für den FARO-Scanner festgelegt. Diese Konfigurationen umfassten die optimalen Scanparameter zur Gewährleistung einer hohen Punktdichte sowie einer genügenden Abdeckung der relevanten Bereiche des Steinhaufens. Vor Ort wurden vor Beginn der Aufnahmen die Steine mit einem Besen gereinigt, um Fremdmaterialien (Belaubung und Äste) zu entfernen, die die Qualität der Punktwolken beeinträchtigen könnten. Anschließend wurden die Passpunktmarken (Blechtafeln) im Gebiet des Aufnahmeobjektes auf dem Boden platziert und eine auf einem Stativ montierte Passpunktmarke am Fuß des Hügels positioniert.

Festlegung der Scannerstandpunkte

Ziel war es, die Standorte der Scanner so zu wählen, dass eine vollständige Erfassung der sichtbaren Oberflächen der Steine sichergestellt wird. Besondere Aufmerksamkeit galt den Öffnungen zwischen den Steinen, um eine gute Grundlage zur Modellierung im Post-Processing-Prozess zu haben.

Aufnahme mit BLK2GO

Nach Kalibrierung des BLK2GO-Handscanners von einer festen Position am Rand des Untersuchungsgebietes aus wurden vier einzelne Scanläufe durchgeführt. Es wurde je ein Scan für den großen Felskomplex inklusive der Spalten und Hohlräume, ein Scan für den zweiten größeren Felsen, ein Scan für die kleineren verstreuten Felsen und -platten und ein Scan für die Felsoberseiten durchgeführt. Diese Scans wurden separat aufgenommen, um zum einen die Gesamtscanzeit zu verringern und zum anderen je Aufnahmeobjekt ähnliche Bedingungen bezüglich des Abstandes zwischen Scanner und Objekt zu gewährleisten. Die Zeit pro Aufnahme betrug etwa 10 bis 20 Minuten. Diese Aufnahmemethode erlaubte eine detaillierte und flexible Erfassung der Steingeometrien, insbesondere in schwer zugänglichen Bereichen zwischen den Steinen.

GNSS-Aufnahmen der Passpunkte

Parallel zur Aufnahme mit dem BLK2GO wurden die Koordinaten der Passpunkte mit einem GNSS-Empfänger aufgenommen. Hierbei wurde eine doppelte Aufnahme jedes Passpunktes vorgenommen, um eine möglichst hohe Genauigkeit zu gewährleisten. Die Genauigkeit der Koordinaten betrug weniger als 2 cm.

Aufnahme mit FARO-Scanner

Nachdem die mobile Aufnahme mit dem BLK2GO abgeschlossen war, begann die Aufnahme mit dem FARO-Scanner. Hierbei wurden insgesamt 11 Standpunkte nach einem vorher festgelegten Lageplan angefahren. Jeder Standpunkt wurde so gewählt, dass eine möglichst umfassende Abdeckung der Steinoberflächen sichergestellt wurde. Zwischen den einzelnen Standorten wurde eine zeitliche Verzögerung eingelegt, um Interferenzen zu vermeiden und eine konsistente Punktwolke zu erhalten. Nach jedem Scanvorgang wurde überprüft, ob die Punktwolke erfolgreich im Speicher des Scanners abgelegt worden war.

Feldprüfung und Datensicherung

Im Anschluss an die Feldaufnahmen wurde eine Prüfung der aufgenommenen Koordinaten sowie der Höhen auf Plausibilität durchgeführt. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Kontrolle der Höhe des Passpunktes am Fuß des Hügels. Diese Kontrolle ergab, dass die Höhe des am Hügel Fuß befindlichen Passpunktes geringer war, als die anderen Passpunkte direkt am Messobjekt.

Zum Abschluss der Arbeiten wurden alle erstellten Datensätze von den verwendeten Geräten (FARO-Scanner, BLK2GO und GNSS-Empfänger) nach Bedienungsanleitung gesichert und in die geforderten Ausgabeformate für den Innendienst exportiert.



(Abb.1: Vermessung der Teufelssteine)

4 Datenverarbeitung

Für die Verarbeitung der durch die Scans aufgenommenen Daten wurden die Software-Anwendungen “FARO Scene”, “Cyclone Register 360 Plus”, “CloudCompare” und “Agisoft Metashape” genutzt.

Während der Bearbeitung mussten aufgrund von verschiedenen Problemen Schritte zurückgesetzt, anders wiederholt oder hinzugefügt werden. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel zunächst der geplante Ansatz beschrieben, bei dem alle Scanergebnisse zu einer Punktwolke und später zu einem genauen Mesh mit möglichst vielen Punkten zusammengesetzt werden sollten. Da mit diesem Vorgehen nicht das gewünschte Ergebnis erzielt werden konnte, wird anschließend der Workflow dargestellt, welche zum aktuellen Endergebnis geführt hat. Dabei wurden nur die BLK2GO-Scanergebnisse genutzt. Weitere Ausführungen dazu, welche Probleme letztendlich zu dieser Entscheidung geführt haben, werden in Kapitel 5 - Diskussion dargestellt.

4.1 Durchführung Geplanter Ansatz

Datenvorbereitung

Die Verarbeitung der 11 Punktwolken aus den FARO-Scans erfolgte in der Software Faro Scene. Zunächst wurden die Scandaten in das Programm importiert und geladen. Anschließend wurden die Referenzobjekte, in diesem Fall Passpunktmarken, zur weiteren Verarbeitung bestimmt. Die Stationierung der Scans erfolgte in zwei Schritten: zuerst mittels der Cloud-to-Cloud-Methode und anschließend Zielmarkenbasiert unter Einbindung der als CSV-Datei importierten Koordinaten. Um eine präzise Analyse des eigentlichen Untersuchungsobjekts zu gewährleisten, wurde eine umfassende Bereinigung der Scans durchgeführt. Dabei wurden Umgebungspunkte wie Vegetation, Personen und unerwünschtes Gelände entfernt. Abschließend wurde eine dichte Punktwolke generiert und im E57-Format exportiert, die als Grundlage für die nachfolgende Weiterverarbeitung diente.

Die vier Punktwolken aus den BLK2GO-Scans wurden unter Nutzung von “Cyclone Register 360 Plus” mit langen Importzeiten (ca. 20min/Scan) eingeladen und nach grobem zueinander-Ausrichten über die Programmeigenen “Verknüpfungen” im Cloud-to-Cloud Verfahren miteinander registriert. Da die berechneten Statistiken der Auswertung akzeptabel erschienen (Abb. 2) wurde das Ergebnis ebenfalls im E57-Format für die weitere Verarbeitung exportiert.

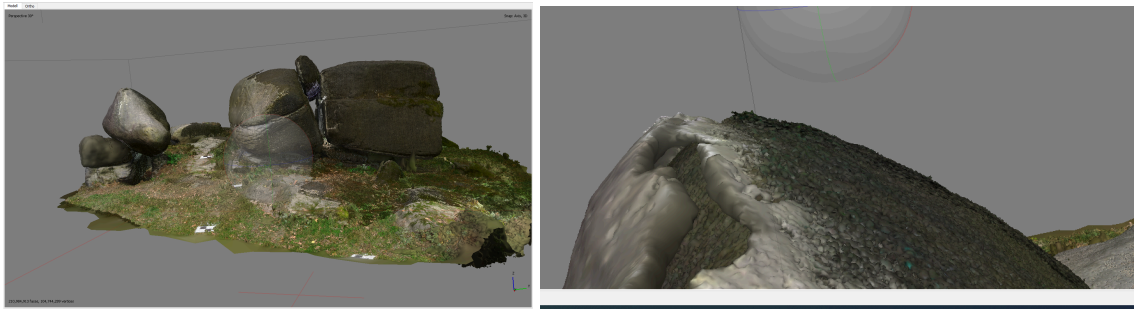


Toleranzbereich:	
Fehler Gruppe	0.011 m ✓
Überlappung	84 % ✓
Stabilität	65 % ✓
Cloud-to-Cloud	0.014 m ✓
Fehler Zielmarke	0.008 m ✓

(Abb.2: Auswertungsstatistik Registrierung BLK2GO-Scans)

Die Verarbeitung der Punktwolken begann mit dem Laden von 12 Datensätzen, bestehend aus 11 FARO-Scans und einem BLK-Scan, in die Software CloudCompare. Um eine kohärente Ausrichtung der Scans zu gewährleisten, wurde das Rotate-Translate-Tool genutzt. Anschließend wurden die einzelnen TLS-Scans (FARO-Scans) zu einer einheitlichen Punktwolke zusammengeführt. Der BLK-Scan wurde separat registriert und im nächsten Schritt mit den TLS-Daten gemerged. Die kombinierte Punktwolke wurde dann in Agisoft Metashape importiert, um daraus ein präzises Mesh zu erzeugen, welches die Grundlage für die weitere Analyse bilden sollte.

Die Qualität des generierten Meshes erwies sich als unzureichend (Abb.4), was anscheinend auf erhebliche Fehler in der Registrierung der Scans zurückzuführen war. Diese Probleme machten eine Überarbeitung des bisherigen Workflows erforderlich, um eine höhere Präzision und verlässliche Ergebnisse sicherzustellen. Der neue Ansatz zielte darauf ab, die Registrierungsprozesse zu optimieren und die Qualität des Meshs zu verbessern.

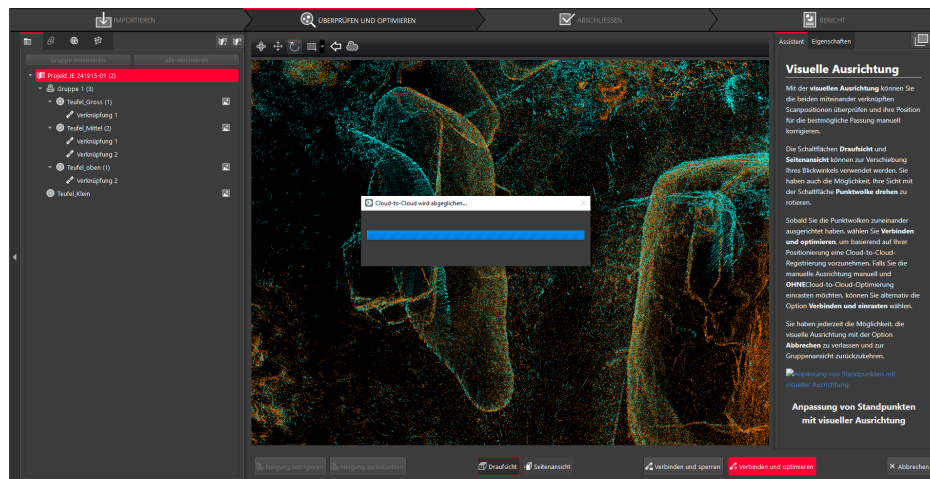


(Abb.3: frühes Mesh-Ergebnis)

4.2 Durchführung Ergebnisworkflow

Aufgrund der Erkenntnisse aus verschiedenen Ansätzen, die in Kapitel 5 diskutiert werden, wurden für das vorliegende Endergebnis (georeferenzierte Punktwolke, vereinfachte georeferenzierte Punktwolke und Mesh aus vereinfachter Punktwolke) nur die Scanergebnisse des BLK2GO-Scans verarbeitet.

Bei näherer Befassung mit den Daten der BLK2GO-Scans wurden starke Verschiebungen (von ca. 50cm) einzelner Parts der Objekte der verknüpften Punktwolke festgestellt (zu erkennen in Abb.4) festgestellt, die wahrscheinlich auf fehlerhafte Trajektorie zurückzuführen ist.



(Abb.4: Trajektorie-Fehler BLK2GO)

Somit wurden die vier einzelnen Scanpunktwolken in “Cyclone Register 360 Plus” vorbereitet, wobei die “doppelt” aufgenommenen Oberflächenpunkte manuell entfernt wurden. Des Weiteren wurden die Scans so bereinigt, dass vorrangig nur die betrachteten Objekte je Scan (großer/ mittlerer/ kleinere Felsen, Felsoberseiten) im jeweiligen Scan enthalten sind, um das stärkere Rauschen an weiter entfernten Oberflächen zu minimieren. Dabei wurde darauf geachtet, die Schachbrettmarken und genügend Überlappung zu den anderen Scans zu erhalten.

Die nun so vorbereiteten Scans wurden erneut zueinander ausgerichtet und über berechnete Verknüpfungen zueinander im Cloud-to-Cloud Verfahren registriert. Die im Anschluss exportierte E57-Punktwolke wurde für die weitere Bearbeitung zunächst nach “Agisoft Metashape” importiert.

In “Agisoft Metashape” wurde die zusammengeführte Punktwolke zunächst grob bereinigt. Dabei wurden störende Scanpunkte entfernt, wie beispielsweise von weit entfernten Objekten, Pflanzen und durch die anwesenden Bearbeiter entstandene Scanpunkte. Da die Streuung der Punkte an den Oberflächen durch die im Gegensatz zum FARO Focus S150 geringeren Genauigkeit des mobilen Scanners recht groß erschien (ca. 2 bis 4 cm), wurden anschließend Maßnahmen ergriffen, diese Streuung zu reduzieren. Dazu fand zunächst eine feinere manuelle Bereinigung der auffälligsten “Ausreißer” statt. Anschließend wurde der “Smooth Point Cloud”-Algorithmus von Agisoft Metashape angewandt, wobei ein Smoothing-Radius von 2cm gewählt wurde. Da die Punktzahl dabei nicht verringert wurde, werden hierbei die Scanpunkte anscheinend entlang statistisch berechneter Oberflächenverläufe “zusammengeschoben”, anstatt gelöscht. Im Ergebnis waren die Oberflächen

klarer und “Ausreißer”-Punkte deutlicher zu erkennen (Abb.5). Daraufhin wurde erneut fein bereinigt, indem diese größtenteils entfernt wurden.



(Abb.5: deutlicher erkennbare “Ausreißer” nach Smoothing-Algorithmus)

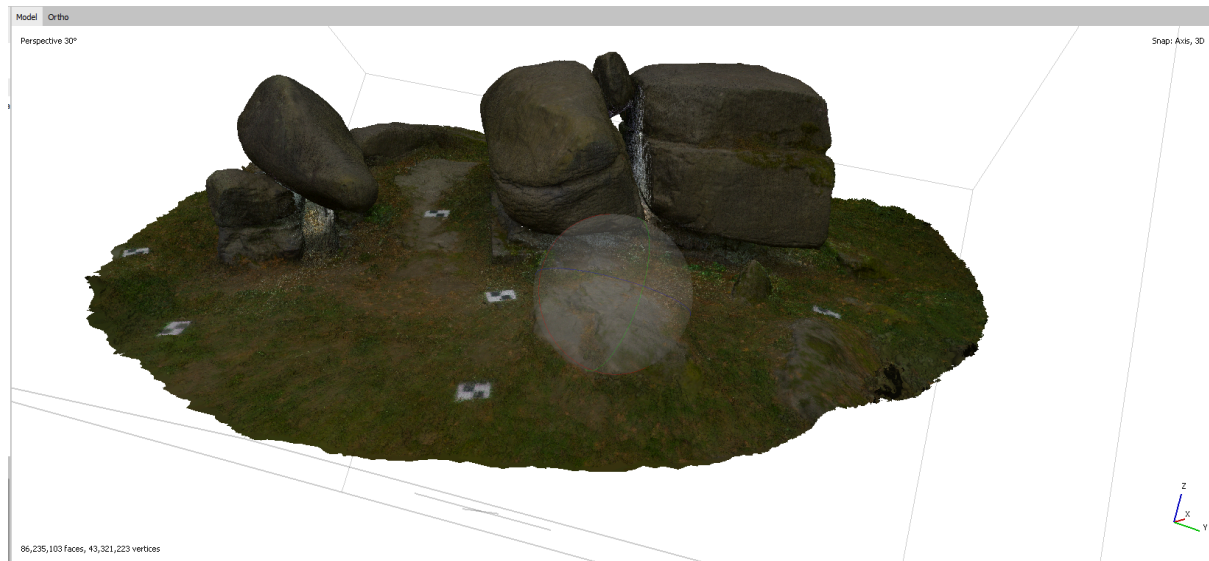
Im nächsten Schritt wurde die bereinigte Scanpunktwolke georeferenziert und danach nach CloudCompare importiert, um dort die Normalenrichtungen der Punkte zu überarbeiten. Falsche Normalenrichtungen der Punkte führen sowohl zu fehlerhafter Oberflächenberechnung im Mesh, als auch ein falsches Anwenden der RGB-Informationen. In der bisherigen Punktvolke waren die Normalen in schwer abgrenzbaren Flächen falsch berechnet, wie in Abb.6 zu erkennen ist.



(Abb.6: Mesh mit falsch berechneten Normalenrichtungen)

Mit einem Algorithmus von CloudCompare (calculate normals) wurden die Normalenrichtungen neu berechnet. Dabei wurde der Modus “Plane” gewählt und auch sonst die Standardeinstellungen belassen. Im Ergebnis gab es immer noch Bereiche mit falsch ausgerichteten Normalenvektoren, diese waren aber nun besser abgrenzbar, da sie sich auf einzelne isolierbare Objekte bezogen. Da viele implementierte Algorithmen kein zufriedenstellendes Ergebnis erzeugen konnten, wurden die betroffenen Bereiche jeweils einzeln extrahiert, dort die Normalenrichtungen invertiert und anschließend alle Teilpunktvolken wieder zusammengefügt (merge).

Das Ergebnis (Abb.7) stellte eine zufriedenstellende Punktvolke dar, aus der in Agisoft Metashape ein Mesh generiert wurde. Aus dem Mesh wurde zusätzlich ein vereinfachtes Mesh gerechnet, damit die geplante Arbeit mit dem Modell in Programmen wie z.B. ArcGIS Pro von ESRI erleichtert wird.



(Abb.7: Finales Modell)

5 Diskussion

Nach der ersten Verarbeitung der Daten entsprechend des geplanten Workflows fielen im Ergebnis gravierende Fehler auf. Zunächst wurden die TLS-Scans genauer geprüft, wobei sich herausstellte, dass die Registrierung einiger Scans sehr ungenau war (mehrere dm "Verschiebung"). Beim Versuch der erneuten Registrierung über Cloud-to-Cloud fiel auf, dass hier die Ausrichtung der Scans zueinander nach dem Algorithmus noch schlechter war als davor - also nach der manuellen Ausrichtung. Den Grund dafür konnten wir leider noch nicht final erörtern. In der Konsequenz haben wir die einzelnen TLS-Scans schrittweise über gemeinsame Punkte verknüpft, wobei die Schachbrettzielmarken als Passpunkte dienten und weitere markante Punkte zusätzlich herangezogen werden mussten. Scan 8 wurde aufgrund der schwierigen Integration weggelassen. Als Ergebnis erhielten wir eine Punktwolke mit einem RMS (Root Mean Square Error) von bis zu 0,03m, im Durchschnitt (zwischen den meisten Scans) lag dieser bei 0,01m. Diese Punktwolke war jedoch weiterhin unvereinbar mit der BLK2GO Punktwolke, höchstwahrscheinlich weil die BLK2GO-Punktwolke zu diesem Zeitpunkt immer noch doppelt aufgenommene Bereiche durch die Trajektorieprobleme und falsche Normalenrichtungen beinhaltete. Die Punktwolke aus den TLS-Scans ist durch die stationären Scannerpositionen und die daraus resultierenden verschatteten Bereiche jedoch unvollständig (v.a. bezogen auf die kritischen Bereiche - eingeklemmter Felsen mit Vertiefungen, Spalten, Hohlräume etc.). Aus diesem Grund entschieden wir uns dazu, nur die BLK2GO-Scans zu verarbeiten, da diese das gesamte Untersuchungsobjekt abbilden und über den gesamten Bereich eine ziemlich homogene Genauigkeit bieten.

Die Verschiebung innerhalb einzelner BLK2GO-Scans durch die inhomogene Kalibrierung der Trajektorie kam möglicherweise durch recht lang gewählte Walks und durch die komplexen Strukturen und daraus resultierenden dynamischen Neigungen des Aufnahmeapparates zustande.

6 Ergebnisse

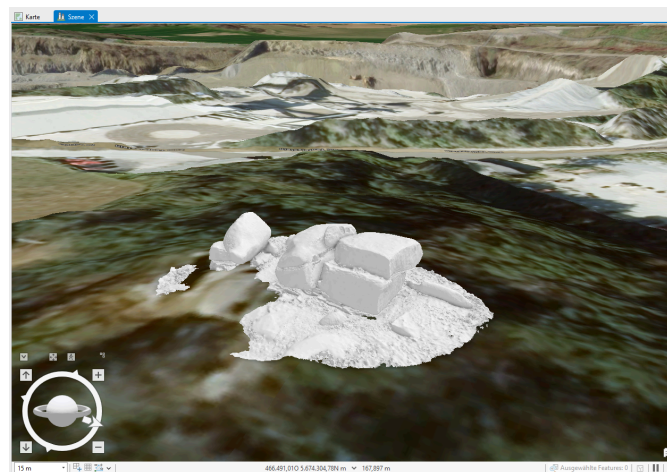
Die angedachten Anwendungen für das Ergebnis bestehen wie bereits angesprochen darin, zum einen die möglichen Passformen der Steine untereinander zu analysieren und zum anderen darin, die Felsformationen mit positionsabhängigen atmosphärischen Gegebenheiten in Verbindung zu setzen. Da sowohl bei der Ergebnispunktwolke, als auch bei den Meshes von einer durchschnittlichen Formgenauigkeit von etwa 1 cm ausgegangen werden kann, sollte diese Genauigkeit für die Anwendungsfälle definitiv ausreichend sein.

Durch die teils sehr akribische Vorbereitung der durch die fehlerhafte Trajektorie entstandenen Punkte, hat die Punktwolke möglicherweise an bedeutenden Stellen Qualität einbüßen müssen. Ähnliches gilt für das manuelle Extrahieren einiger Objekte zum Invertieren der Normalenrichtungen, da es meist bei steilen Übergängen zwischen angrenzenden Objekten die Grenzen gezogen werden mussten. Dabei wurden mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht 100% der zu invertierenden Punkte erwischt, oder auch korrekte Normalen invertiert.

Durch die schwierig zu verarbeitenden Scanergebnisse war ein deutlich erhöhter Zeit- und Arbeitsaufwand notwendig, wodurch das gesteckte Ziel, 3 einzelne georeferenzierte Objekte zu erstellen um die möglicherweise zerstörte Felsformation digital zu rekonstruieren, nicht vollends erreicht werden konnte.

Unter Berücksichtigung der ungünstigen Scanergebnisse des BLK2GO-Scans und der ungelösten Probleme beim Registrieren der TLS-Scans, werten wir die Ergebnisse eindeutig als zufriedenstellend. Dies gilt ohne die Möglichkeit in Betracht zu ziehen, das gesamte Untersuchungsobjekt erneut zu scannen, was aufgrund des Rahmens dieser Projektarbeit für uns zum Zeitpunkt der Erkenntnisse nicht in Frage kam. Das Ergebnis stellt einen wertvollen Stand auf dem Weg zur finalen Anwendung dar.

Bei der finalen Betrachtung des vereinfachten Modells ins ArcGIS Pro fiel auf, dass das Modell zwar bezüglich der Lage korrekt, jedoch um 45° rotiert dargestellt wurde. Dies wurde zu Präsentationszwecken manuell gedreht (Abb.8). Die Georeferenzierung war nach Prüfung während der Bearbeitung korrekt. Die unbeabsichtigte Rotation könnte durch erneutes Georeferenzieren behoben werden.



(Abb.9: Vereinfachtes Endergebnis in ArcGIS Pro)

7 Fazit und Ausblick

Das vorliegende Projekt zur 3D-Erfassung und digitalen Rekonstruktion des Teufelssteins bei Kleinbautzen stellt eine gelungene Anwendung modernster Vermessungstechniken in der archäologischen Forschung dar. Durch den Einsatz von Laserscanning-Technologien, insbesondere des FARO Focus S150 und des BLK2GO, sowie ergänzender GNSS-Messungen, konnte eine präzise Erfassung der Steinstruktur und ihres geographischen Umfelds erfolgen. Die Kombination von terrestrischem und mobilem Laserscanning ermöglicht es, auch schwer zugängliche Bereiche zu dokumentieren und ein vollständiges, georeferenziertes 3D-Modell zu erstellen.

Die angewandte Methodik war auf die geodätische Genauigkeit von deutlich unter 10cm ausgerichtet, was eine fundierte Grundlage für weiterführende Analysen bietet. Besondere Herausforderungen traten im Rahmen der Registrierung der Punktwolken auf, insbesondere bei der Integration der FARO-Scans und des BLK2GO-Scans. Die anfänglichen Fehler bei der Registrierung erforderten eine Neubewertung des Workflows, was zu einer präziseren Ausrichtung der Scans führte. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer iterativen und detaillierten Bearbeitung bei der Verarbeitung solcher Daten. Die Bearbeiter konnten durch diesen an sich ungünstigen Umstand viel über die Verarbeitung von Scandaten und den zukünftigen Umgang mit genutzten Geräten lernen.

Das resultierende georeferenzierte Mesh stellt eine wertvolle Basis für die Simulation von astronomischen Ausrichtungen und damit für die Interpretation der möglichen rituellen oder kultischen Nutzung des Teufelssteins. Die interdisziplinäre Verbindung von Geodäsie, Archäologie und Astronomie hat nicht nur die Wissenschaftler in der Analyse unterstützt, sondern zeigt auch die Vielseitigkeit und Relevanz der angewandten Methoden in der heutigen Forschung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einsatz moderner Laserscanning-Technologien und entsprechender Software in diesem Projekt zu erfolgreichen und wertvollen Ergebnissen geführt hat, die einen wichtigen Beitrag zur archäologischen und kulturellen Untersuchung prähistorischer Stätten leisten. Weitere Forschungen könnten auf diesem georeferenzierten Modell aufbauen, um tiefere Einblicke in die Nutzung und Bedeutung des Teufelssteins zu gewinnen. Dafür wären beispielsweise die Extraktion einzelner Objekte aus der Ergebnispunktwolke mit anschließender Mesherzeugung notwendig, oder eine weitere Verbesserung der Ergebnispunktwolke mit der erstellten TLS-Punktwolke über die Verknüpfungspunkte könnten das Ergebnis ebenfalls aufwerten.

Literatur

Wikisource. (2023). *Der Teufelsstein bei Kleinbautzen*. Verfügbar unter: https://de.wikisource.org/wiki/Der_Teufelsstein_bei_Kleinbautzen [Zugriff am: 24.12.2024].

Herold, R. & Hensel, H. (2023). *Bericht zu den Forschungen am Teufelsstein Pließkowitz/Kleinbautzen*. Fachgruppe Archäoastronomie der Sternwarte „Bruno-H.-Bürgel“ Sohland/Spree e.V. Sohland/Spree.