
Photogrammetrische Aufnahme eines unterirdischen Ganges auf der archäologischen Ausgrabung in Oymağaç (Türkei)



vorgelegt von

Marco Schütze

EDV.Nr.: 817029

dem Fachbereich III – Bauingenieur- und Geoinformationswesen –
der Beuth Hochschule für Technik Berlin vorgelegte Bachelorarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering (B. Eng.)

im Studiengang

Vermessungswesen und Geomatik

Tag der Abgabe: 27. September 2017

Gutachter

Prof. Dipl.-Ing. M. Breuer Beuth Hochschule für Technik

Prof. Dr.-Ing. K. Hehl Beuth Hochschule für Technik

Vorwort

Im Sommersemester 2016, während meines 4. Semesters im Studiengang Vermessungswesen und Geomatik, stellte Herr Prof. Breuer das Oymaagac Nerik Projekt mit der photogrammetrischen Aufnahme eines unterirdischen Ganges als Thema einer Bachelorarbeit vor und erlangte meine Aufmerksamkeit. Eine kleine Recherche im Internet verstärkte mein Interesse für dieses äußerst interessante Projekt. Nachdem ich meinen Kommilitonen Dennis Marquardt ebenfalls für das Projekt begeistern konnte, wurden die Formalitäten geklärt und die ersten Vorbereitungen getroffen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Beteiligten bedanken, die mir bei der Fertigstellung dieser Abschlussarbeit geholfen haben und mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen. Mein besonderer Dank gebührt meinem Kommilitonen Dennis Marquardt, der nicht, wie ursprünglich geplant, diese Abschlussarbeit mit mir zusammen schreiben konnte, mit mir jedoch die Messung und Aufnahme in der Türkei durchgeführt hat und darüber hinaus bei der Erstellung der Punktwolke mitgewirkt hat. Den beiden Labormitarbeitern des Photogrammetrielabors der Beuth Hochschule für Technik Berlin, Dipl.-Ing. Monika Lehmann und Dipl.Ing. Marko Koch, die auch in der Türkei mit vor Ort waren, danke ich für ihre große Hilfsbereitschaft und Weitergabe Ihrer Erfahrungen bei der Messung bis zur Auswertung.

Im Laufe des Projektes konnte ich viel theoretisches Wissen aus dem Studium in der Praxis anwenden. Das Projekt erregte auch meine Begeisterung für das Arbeiten und Analysieren von 3D-Daten, die bis heute besteht und meine spätere Berufswahl wesentlich beeinflussen wird.



BEUTH HOCHSCHULE
FÜR TECHNIK
BERLIN

University of Applied Sciences

Beuth Hochschule | Prof. M. Breuer | FB III | Luxemburger Str. 10 | 13353 Berlin

Prof. Dipl.-Ing. M. Breuer
Photogrammetrie und
Fernerkundung

Haus Bauwesen, Zi. 157
Luxemburger Straße 10
Tel. (030) 4504 - 5144
Fax (030) 4504 - 665144
breuer@beuth-hochschule.de

24.05.2017

■ Aufgabenstellung zur Bachelorarbeit für Herrn MARCO SCHÜTZE (817029) zum Thema

Photogrammetrische Aufnahme eines unterirdischen Ganges auf der archäologischen Ausgrabung in Oymaagac (Türkei)

Studiengang: Bachelor Vermessung und Geomatik

Hintergrund

Das Oymaagac-Nerik-Projekt ist ein Kooperationsprojekt mehrerer Hochschulen und Institute unter der Leitung der Freien Universität Berlin, Prof. Dr. Jörg Klinger und Prof. Dr. Rainer Czichon, Usak Üniversitesi, Türkei. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Freilegung einer 2500 m² großen Tempelanlage aus hethitischer Zeit auf einer Hügelkuppe nahe Oymaagac in der Türkei. Im Rahmen der Arbeiten in diesem Projekt erfolgt die vermessungstechnische Dokumentation unterschiedlicher Teilbereiche des Grabungsareals.

Während einer Messkampagne vom 10.-20.9.2016 erfolgte die photogrammetrische Aufnahme eines unterirdischen Ganges soweit dieser bis dahin freigelegt worden war. Basierend auf vorhandenen Festpunkten wurde ein geodätisches Netz angelegt und ausgewertet. Im Gang wurden für die photogrammetrische Aufnahme Passpunkte signalisiert und geodätisch eingemessen. Die Koordinaten der Passpunkte liegen vor und können für die sich anschließenden Arbeitsschritte genutzt werden. Während der photogrammetrischen Aufnahme wurden insgesamt ca. 5.000 Bilder aufgenommen.

Ziel

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sollen die photogrammetrischen Aufnahmen mit der Methode der terrestrischen Mehrbildphotogrammetrie ausgewertet werden. Dafür kann die Software Photoscan der Firma AGISOFT in der Version 1.3.1 im Labor für Photogrammetrie genutzt werden. Die dafür notwendigen Arbeitsschritte sind zu beschreiben, sodass nachvollziehbar wird, welche photogrammetrischen Teilprobleme die Software im jeweiligen Arbeitsschritt löst.



Folgende Ergebnisse werden gefordert:

- 3D-Punktwolke der photogrammetrisch aufgenommenen Bereiche
- Texturierte 3D-Vermaschung der photogrammetrisch aufgenommenen Bereiche
- Orthophotos vom Eingangsbereich des Ganges und von der Sondage (Freilegung am Ende des Ganges) im Maßstab 1:50
- Orthophotos von zwei Querschnitten im Maßstab 1:50

Die sich aus den geforderten Datenprodukten ergebende Genauigkeitsanforderung ist zu beschreiben. Die tatsächlich erzielten Genauigkeiten sind zu dokumentieren, zu analysieren und anhand geeigneter Kriterien zu bewerten.

Bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung ist darauf zu achten, dass die Vorgehensweise eingehend erläutert, alle getroffenen Entscheidungen gut begründet und die Ergebnisse übersichtlich zusammengestellt werden. Dazu gehört auch, dass aufgetretene technische Probleme sachlich dokumentiert werden.

Abzugeben ist der beschreibende Text in 2-facher Ausfertigung, sowie alle Unterlagen und Ergebnisse in digitaler Form. Dazu gehört ein ausführliches Register der gespeicherten Daten. Zur öffentlichen Präsentation der Arbeit sind ein Poster mit den wichtigsten Ergebnissen und eine kurze Zusammenfassung für eine Internetpräsentation anzufertigen.

Die Bearbeitungszeit beträgt 3 Monate.

Prof. Dipl.-Ing. MICHAEL BREUER

Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Abschlussarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Hintergrund	1
1.1.1. Das Oymağaç-Nerik-Projekt	1
1.1.2. Historischer Hintergrund	2
1.2. Ziele der Messung	2
1.3. Erwartungen	3
2. Vorbereitung	5
2.1. Häusliche Vorbereitung	5
2.1.1. Überlappung	5
2.1.2. Größe der codierten Passpunktsignale	6
2.1.3. Materialliste	7
2.2. Theoretische Grundlagen	8
2.2.1. Tachymetrie	8
2.2.2. Photographie	8
2.2.3. Mehrbildphotogrammetrie	10
2.3. Instrumentarium und Software	12
2.3.1. Tachymeter - Leica TS12	12
2.3.2. Kamera - Nikon D810	12
2.3.3. Agisoft Photoscan 1.3.1	13
2.4. Ortsbegehung	13
3. Tachymetrische Messung	15
3.1. Netzanlegung	15
3.1.1. Anbringen der codierten Passpunkte	15
3.1.2. Messung der Passpunkte	15
4. Photogrammetrische Aufnahme	17
4.1. Die Teilbereiche des unterirdischen Ganges	17
4.1.1. Aufnahmemethodiken der Bereiche	18
4.1.2. Besonderheiten der Bereiche	22
5. Auswertung	25
5.1. Netzausgleichung	25
5.2. Auswertung der photogrammetrischen Aufnahme	26
5.2.1. Orientierung der Bilder	26
5.2.2. Passpunkterkennung und Optimierung der Orientierung	26
5.2.3. Berechnung der dichten Punktwolke	28
5.2.4. Berechnung des Meshs	28
5.2.5. Texturierung des Meshs	30
5.2.6. Erstellung der Orthophotos	30
5.2.7. Berichtausgabe	31
6. Ergebnisse	35
6.1. 3D-Punktwolke	35

6.2. Mesh	35
6.3. Texturiertes Mesh	36
6.4. Orthophotomosaik	37
6.5. Genauigkeitsanalyse	39
7. Zusammenfassung und Ausblick	41
A. Anhang	43
A.1. Register der gespeicherten Daten	43
Abbildungsverzeichnis	46
Tabellenverzeichnis	46
Literatur- und Quellenverzeichnis	46

1. Einleitung

1.1. Hintergrund

1.1.1. Das Oymaağaç-Nerik-Projekt

Die Grabungsarbeiten unter Leitung von Prof. Dr. Jörg Klinger (FU Berlin) und Prof. Dr. Rainer M. Czichon (Uşak Üniversitesi, Türkei) auf dem Oymaağaç Höyük¹ bestehen schon seit 2011 und werden noch in weiteren Kampagnen fortgesetzt. Auch in diesem Jahr 2017 ist eine Kampagne im September geplant.

Während der Ausgrabungsarbeiten an der Nordostkuppe des Hügels, die in Zusammenarbeit mit internationalen Wissenschaftlern, Studenten und Arbeitern aus dem Dorf Oymaağaç Köy durchgeführt wird, wurde eine Tempelanlage aus hethitischer Zeit, eine Vielzahl an eisenzeitlichen Gruben, ein hethitisches Stadttor und Reste einer hethitischen Stadtmauer ausgegraben. Als „Highlight“ der Ausgrabung gilt allerdings ein zu einer Art Quelltrotte führender etwa 3000 Jahre alter unterirdischer Treppengang.² Die Freilegung gestaltete sich jedoch als äußerst problematisch, wie man den Worten des Grabungsleiters Prof. Dr. Rainer M. Czichon entnehmen kann:

„Eine besondere Herausforderung stellte die Freilegung des unterirdischen Treppenganges dar. Ein teilweiser Einsturz der südlichen Tunnelwand ca. drei Meter vor der Felskammer brachte die Ausgrabung zeitweise zum Erliegen. Bei der fieberhaften Suche nach Lösungsmöglichkeiten galt es Sicherheitsaspekte einerseits und denkmalpflegerische Aspekte andererseits zu berücksichtigen. Zwar ist der Einsatz von Beton in der Denkmalpflege verpönt, doch gab es in diesem Fall keine andere Möglichkeit, um eine sichere Weiterarbeit fünf Meter unter der Erdoberfläche zu gewährleisten. Die Sicherungsarbeiten des ca. 2 x 2m großen Ausbruchs wurden von der auf denkmalpflegerische Arbeiten spezialisierten Firma August Wolfsholz Ingenieurbau GmbH (Leonberg) in Zusammenarbeit mit dem auf Spritzbeton spezialisierten Bauingenieur Prof. Dr.-Ing. Werner Dahmann von der Beuth Hochschule für Technik in Berlin fachgerecht durchgeführt. Zuvor war der gesamte Treppengang von Photogrammetrie-Spezialisten der Beuth Hochschule für Technik unter Leitung von Prof. Martin Kähler und Dipl.-Ing. Monika Lehmann zentimetergenau mit Stereokameras und Laserscanner dokumentiert worden. Nach erfolgreicher Beendigung der Sicherungsarbeiten wurde die Freilegung des unteren Abschnittes des Treppenganges und der Felsenkammer am Ende der Kampagne 2015 fortgesetzt.“³

Noch während der photogrammetrischen Aufnahme im Zuge dieser Arbeit in der Kampagne des Jahres 2016 wurde der Treppengang bis zur Quelle freigelegt. Durch das hochsickernde Grundwasser musste mit einer leistungsfähigen Pumpe weitergearbeitet werden. Den letzten Abschnitt wird Dipl.-Ing. M. Koch, Labormitarbeiter des Photogrammetrielabors in der Beuth Hochschule für Technik, in der Kampagne im September diesen Jahres 2017 aufnehmen.

¹türkisch, = „Grabhügel“

²vgl. [CKH⁺ 16], Seite 3ff

³[CKH⁺ 16], Seite 24

1.1.2. Historischer Hintergrund



Abbildung 1.1.: Lage von Nerik im Hethiterreich und der umliegenden Reiche[ner]

Nerik galt als traditionelles Zentrum der vorhethitischen Kultur und als prägende Stadt in den Bereichen Kult, Religion, Mythos sowie Verwaltung und Herrschaftsorganisation hethitischer Könige. Auch fungierte die Stadt als Krönungsort für jene Könige. Im 14. bis 15. Jahrhundert v.Chr. wurde Nerik von den räuberischen Kaskäern erobert, behielt jedoch seinen bedeutenden Status. Während der umfangreichen Umstrukturierungs- und Wiederansiedlungsmaßnahmen durch den hethitischen Großkönig Hattušili III. wurden die Kulte und Kultstätten in Nerik reformiert und restauriert, sodass die Stadt wieder fester Bestandteil des hethitischen Großreiches wurde und bis zum Ende der hethitischen Geschichte bestand. Die Signifikanz der Stadt stellen viele Quellen dar, so wurde Nerik in dem umfangreichen und mit zahlreichen mythologischen Motiven verarbeiteten Ritualtext KUB 36.89 aus dem 13. Jahrhundert v. Chr. dargestellt.[web]

1.2. Ziele der Messung

Die anzufertigenden Modelle und Orthophotopläne des unterirdischen Ganges dienen Archäologen als Grundlage für weitere Analysen und einer maßstabsgetreuen Archivierung. Bei dem geforderten Maßstab von 1:50 und einer Strichgenauigkeit von 0.2 mm besteht eine Genauigkeitsanforderung der Endprodukte von 1 cm.

Außerdem sind für die photogrammetrische Auswertung die nötigen Arbeitsschritte zu beschreiben, die die Software Agisoft Photoscan 1.3.1 im Zuge der Auswertung durchführt. Dabei soll klargestellt werden, welche photogrammetrischen Teilprobleme im jeweiligen Arbeitsschritt gelöst werden.

1.3. Erwartungen

Nachdem man viele Kenntnisse und theoretisches Wissen im Studium erlangt hat, strebt man nun danach, diese in der Praxis anzuwenden. Vor allem die Erlangung von praktischen Fähigkeiten beim Messen mit dem Tachymeter und die praktische Anwendung der Photogrammetrie stehen dabei im Vordergrund. Das Oymağaç-Nerik-Projekt beinhaltet eine enge Zusammenarbeit mit Archäologen sowie diversen wissenschaftlichen Arbeitern. Die komplette Planung des Projektes, von der Vorbereitung, über die Durchführung, bis zur Auswertung ist der Grundstein der Arbeit eines Ingenieurs.

2. Vorbereitung

2.1. Häusliche Vorbereitung

Bevor man ins Flugzeug steigt und mit der Messung in der Türkei beginnen kann, benötigt es einiges an Vorbereitung. Zusammen mit zwei Mitarbeitern des Photogrammetrielabors Dipl.-Ing. Monika Lehmann und Dipl.-Ing. Marko Koch wird grob der Ablauf durchgesprochen. Da Frau Lehmann schon mehrmals vor Ort war, kann Sie gute Einblicke in die Grabung und das Umfeld geben und so die häusliche Vorbereitung vereinfachen. Zudem gab es im Vorfeld auch schon mehrere Bachelorarbeiten über den unterirdischen Gang [MW12][Nar15][Rot14][Zie15], deren Erkenntnisse mit als Grundlage für diese Bachelorarbeit dienen.

Die später erzeugte Punktwolke soll in einem übergeordneten System georeferenziert werden, daher ist es notwendig, Passpunktmarken im und um den unterirdischen Gang zu verteilen und aufzumessen. Der Umgang mit dem Tachymeter und der Software auf dem Gerät muss also sicher beherrscht werden. Die Theorie dahinter lässt sich im Abschnitt 2.2.1 nachlesen.

Im Zeitalter der digitalen Photographie, hauptsächlich mit der Smartphonekamera, ist einem der Umgang außerhalb des Automatikmodus nicht geläufig. Daher muss die Handhabung mit Blende, Belichtungszeit, ISO-Wert und Brennweite erst einmal erlernt und routiniert werden. Im Abschnitt 2.2.2 werden die Grundlagen zu diesem Thema behandelt.

Das Hauptthema dieser Bachelorarbeit, die Mehrbildphotogrammetrie, wurde bereits in den Modulen *Einführung in die Photogrammetrie und Fernerkundung*, sowie *Photogrammetrie und Fernerkundung I und II* ausgiebig behandelt. Das erlernte theoretische Wissen, welches im Abschnitt 2.2.3 zusammengefasst dargestellt wird, kann nun in der Praxis bei diesem Projekt angewendet werden.

2.1.1. Überlappung

Für den unterirdischen Gang wird geplant, ein Maßband in der Mitte des Tunnels zu spannen und in einem Abstand von 20 cm mit einem Stativ mit Winkelanzeige Vollkreise aufzunehmen. Bei fünf Aufnahmen ist ein Aufnahmewinkel von 72° erforderlich. Da das 20 mm-Objektiv einen Aufnahmewinkel im Querformat von 84° hat (siehe Abbildung 2.8), reichen fünf Aufnahmen, um den Vollkreis abzudecken und eine Überlappung der Bilder zu bewirken.

Um eine Überlappung der Bilder zwischen den Standpunkten von mindestens 60% zu gewährleisten, wird der Mindestabstand zum Aufnahmeobjekt folgendermaßen berechnet:

$$a = \frac{\text{Bildhöhe}}{2} = \frac{24 \text{ mm}}{2} = 12 \text{ mm} \quad (2.1)$$

$$b = \text{Brennweite} = 20 \text{ mm} \quad (2.2)$$

$$60\% = \frac{2c - 20 \text{ cm}}{2c}; c = 25 \text{ cm} \quad (2.3)$$

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d} \quad (2.4)$$

$$d = \frac{b}{a} \cdot c = 41.7 \text{ cm} \quad (2.5)$$

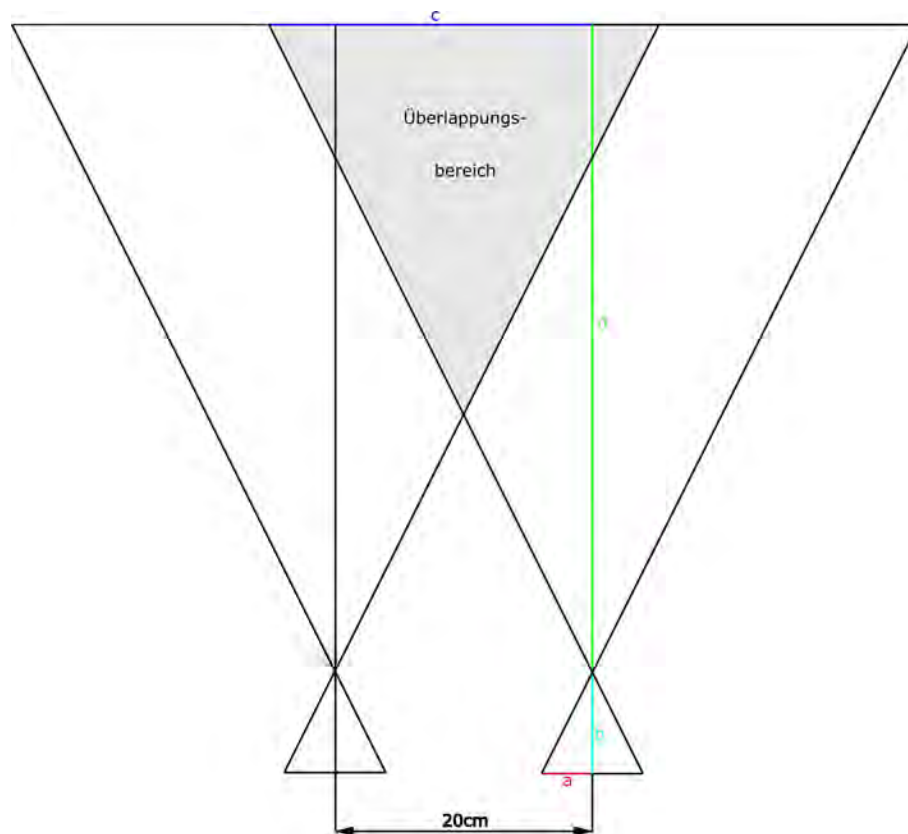


Abbildung 2.1.: Überlappung

Dem Ergebnis (2.5) lässt sich entnehmen, dass bei einem Abstand von über 42 cm vom Objekt und bei einem Aufnahmeabstand von 20 cm eine Überlappung der Bilder von mehr als 60% besteht. Somit eignet sich der Aufnahmeabstand von 20 cm zwischen den Standpunkten im Treppengang sehr gut, da die Photos im Abstand von ungefähr 50 cm bis 1.5 m von den Tunnelwänden aufgenommen werden und damit eine Überlappung von mehr als 60% aufweisen werden. Dazu kommen noch weitere Aufnahmen, die die Überlappung noch weiter erhöhen werden.

2.1.2. Größe der codierten Passpunktsignale

Der ungefähre Aufnahmeabstand von 50 cm bis maximal 3 m im Tunnel gibt Aufschluss darüber, in welcher Größe die codierten Passpunktmarken erstellt und gedruckt werden müssen. Hierfür lässt sich ebenfalls Abbildung 2.1 und die Formeln (2.1) bis (2.5) verwenden. Dabei ist **a** die Pixelgröße des Sensors und **c** die gesuchte Pixelgröße der Aufnahme bei einem Aufnahmeabstand von **d**.

$$c = \frac{a}{b} \cdot d = \frac{\frac{36 \text{ mm}}{7360 \text{ px}}}{20 \text{ mm}} \cdot 3 \text{ m} = 0.73 \text{ mm} \quad (2.6)$$

Da 10 px für eine automatische Passpunkterkennung nötig sind, ergibt sich ein Durchmesser von 8 mm des schwarzen Passpunktmittelpunktes. Für die Bereiche außerhalb des Tunnels werden 28 mm große Passpunktmarken verwendet. Hier bestimmt die Passpunktgröße einen maximalen Aufnahmeabstand von 11.4 m (Berechnung siehe Formel(2.7)). Dieser Abstand reicht auch für Aufnahmen mit einem Stab.

$$d = \frac{b \cdot c}{a} = \frac{20 \text{ mm} \cdot 2.8 \text{ mm}}{\frac{36 \text{ mm}}{7360 \text{ px}}} = 11.4 \text{ m} \quad (2.7)$$

Es werden unter 200 Passpunktmarken benötigt. Agisoft Photoscan bietet die Möglichkeit, Passpunktmarken mit einer 12-Bit, 16-Bit oder 20-Bit Codierung als PDF zu erstellen. Mit der kleinsten möglichen Codierung wären $2^{12} = 4096$ Passpunkte mit unterschiedlicher Nummerierung möglich, also wird diese verwendet. Die Codierung gibt an, aus wievielen Segmenten der Außenkreis besteht. So besitzt eine 12-Bit codierte Marke 12 Außenkreissegmente (siehe Abbildung 2.2). Die ausgedruckten Passpunktmarken werden anschließend laminiert, um beständiger gegen Feuchtigkeit zu sein.

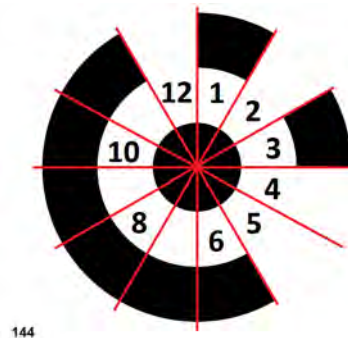


Abbildung 2.2.: 12-Bit codierter Passpunkt

2.1.3. Materialliste

Folgende Geräte und Zubehör werden vorbereitet und per Kleintransporter nach Oymaağaç transportiert:

- Leica TS12 Tachymeter
- 2x Nikon D810 Kameras, inklusive Ringblitz und diverses Zubehör (verschiedene Objektive, Gegenlichtblende,...)
- 2x Manfrotto Kamerastative
- 4x Vermessungsstative
- Ministativ
- 4 Rollen doppelseitiges Klebeband
- laminierte codierte Passpunktmarken in den Größen 8;12 und 28 mm
- Vermarktungsmaterial
- 50m-Textilmessband
- Gliedermaßstab

2.2. Theoretische Grundlagen

2.2.1. Tachymetrie

Bei der Tachymetrie kommt ein Winkel- und Streckenmessgerät zum Einsatz, das sogenannte Tachymeter. Es werden der Horizontal- und Vertikalwinkel elektronisch abgelesen und die Strecke per elektro-optischer Distanzmessung (Abkürzung: EDM) ermittelt. Dabei wird ein modulierter Infrarotlaserstrahl vom Tachymeter ausgesendet und das reflektierte Signal (mit Hilfe eines Reflektors oder reflektorlos) wird mit dem Impulslaufzeitverfahren oder dem Phasendifferenzverfahren vom Gerät analysiert.

Bei dem Impulslaufzeitverfahren wird die Zeit gemessen, die ein Wellenimpuls benötigt, um die doppelte Schrägstrecke (zum Objekt und zurück) zu durchlaufen. Beim Phasendifferenzverfahren werden dagegen kontinuierliche harmonische Wellen unter einem bestimmten Phasenwinkel vom Gerät ausgesendet, am Objekt reflektiert und am Gerät wieder mit einem Phasenwinkel aufgenommen. Die dabei resultierende Phasendifferenz zwischen gesendeter und reflektierter Welle bestimmt die Schrägstrecke.

Um eine geradlinige Ausbreitung, wenig Streuung, eine gute Bündelung und eine gute Reflexion zu gewährleisten, wird die Messwelle per Amplitudenmodulation auf eine Infrarot-Trägerwelle moduliert, die diese Eigenschaften aufweist.¹

2.2.2. Photographie

Das **Objektiv** bewirkt die Abbildung des Gegenstandes auf der Bildfläche im Abstand der Bildweite. Vom Gegenstand gehen Strahlen in allen Richtungen aus, zwei davon reichen, um einen Punkt abzubilden. Anhand des Verlaufes der Brennpunkt- und Parallelstrahlen ergeben sich die Beziehungen zwischen Gegenstandsweite, Bildweite und Brennweite und werden in der Linsengleichung $\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$ angegeben.

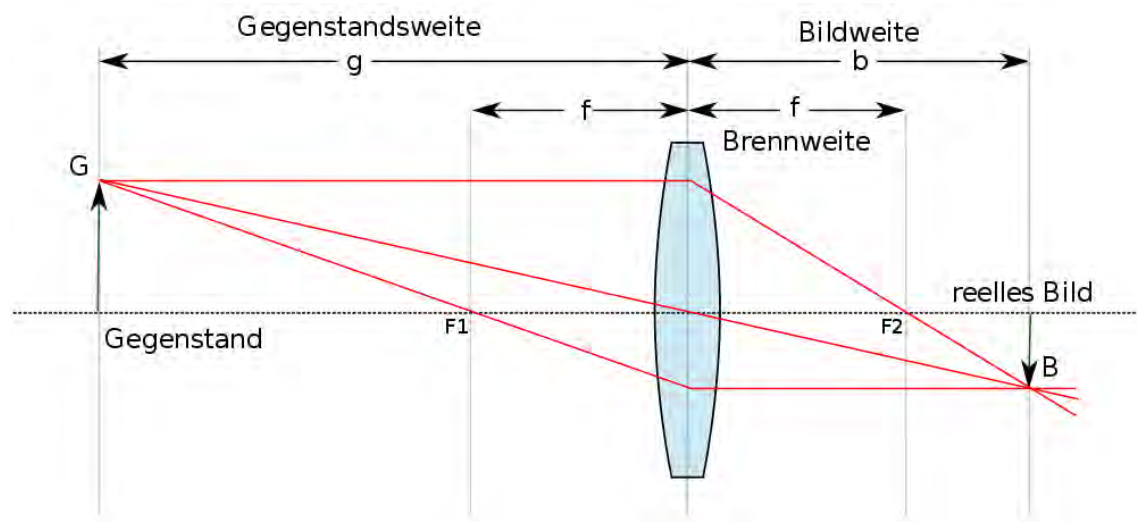


Abbildung 2.3.: Bildentstehung an einer Linse[Len11]

Die **Blende** regelt die Menge des einfallenden Lichtes durch eine in ihrer Größe verstellbare Öffnung. Je größer die Öffnung, desto mehr Licht tritt in das Kamerasystem. Bei kleiner werdender Öffnung vergrößert sich jedoch die **Schärfentiefe**, also der Bereich, in dem sich der Gegenstand befinden kann, um noch scharf wahrgenommen zu werden. Die Blendenzahl gibt dabei das Ver-

¹vgl. [Pet10], Seite 177ff

hältnis der Brennweite zum Durchmesser der Eintrittsöffnung an. Je größer die Blendenzahl, desto kleiner die Eintrittsöffnung und somit auch kleiner die Blende.

Die Zeit, in der das Licht in das Kamerasystem eintreten kann, wird durch den **Verschluss** geregelt. Je nach Empfindlichkeit des Sensors, nach eingestellter Blende und Bewegung des Gegenstandes und/oder der Kamera muss die Verschlusszeit, auch Belichtungszeit genannt, angepasst werden. Bei stärkerer Bewegung wird eine kleinere Belichtungszeit benötigt, wohingegen bei einer kleineren Blende (meist) eine höhere Belichtungszeit benötigt wird, um eine Unschärfe zu vermeiden. Ab einer Belichtungszeit größer als $\frac{1}{60}s$ wird eine feste Kamerahalterung benötigt.

Ein weiterer Parameter ist die Lichtempfindlichkeit. Ursprünglich abgeleitet aus der analogen Photographie, ist dieser Wert abhängig vom in der Kamera eingelegtem Film. In der digitalen Photographie lässt sich mit dem **ISO-Wert** die Lichtempfindlichkeit des Sensors einstellen und den gleichen Effekt wie bei einem analogen Film erzielen. So ist es mit einer höheren Lichtempfindlichkeit möglich, bei gleich bleibender Blende eine niedrigere Belichtungszeit einzustellen, ohne dass die Aufnahme unscharf wird. Ein Nachteil dabei ist jedoch, dass bei einer höheren Filmempfindlichkeit auch ein erhöhtes Rauschverhalten auftritt.²

Der Zusammenhang dieser genannten Aufnahmeparameter ist sehr gut in einem Belichtungs-dreieck (siehe Abbildung 2.4) erkennbar.



Abbildung 2.4.: Das Belichtungs-dreieck[bel]

²vgl. [Pom16], Seite 26ff

2.2.3. Mehrbildphotogrammetrie

Der Schritt vom Bildpaar zur Punktwolke wird durch eine Transformation von Objektkoordinaten in Bildkoordinaten mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen (2.8) und (2.9) erzielt. Voraussetzung dafür ist, dass die Parameter der inneren und äußeren Orientierung bekannt sind und Objektpunkt, Bildpunkt und Projektionszentrum auf einer Geraden liegen (=kollinear).³

$$x' = x'_O - c_K \cdot \frac{r_{11}(X - X_O) + r_{21}(Y - Y_O) + r_{31}(Z - Z_O)}{r_{13}(X - X_O) + r_{23}(Y - Y_O) + r_{33}(Z - Z_O)} + \Delta x' \quad (2.8)$$

$$y' = y'_O - c_K \cdot \frac{r_{12}(X - X_O) + r_{22}(Y - Y_O) + r_{32}(Z - Z_O)}{r_{13}(X - X_O) + r_{23}(Y - Y_O) + r_{33}(Z - Z_O)} + \Delta y' \quad (2.9)$$

Innere Orientierung

Die innere Orientierung beschreibt die Position des Projektionszentrums im Bezug zur Bildebene innerhalb der Kamera sowie die Abweichung vom mathematischen Modell der Zentralperspektive. Die Parameter der inneren Orientierung sind die Koordinaten des Bildhauptpunktes $H'(x'_0, y'_0)$, die Kamerakonstante c_K sowie die Funktionen der Verzeichnungen des Objektives, hauptsächlich der radial-symmetrischen Verzeichnung $\Delta r'$. Der Bildhauptpunkt ist der Lotfußpunkt des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem. Die Kamerakonstante ist der Abstand zwischen Projektionszentrum und Bildebene und entspricht bei einer Fokussierung auf unendlich ungefähr der Brennweite des Objektives.⁴

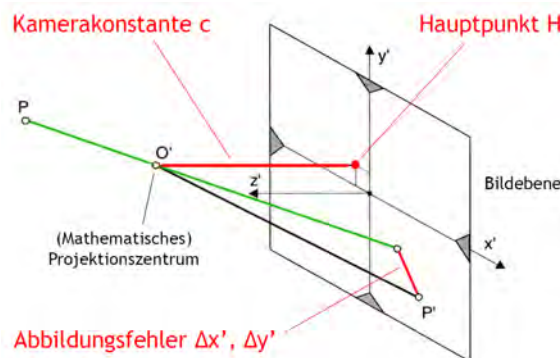


Abbildung 2.5.: Parameter der inneren Orientierung[Bre16]

Äußere Orientierung

Die äußere Orientierung beschreibt die Position der Kamera bezogen auf den Aufnahmegegenstand, also des Bildkoordinatensystems im übergeordneten Objektkoordinatensystem. Rechnerische Grundlage dafür ist der räumliche Rückwärtsschnitt. Um eine eindeutige Lage der Kamera zu berechnen, sind mindestens drei Punkte mit bekannten XYZ-Koordinaten erforderlich, jedoch dürfen diese nicht auf einer Geraden liegen. Die Parameter der äußeren Orientierung sind die Koordinaten des Projektionszentrums O' (X_0, Y_0, Z_0) und die Drehung des Bildkoordinatensystems zusammengesetzt aus drei Winkeln (ω, ϕ, κ). Die äußere Orientierung lässt sich in die relative und absolute Orientierung untergliedern. Die relative Orientierung trifft Aussagen über die Lage des Bildes oder Bildverbandes in einem lokalen System und die absolute Orientierung in einem

³vgl. [Luh10], Seite 239ff

⁴vgl. [Luh10], Seite 138ff

übergeordneten System. Es kommt eine 6-Parameter-Transformation oder mit einem Maßstab die räumliche Ähnlichkeitstransformation (7-Parameter) zum Einsatz.⁵

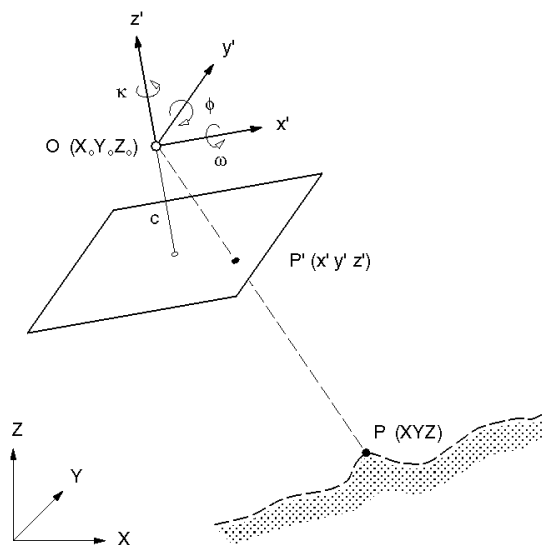


Abbildung 2.6.: Parameter der äußeren Orientierung[aeu]

Bündelblockausgleichung

Um beliebig viele im Raum angeordnete Bilder (Bündel aus Strahlen) zu orientieren, wird die Bündelblockausgleichung verwendet. Diese verknüpft durch identische Punkte Bildverbände in ein Gesamtmodell, welches sich mittels Passpunkte in einem übergeordneten System befinden kann. Wichtigste geometrische Bedingung dabei ist, dass sich alle homologen Strahlen optimal in ihrem Objektpunkt schneiden sollen und somit ein dichtes und sehr genaues dreidimensionales Netz bilden. Anhand der Kollinearitätsgleichungen (2.8) und (2.9) werden die Unbekannten, darunter befinden sich die äußere und innere Orientierung sowie dreidimensionale Objektkoordinaten für jeden Neupunkt, iterativ bestimmt.⁶

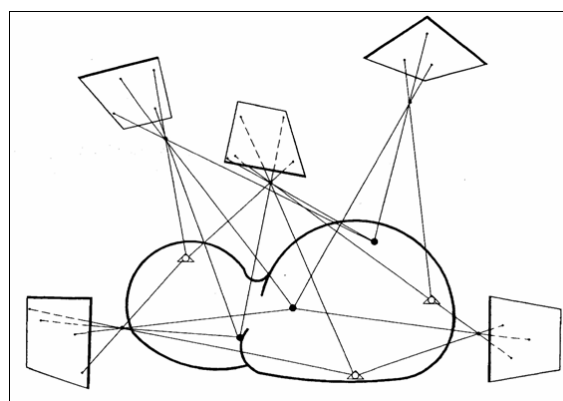


Abbildung 2.7.: Bündelblockausgleichung[bue]

⁵vgl. [Luh10], Seite 236ff

⁶vgl. [Luh10], Seite 301ff

2.3. Instrumentarium und Software

2.3.1. Tachymeter - Leica TS12

Zur Koordinatenbestimmung der Passpunktmarken wird ein Leica TS12 Tachymeter verwendet. In der Tabelle 2.1 werden die wichtigsten technischen Daten aufgelistet.

Tabelle 2.1.: Technische Daten des Leica TS12[Lei11]

Genauigkeit Winkelmessung Hz	2"(0.6 mgon)
Genauigkeit Winkelmessung V	3"(1 mgon)
Genauigkeit Streckenmessung mit Prisma	1 mm + 1.5 ppm
Reichweite Streckenmessung mit Prisma	3500 m (Rundprisma), 2000 m (Miniprisma)
Genauigkeit Streckenmessung reflektorlos	2 mm + 2 ppm
Reichweite Streckenmessung reflektorlos	400 m

2.3.2. Kamera - Nikon D810

Für die photogrammetrische Aufnahme werden zwei Nikon D810 Kameras verwendet. Die wichtigsten technischen Daten zu dieser Kamera sind in der Tabelle 2.2 auffindbar. Gerätspezifische Werte der Nikon D810 sind im Vergleich zu zwei anderen Kameras des Photogrammetrielabors der Beuth Hochschule in der Abbildung 2.8 aufgelistet. Die D810 zeichnet sich durch eine hohe Auflösung und einem Vollformatsensor aus. Das begünstigt eine höhere Bildqualität durch eine höhere Pixelgröße und mehr Informationen pro Pixel gegenüber kleineren Sensoren.

In den Innenbereichen des unterirdischen Ganges wird ein 20mm-Objektiv und in den Außenbereichen ein 35mm-Objektiv verwendet. Grund dafür sind die in der Abbildung 2.8 ersichtlichen Öffnungswinkel. Je größer der Öffnungswinkel, desto größer ist auch der Aufnahmebereich.

Tabelle 2.2.: Technische Daten der Nikon D810 Kamera[d81]

Bildsensor	CMOS
Effektive Auflösung	36.3 Millionen Pixel
Belichtungszeit	1/8000 s bis 30 s (Schrittweite: 1/3 s; 1/2 s; 1 s)
Belichtungskorrektur	-5 bis +5 (Schrittweite: 1/3; 1/2; 1)
Lichtempfindlichkeit	ISO 64 bis 12800

Übersicht über die Kameras des Labors								Objektdeckung in		Pixelgröße in
Kamera	Bildfeld (pixel)		Bildfeld (mm)		Objektiv (mm)	Öffnungswinkel		20m Entfernung (m)		20m Entfernung
	quer	hoch	quer	hoch		quer (°)	hoch (°)	quer	hoch	(mm)
Nikon D810	7360	4912	36	24	20	83,9744	61,9275	36,0	24,0	4,9
					35	54,4322	37,8493	20,6	13,7	2,8
					50	39,5978	26,9915	14,4	9,6	2,0
					85	23,9132	16,0714	8,5	5,6	1,2
Nikon D200	3872	2592	23,6	15,8	20	61,0812	43,1080	23,6	15,8	6,1
					35	37,2623	25,4387	13,5	9,0	3,5
					50	26,5577	17,9570	9,4	6,3	2,4
					55	24,2180	16,3477	8,6	5,7	2,2
					105	12,8241	8,6054	4,5	3,0	1,2
Hasselblad H3DII-50	8176	6132	49,1	36,8	28	82,4876	66,6213	35,1	26,3	4,3
					50	52,3021	40,4072	19,6	14,7	2,4
					80	34,1199	25,9055	12,3	9,2	1,5
					120	23,1244	17,4349	8,2	6,1	1,0

Abbildung 2.8.: Übersicht über die Kameras des Photogrammetrielabors[Beu17]

2.3.3. Agisoft Photoscan 1.3.1

Agisoft Photoscan in der Version 1.3.1 aus dem Jahr 2017 steht im Labor für Photogrammetrie der Beuth Hochschule für die Auswertung der Photos zur Verfügung. Für die Erstellung von 3D-Modellen und Orthophotos gilt Agisoft Photoscan in der photogrammetrischen Praxis als Standardsoftware. Es gilt als ein sehr leistungsfähiges Programm, welches Berechnungen lokal durchführt und eine breite Palette an Funktionalitäten zur Oberflächengenerierung anbietet. Die Benutzeroberfläche ermöglicht eine schrittweise Bearbeitung von der Orientierung der Photos bis zum texturierten Modell oder Erstellung von hochauflösenden Orthophotos.⁷

Im Kapitel 5.2 werden die einzelnen Bearbeitungsschritte anhand des Oymaağaç-Nerik-Projektes erläutert.

2.4. Ortsbegehung

Vor Ort gibt es eine kleine Führung und Einweisung für den unterirdischen Gang, aber auch für die Grabung allgemein. Dabei wird detailliert die Anbringung und Messung der Passpunktmarken überlegt und diskutiert, sowie der weitere Ablauf geplant. So wird festgelegt, dass zuerst die Passpunkte angebracht und aufgemessen werden und danach die photogrammetrische Aufnahme durchgeführt wird.

⁷vgl. [Pet10], Seite 146

3. Tachymetrische Messung

3.1. Netzanlegung

3.1.1. Anbringen der codierten Passpunkte

Um die spätere Punktwolke in einem übergeordneten System zu transformieren, werden im unterirdischen Treppengang, im und um den Eingangsbereich und in der Sondage die in Kapitel 2.1 vorbereiteten codierten Passpunkte angebracht. Im Treppengang werden diese in vertikalen Dreiecken mit einem Abstand von circa 1,5 m verteilt. Dabei wird darauf geachtet, dass diese möglichst sichtbar sind, damit auf so vielen Bildern wie möglich die Passpunkte vorhanden sind. Das ermöglicht eine höhere Überbestimmung und somit genauere Ergebnisse bei der Bildorientierung. Die Passpunkte werden mit doppelseitigem Klebeband an die Steine geklebt, oder mit einem Nagel an Holz oder an lockeren Segmenten fixiert. Da die Nagelköpfe leicht glänzen und somit die reflektorlose Messung verschlechtern oder sogar verhindern, werden diese mit einem Permanentmarker geschwärzt. Zudem würde die automatische Passpunkterkennung bei der späteren Auswertung weniger Passpunktmarken erkennen.

3.1.2. Messung der Passpunkte

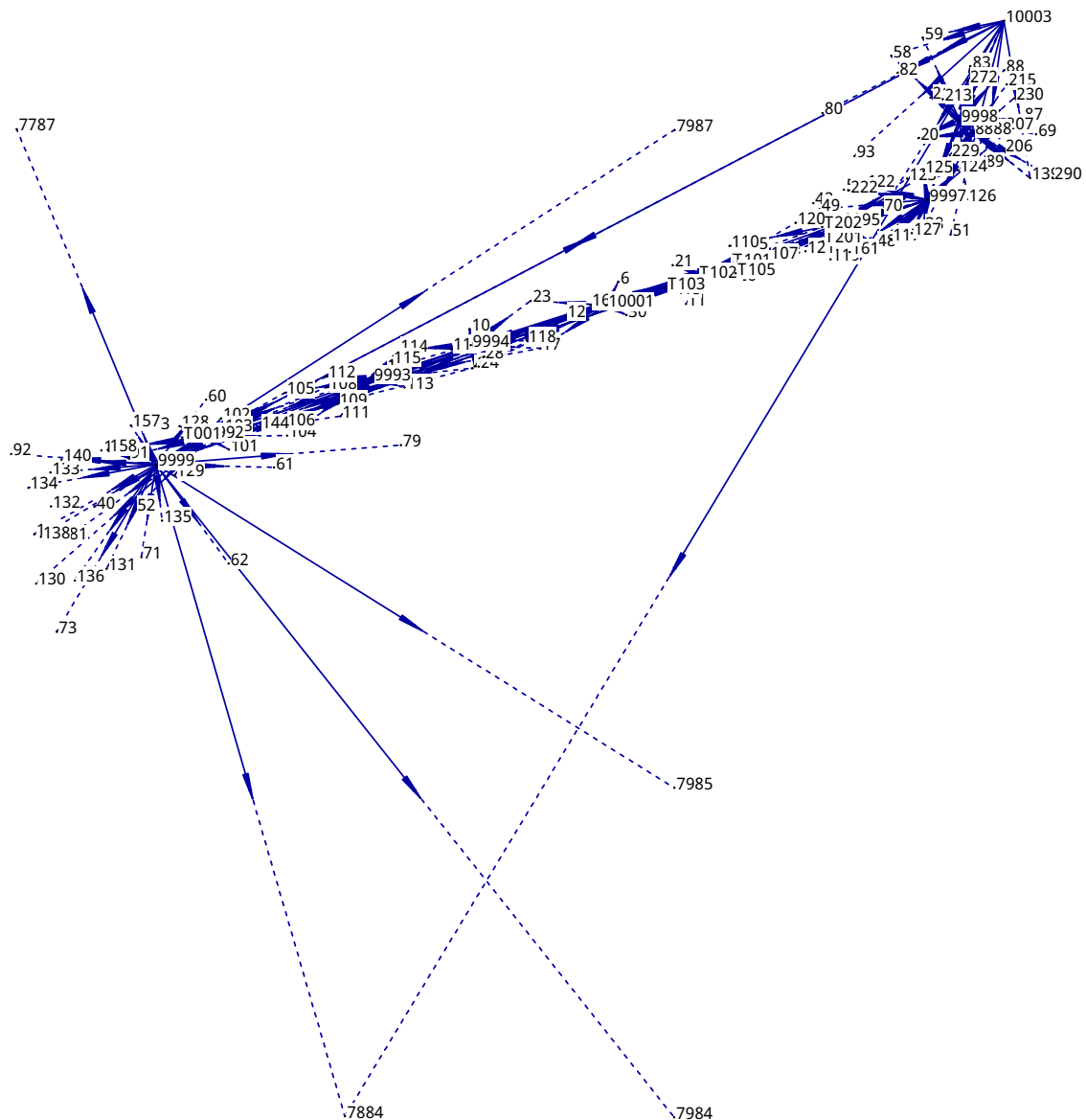
Mit Hilfe der schon vorhandenen Festpunkte¹ wird nun im Eingangsbereich das in Kapitel 2.3.1 beschriebene Tachymeter Leica TS12 über diese GNSS-Festpunkte stationiert. Die Koordinaten der Festpunkte befinden sich in den von den Archäologen verwendeten ED50/UTM Zone 36N (EPSG:23036) System. Durch Eingabe von Temperatur und Luftfeuchtigkeit wird die Brechung des Zielstrahls korrigiert. Diese Brechung wird auch Refraktion genannt, die durch unterschiedliche Luftschichten entsteht.

Es werden fünf der Festpunkte angemessen. Von dieser Station werden zwei Prismen im Treppengang und ein Prisma an der Sondage auf Stativen mit Zwangszentrierung in zwei Vollsätzen angemessen. Außerdem werden alle sichtbaren Passpunkte in zwei Lagen aufgemessen. Als nächstes wird das Tachymeter auf Standpunkt 10001 über zwei bekannte Anschlüsse stationiert (9999 und 100002) und es werden wieder alle sichtbaren Passpunkte gemessen. So wird der Polygonzug bis zum Standpunkt 100003 fortgesetzt und durch eine Rückmessung zum ersten Standpunkt (9999) abgeschlossen. Zusätzlich wird nochmals ein Festpunkt (7884) gemessen, um den Polygonzug zu kontrollieren.

Die noch fehlenden Passpunkte, die nicht von den vier Polygonzugspunkten messbar sind, werden gemessen, indem zwischen den Polygonzugspunkten frei stationiert wird (9992-9998). Dabei werden meist zwei Polygonzugspunkte und schon gemessene Passpunkte verwendet. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die Punkte zum Stationieren sich möglichst nicht auf einer Linie befinden, da so das System instabil wird und zu ungenaueren Koordinaten in der Stationierung führt. Das lässt sich in dem schmalen Tunnel jedoch nicht sehr leicht bewerkstelligen, daher wurden meist mehrere Passpunkte verwendet, die möglichst nach Nord und Süd vom Treppengang ausgerichtet sind, um das System stabiler zu lagern.

¹Das Festpunktfeld wird jedes Jahr durch Prof. Dr. Theodor Johannsen geprüft und die durch Wind und Wetter beziehungsweise Erdbewegungen entstandenen Ungenauigkeiten ausgeglichen[fes].

Der erreichte Abschlussfehler bei der Rückmessung zum ersten Standpunkt (9999) von 3 mm ist bedingt durch die warmen Temperaturen und damit einhergehendes Flimmern in der Luft, sodass das Anzielen weiter entfernter Passpunkte sich als etwas schwierig erwies. Eine Beeinflussung des Zielstrahls könnte außerdem bei der Messung von draußen bei starkem Sonnenschein in den schattigen und kühlen Tunnel durch Refraktion auftreten. Außerdem stehen einige Nägel, mit denen die Marken befestigt wurden, etwas aus den Passpunkten heraus, daher könnten ein paar Streckenmessungen zu kurz sein. Im Tunnel musste häufig auf Grund der schleifenden Schnitte zunächst die Strecke mit Hilfe eines Leica Miniprismas gemessen werden und danach die Winkelmessung durch Eindrehen vollzogen werden. Hierbei könnte es zu Aufhaltefehlern gekommen sein.



4. Photogrammetrische Aufnahme

4.1. Die Teilbereiche des unterirdischen Ganges

Der unterirdische Gang wird in die Teilbereiche Eingang, Tunnel, Kammer und Sondage geteilt, da unterschiedliche Aufnahmemethodiken für jeden Bereich erforderlich sind. Diese werden in den folgenden Abschnitten tabellarisch mit Abbildungen dargestellt. Die Kamerapositionen werden dabei durch ein blaues Quadrat gekennzeichnet. Die Richtung der Aufnahme ist anhand des schwarzen Striches ersichtlich, welcher in Richtung des blauen Quadrates zeigt. Diese Abbildung wird auch als Positivabbildung bezeichnet, da das Projektionszentrum sich hinter der Bildebene, welches das blaue Quadrat darstellen soll, befindet.

Bei der Aufnahme wird stets das Bild hinsichtlich Schärfe und Belichtung kontrolliert. Bei einer Fokusänderung zwischen den Bildverbänden wird ein neuer Aufnahmeordner angelegt, um später nachvollziehen zu können, wo eine Umfokussierung stattfand. Um die Parameter der radialen Verzeichnung des Objektivs genauer bestimmen zu können, wird auch darauf geachtet, gelegentlich die Kantung, das heißt in Quer- und Hochformat, zu wechseln. Auf eine vorherige Kamerakalibrierung wird verzichtet, da sehr viele Photos aufgenommen werden und somit die Parameter der radialen Verzeichnung zuverlässig berechnet werden können. Man spricht dabei von einer Simultankalibrierung, bei der die Parameter im Berechnungsablauf der 3D-Rekonstruktion als Näherungswerte eingeführt und mitbestimmt werden.¹

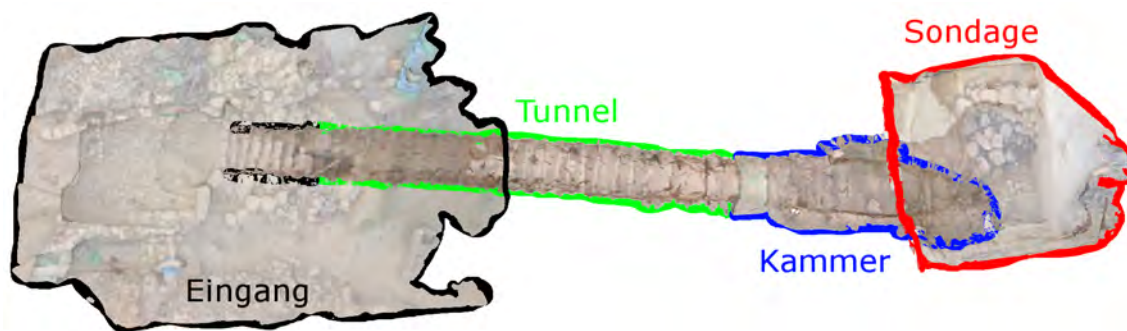


Abbildung 4.1.: Übersicht der Teilbereiche des unterirdischen Ganges

¹vgl. [Pom16], Seite 28ff

4.1.1. Aufnahmemethodiken der Bereiche

Tabelle 4.1.: Aufnahmemethodiken im Eingangsbereich


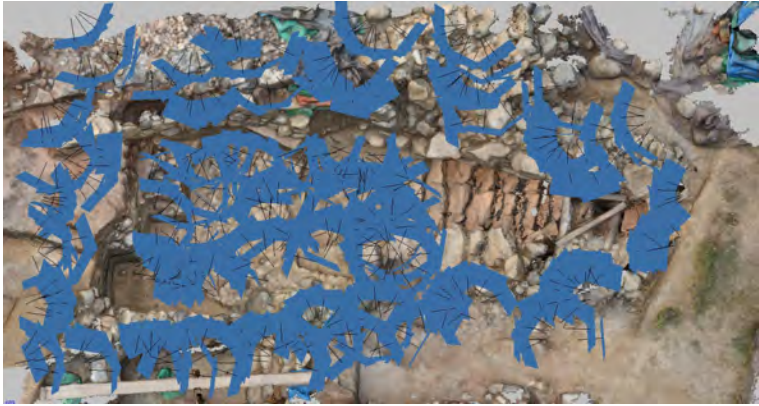
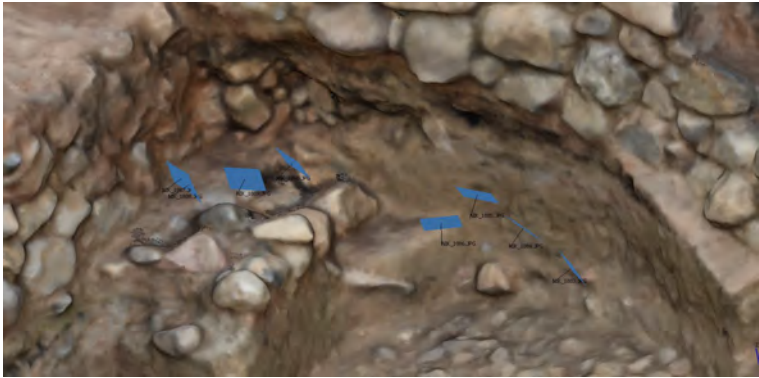
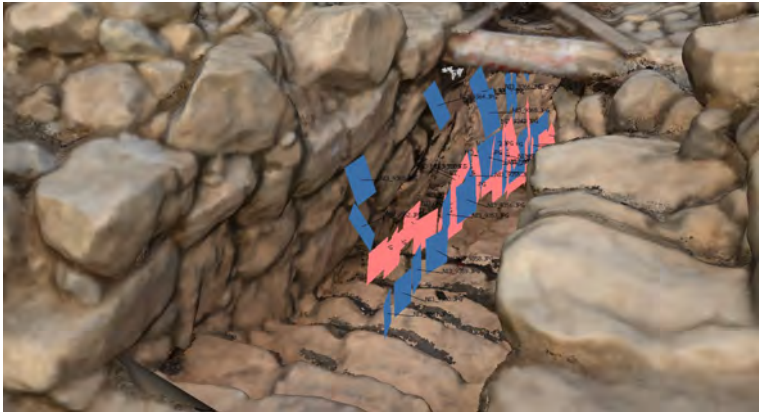
	<p>Stabaufnahmen aus unterschiedlichen Winkeln im Kreis um den Eingangsbereich herum</p>
	<p>Aufnahmen im Stehen und aus der Hocke; im Kreis innen und außen</p>
	<p>Detailaufnahmen (z.B. bei überstehenden Kanten)</p>
	<p>Aufnahme der gegenüberliegenden Seite (nach rechts ist rot, nach links blau) aus 2 Höhen im Hochformat (links, mitte rechts)</p>

Tabelle 4.2.: Aufnahmemethodiken im unterirdischen Treppengang




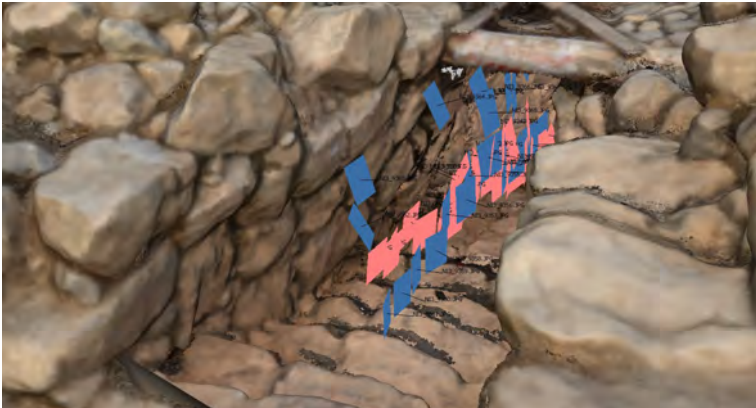
	<p>Spannen eines Maßbandes in der Mitte des Tunnels; Aufnahmen in Form eines Hexagons im Abstand von 20 cm</p>
	<p>Aufnahmen aus allen drei Ecken zur gegenüberliegenden Seite und leicht schräg Richtung Eingangsbereich und Sondage; Vom Boden Richtung Tunnelfirst</p>
	<p>Detailaufnahmen</p>
	<p>Treppenstufen schräg von den Ecken aus Kniehöhe</p>

Tabelle 4.3.: Aufnahmemethodiken in der Kammer

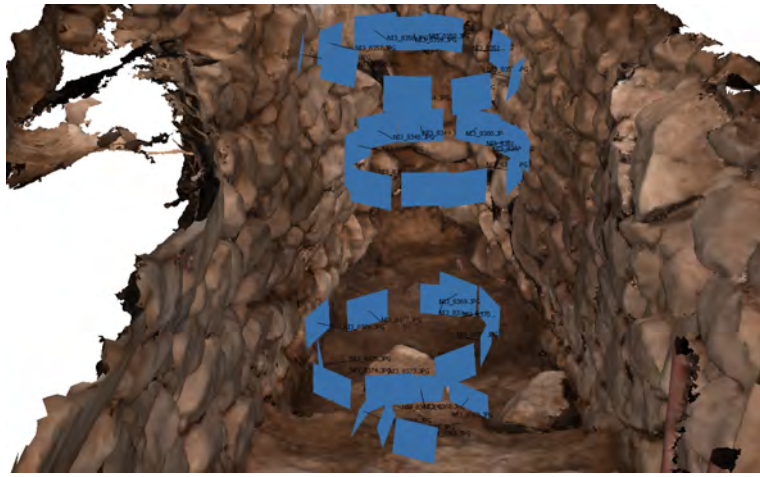
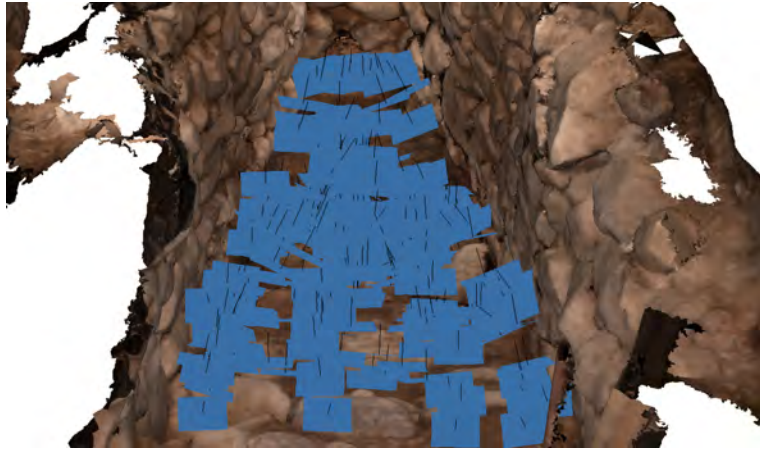
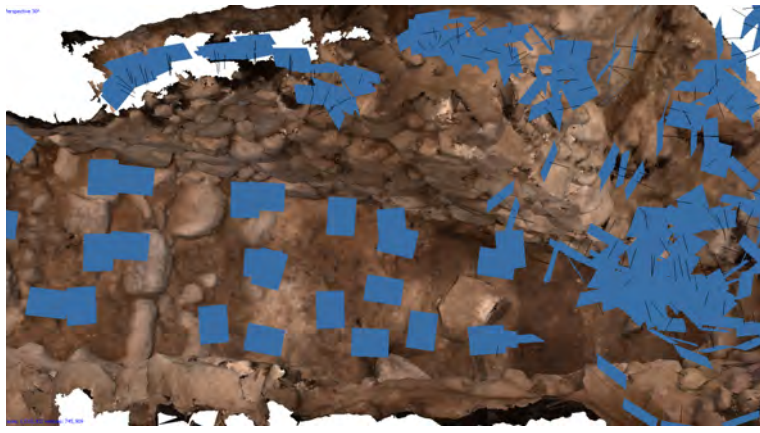
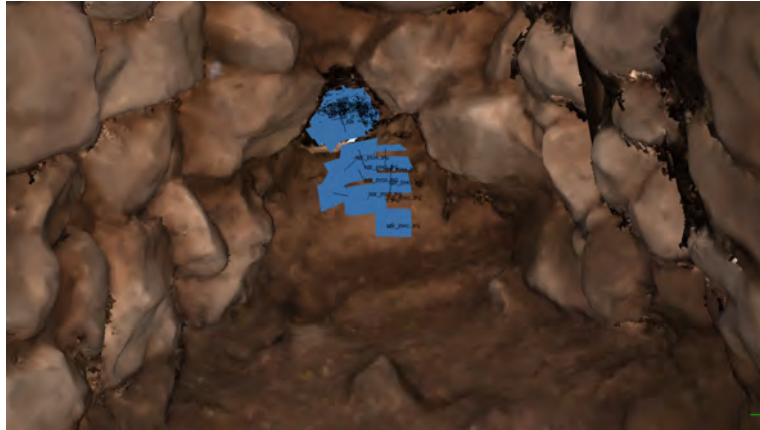
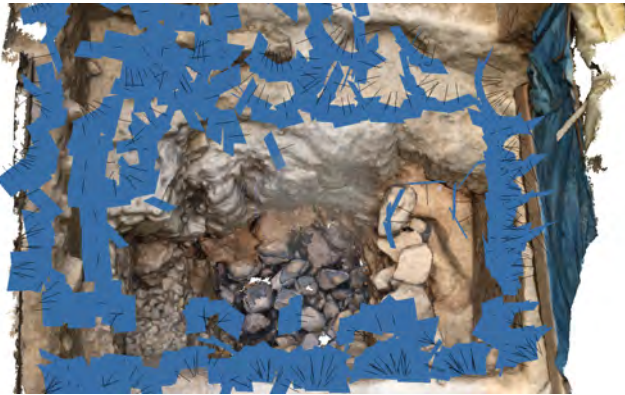
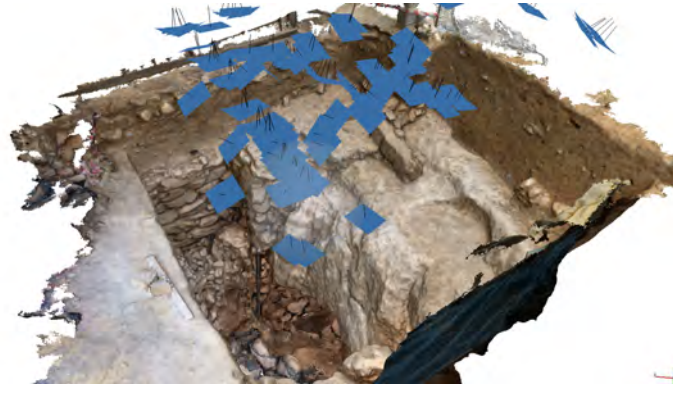
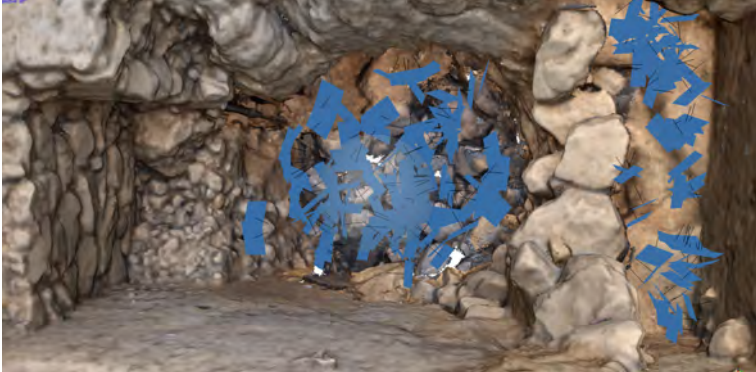

	<p>Innenkreisaufnahmen aus verschiedenen Höhen</p>
	<p>5 Bilder pro Stufe in unterschiedlichen Winkeln, von jeder Stufe die gegenüberliegende Seite von unten schräg hoch, Stufen senkrecht in 3 Winkeln vom First, aus Kopfhöhe frontal schräg auf Stufen in 3 Winkeln, jede Stufe von Kammer bis Eingangsbereich aus 4 Höhen</p>
	<p>Aufnahme der Überwölbung der linken und rechten Seite (auch von Sondage aus) und Aufnahme der Decke</p>
	<p>Aufnahme kleiner Kammerfortsatz</p>

Tabelle 4.4.: Aufnahmemethodiken in der Sondage

	<p>Übersichtsbilder mit Standpunkt Abstand von 100 cm, Außenkreisaufnahmen</p>
	<p>Stabaufnahmen senkrecht in Sondage hinein (3 Aufnahmen pro Standpunkt)</p>
	<p>Innenkreisaufnahmen aus unterschiedlichen Höhen</p>
	<p>Detailaufnahmen der am Boden und erst freigelegten Steine und Ritzen</p>

4.1.2. Besonderheiten der Bereiche

Eingangsbereich

Dieser Bereich befindet sich außen, daher ist die starke Sonneneinstrahlung und damit verbunden ein starker Schattenwurf problematisch. Aus diesem Grund werden die Aufnahmen meist abends bei schwächerer Sonneneinstrahlung oder bei bedecktem Himmel, was sehr selten der Fall war, gemacht.

Tunnel

Die Hauptproblematik im Tunnel ist der sehr enge Querschnitt, der es sehr erschwerte, Übersichtsbilder aus größeren Entfernungen aufzunehmen. Bei dem Versuch mit schrägen Aufnahmen in den Tunnel hinein oder hinaus mehr auf das Bild zu bekommen und so größere Überlappungsbereiche zu erzeugen, scheitert es daran, dass die vorderen Bereiche total überbelichtet sind und die hinteren unterbelichtet. Auch ein Versuch mit einem zusätzlichen ferngesteuerten Blitz ist nicht zufriedenstellend, da so, im Gegensatz zur Aufnahme mit dem auf der Kamera montierten Blitz, ein Schattenwurf entsteht.

Ursprünglich wurde auch geplant, die Bilder aus der Tunnelmitte mit einem schwenkbaren Stativ aufzunehmen (siehe Kapitel 2.1). Jedoch dauert der Aufbau pro Standpunkt recht lange, daher wird beschlossen, aus der Hand zu photographieren. Dafür wird aber pro Standpunkt ein Bild mehr aufgenommen, um zu gewährleisten, dass alle Bereiche aufgenommen werden. Gleichzeitig besteht damit eine größere Überlappung und es ist weniger zeitaufwendig.

Ein weiteres Problem sind die tiefen Fugen zwischen den Steinen. Diese müssen gesondert und in zeitaufwendiger Arbeit aufgenommen werden. Dabei muss auch beachtet werden, dass diese Fugenbilder genug Überlappung zu den anderen Bildern aufweisen, da ansonsten eine Orientierung nicht möglich ist. Zusätzlich wird die Übersichtlichkeit durch die sich schlecht unterscheidbaren Steine erschwert. Daher ist ein systematisches Vorgehen, so wie es zum Beispiel mit einem gespannten Maßband ermöglicht wurde (siehe Abbildung 4.2), zwingend erforderlich.



Abbildung 4.2.: Systematisches Vorgehen am Maßband

Kammer

In der Kammer stellte sich in einem Test in Photoscan heraus, dass der dunkle und feuchte Boden aus Erde nicht in der Punktwolke vorhanden ist. Grund dafür könnte die mangelnde Struktur und die zu unterbelichteten Aufnahmen sein. Da der Boden den Blitz fast vollständig absorbiert, muss auch hier eine geeignete Lösung gefunden werden. Dadurch, dass auf den Aufnahmen immer ein Stück der Tunnelwand sichtbar ist und zusätzlich die Blitzlichtintensität erhöht wird, weisen alle Bilder eine gewisse Struktur auf, die die Software Photoscan erkennen kann. So ist eine Orientierung der Bilder möglich.

Etwas schwer zu erreichen sind auch die recht hohen Seiten der Kammer, die vor der Decke einen Rückstand bilden. Von der Sondage aus wird versucht, diesen Bereich vollständig aufzunehmen.

Sondage

Dieser Bereich befindet sich wie der Eingangsbereich draußen, daher bestehen hier die gleichen Probleme wie in 4.1.1 bereits geschildert. Außerdem musste der Boden der Sondage erneut aufgenommen werden, da nach der ersten Aufnahme die Grabung fortgeführt wurde und mehrere große Steine zum Vorschein kamen. Da im Photoscan-Projekt die Bilder von beiden Epochen eingeladen wurden, entstanden zwei Schichten. Die obere Schicht, hauptsächlich Sandboden, wird daher manuell aus dem Mesh entfernt (siehe Abbildung 5.6).

5. Auswertung

5.1. Netzausgleichung

Die Netzausgleichung wird mit der von Cremer Programmentwicklung GmbH vertriebenen Software CAPLAN durchgeführt. Dafür werden die gemessenen Punkte und Beobachtungen von einer vom Tachymeter exportierten LandXML-Datei geladen. Unerwünschte Punkte und Beobachtungen werden entfernt. Die Zuweisung, welche Punkte als Anschluss gelten und welche Punkte ausgeglichen werden sollen, erfolgt durch Erstellung eines Raumnetzes. Anschlusspunkte sind hierbei die schon vorhandenen GNSS-Festpunkte, die nach Anfrage eine Standardabweichung von 20 mm in Lage und Höhe aufweisen sollen. Da die Standardabweichung der Festpunkte sehr hoch ist, wird sich dafür entschieden, eine freie Ausgleichung durchzuführen. Dazu werden bei der Ausgleichung in CAPLAN die GNSS-Punkte nicht als Anschlusspunkte deklariert und werden somit als normale Beobachtungen gewertet und demnach auch ausgeglichen. Nach Durchführung der Ausgleichung¹ weisen die gemessenen Punkte eine Standardabweichung in Lage von maximal 2.3 mm und in Höhe von 4.8 mm auf. Dieses Ergebnis ist äußerst zufriedenstellend, daher werden die ausgeglichenen Passpunktkoordinaten als .TXT-Datei ausgegeben und für den weiteren Ablauf gespeichert.

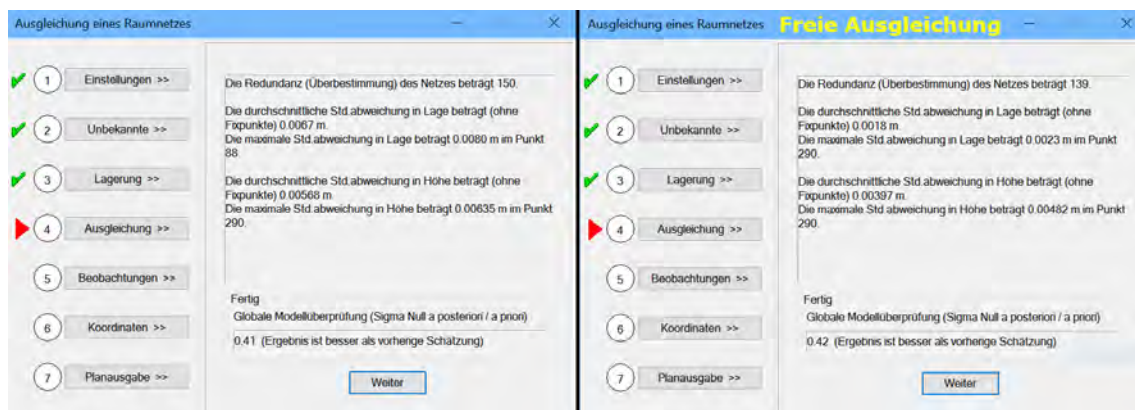


Abbildung 5.1.: Ergebnis der Ausgleichung mit Anschlusspunkten (l.) und der freien Ausgleichung (r.)

¹ Auf den genauen Ablauf einer Ausgleichung wird nicht eingegangen, da der Schwerpunkt dieser Bachelorarbeit die Mehrbildphotogrammetrie ist und den Rahmen der Arbeit sprengen würde.

5.2. Auswertung der photogrammetrischen Aufnahme

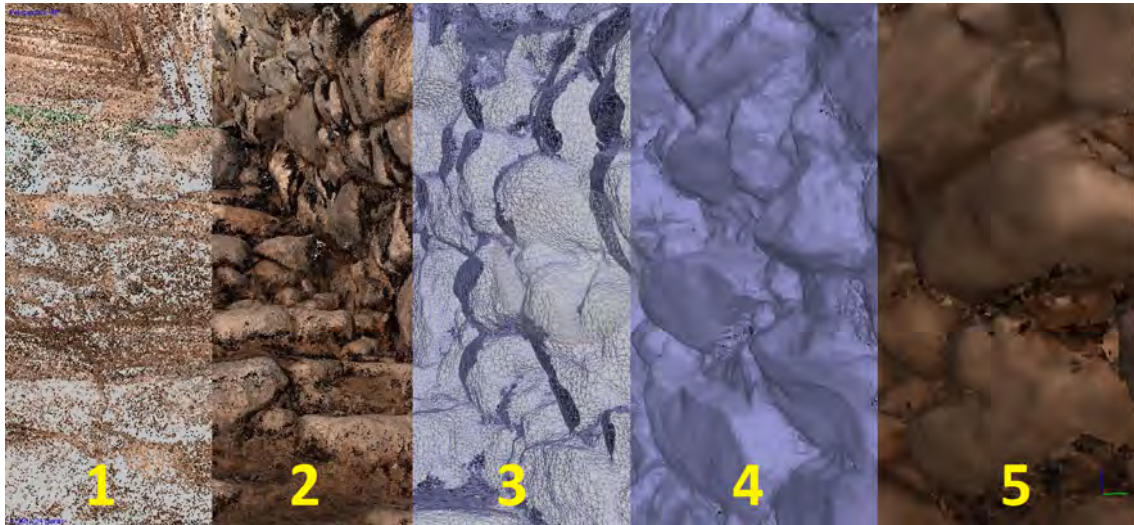


Abbildung 5.2.: Von den Verknüpfungspunkten bis zum Mesh

- 1 Verknüpfungspunktwolke
- 2 Dichte Punktwolke
- 3 Dreiecksvermaschung (Mesh)
- 4 Mesh mit gefüllten Flächen
- 5 Mesh mit eingefärbten Flächen

5.2.1. Orientierung der Bilder

Um die Bilder zueinander zu orientieren, werden diese zunächst in Photoscan eingeladen. Anhand von Mustern in den Grauwerten wird mit Hilfe einer Bündelblockausgleichung (siehe 2.2.3)² eine grobe Punktwolke aus Verknüpfungspunkten berechnet (Abbildung 5.3). Dabei werden die Parameter der inneren Orientierung jedes Bildverbandes bestimmt. Die Parameter der äußeren Orientierung werden zunächst relativ bestimmt. Nach Einladen der Passpunktdatei in einem späteren Schritt wird diese zu einer absoluten Orientierung (siehe Kapitel 2.2.3). Die Punktwolke besteht dabei in etwa aus 5 Millionen Punkten. Hier lässt sich schon leicht erkennen, ob auch alle Bereiche abgedeckt sind und ob und wie viele Bilder korrekt orientiert wurden.

5.2.2. Passpunkterkennung und Optimierung der Orientierung

Die codierten Passpunkte lassen sich in Agisoft Photoscan größtenteils automatisch erkennen. Hierbei werden wieder Muster in den Grauwerten abgeglichen. Da vorher eingestellt wird, wieviel Bit die Passpunkte haben, können diese automatisch erkannt und mit der codierten Zahl benannt werden. Wichtig hierbei ist, dass man die richtige Nummerierung der Passpunkte kontrolliert, da Falschnummerierungen sowie Passpunkt-ähnliche Muster auftreten können. So wurde beispielsweise ein weißes Minarett mit schwarzem Dach im Hintergrund als codierter Passpunkt erkannt.

²Agisoft Photoscan gibt keine Auskünfte über das genaue Bildzuordnungsverfahren, daher wird eine Bündelblockausgleichung angenommen. Eine weitere Möglichkeit wäre eine Korrespondenzanalyse mit Epipolargeometrie ([Luh10], Seite 463ff)

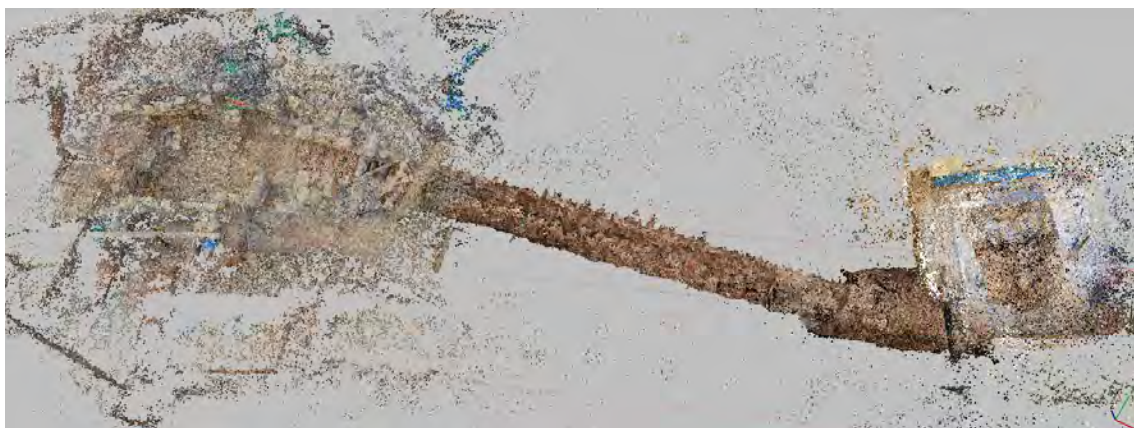


Abbildung 5.3.: Verknüpfungspunkte

Zudem werden oft Passpunkte nicht erkannt, wenn das Bild etwas weiter aus der Ferne aufgenommen wurde, wahrscheinlich bei Entfernungen größer als die im Kapitel 2.1.2 berechneten Abstände zur Passpunktmarke. In der Hilfe von Agisoft Photoscan kann man nachlesen, dass der schwarze Punkt einen Durchmesser von mindestens 10 Pixel besitzen muss, damit dieser automatisch erkannt wird. In langwieriger Arbeit werden die Passpunkte kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert. Für eine genauere Orientierung der Bilder, durch eine höhere Überbestimmung, werden auch viele Passpunkte zusätzlich manuell gemessen und somit in die Berechnung einbezogen. Somit erhalten die Passpunkte zunächst Koordinaten in einem internen Koordinatensystem und man kann sich, dadurch dass eine Überbestimmung vorhanden ist (2.2.3), anzeigen lassen, wie groß die Standardabweichungen zwischen den Bildern sind. Nachdem alle Passpunkte richtig benannt sind und die größten Fehler beseitigt wurden, indem zum Beispiel die Position der automatisch gemessenen Punkte angepasst wurde, kann man nun die in Kapitel 5.1 beschriebenen ausgeglichenen Koordinaten einlesen. Dabei lässt sich einstellen, wie die ASCII-Datei³ formatiert ist. So werden jedem Passpunkt die Koordinaten zugewiesen, die in der .TXT-Datei hinterlegt sind. Die Bezeichnungen der Passpunkte in Photoscan müssen dazu jedoch identisch mit denen in der .TXT-Datei sein. Die Standardabweichungen bezogen auf die nun vorhandenen übergeordneten Koordinaten lassen sich nun auch anzeigen und werden in Metern angegeben. Passpunkte mit einem ungewöhnlich großen Wert deuten auf grobe Fehler hin, beziehungsweise wurde diese Passpunktmarke schlecht gemessen oder ist verrutscht (Im Kapitel 7 wird hierauf genauer eingegangen). Auch jetzt werden wieder grobe Fehler behoben oder in die Berechnung nicht einbezogen, indem sie ausgeschaltet werden. Sieben Passpunkte mit einer hohen Standardabweichung zwischen den übergeordneten Koordinaten oder mit einer hohen Standardabweichung zwischen den Bildern werden ausgeschaltet, sodass ein Gesamtfehler von 12 mm auftritt.

Mit Hilfe der Optimierung (=„Optimize“) wird nun eine Ausgleichung durchgeführt und die Position der Bilder neu berechnet. Dabei werden die Standardabweichungen auf einen Restbetrag von durchschnittlich 10,9 mm dezimiert (siehe Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1.: Endergebnis der Standardabweichung der Passpunkte

Anzahl Passpunkte	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	XY [mm]	Gesamt [mm]	Bilder [pix]
90	5.7	3.7	8.6	6.8	10.9	0.162

³In diesem Fall wird eine .TXT-Datei verwendet

5.2.3. Berechnung der dichten Punktwolke

Die Berechnung der dichten Punktwolke erfolgt in der Qualität „Niedrig“ und der Tiefenfilter wird auf „Aggressiv“ gestellt, um das Rauschen an bestimmten Stellen zu entfernen und somit eine homogenere Punktwolke zu erzeugen. Dadurch, dass die dichte Punktwolke mit dem Tiefenfilter geglättet wurde, wirkt das Mesh, welches im nächsten Abschnitt beschrieben wird, nicht so verzahnt und mit vielen kleinen Spitzen versehen, sondern eher glatt, was den Steinen in der Realität näher kommt. Anhand der orientierten und optimierten Photos werden der Verknüpfungspunktwolke weitere Punkte hinzugefügt. Die resultierende dichte Punktwolke besteht aus circa 128 Millionen farbigen Punkten (Abbildung 5.4).

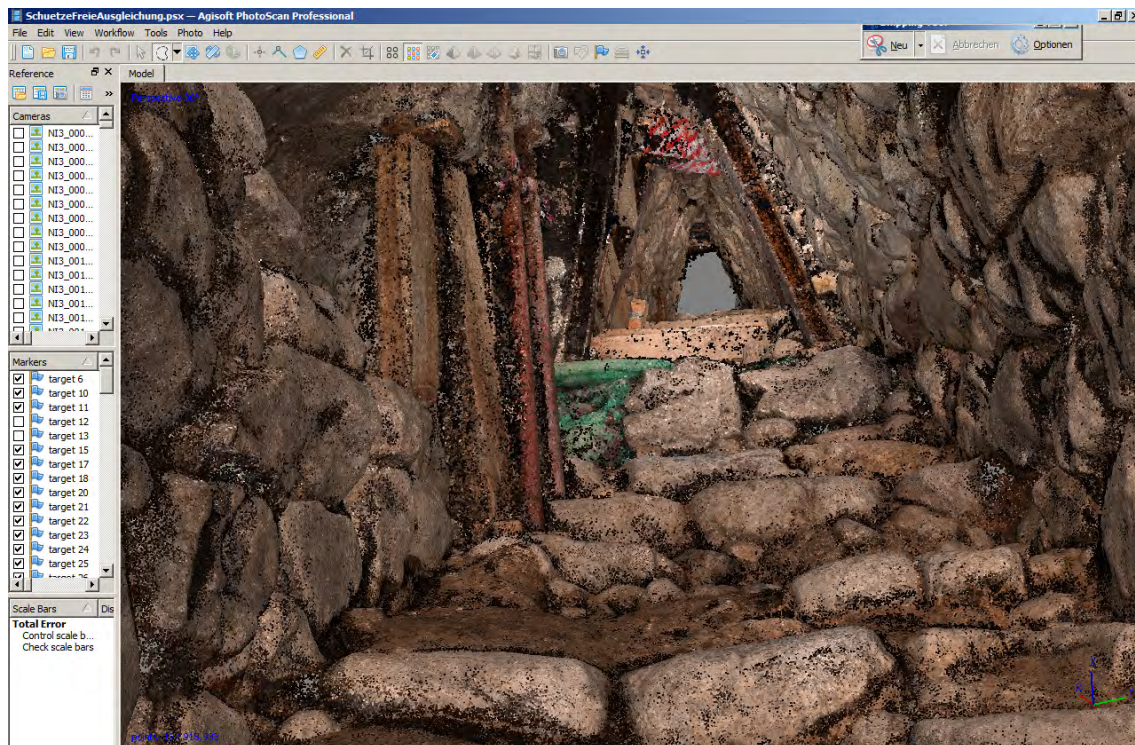


Abbildung 5.4.: Dichte Punktwolke

5.2.4. Berechnung des Meshs

Auf der Grundlage der dichten Punktwolke wird eine Dreiecksvermaschung berechnet. Es entstehen aus den Punkten Dreiecke, die als farbige Flächen dargestellt werden. Der Grauwert der Fläche ist dabei ein Mittelwert aus den Grauwerten der farbigen Punkte. Die ungefähre Anzahl der Dreiecke wird vorher festgelegt und beträgt hier 12,5 Millionen. Das Mesh bildet die Oberfläche für die später erstellten Orthophotos.

Es fällt auf, dass die Grünfläche über dem unterirdischen Gang nicht mehr im Mesh vorhanden ist (Abbildung 5.7). Da der Abstand zwischen den Punkten recht groß ist, entstehen auch größere Dreiecke. Bei der Berechnung des Meshs werden diese jedoch herausgefiltert und gelöscht.

Im oberen Bereich des Tunnels, im Übergang zum Eingangsbereich sind Lücken in den Stufen oder auch Störpixel sichtbar. Diese Stufen sind durch ihre sehr glänzende Oberfläche, da sie scheinbar besonders ausgetreten wurden, photogrammetrisch schwer erfassbar.

Bevor das Mesh texturiert wird, sollte es noch bearbeitet werden. Flächen, die durch Störpunkte entstanden sind, werden entfernt. Wie in Kapitel 4.1.2 schon erläutert, musste der Sandboden in der Sondage entfernt werden, um die darunterliegenden Steine und damit den aktuelleren Stand der Grabung sichtbar zu machen.

Die Dreiecksvermaschung wurde ohne Interpolation berechnet, aus diesem Grund hat das Mesh diverse Löcher und Lücken, die man mit Hilfe der Funktion „Löcher schließen“ auffüllen kann. Dabei sollte die Größe der neu zu bildenden Dreiecke nicht zu groß gewählt werden, da ansonsten ungewollte und sehr große Flächen entstehen, die mitten im Raum stehen.

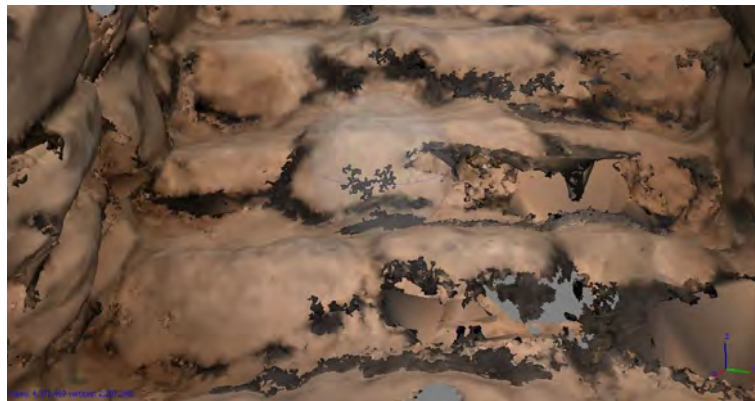


Abbildung 5.5.: Durch das Glänzen der Stufen kommt es zu Störpixeln und Lücken

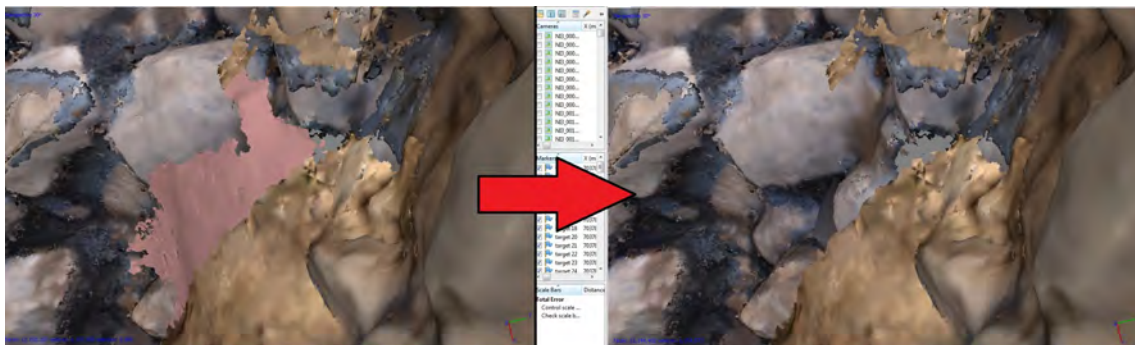


Abbildung 5.6.: Entfernung der Sandschicht

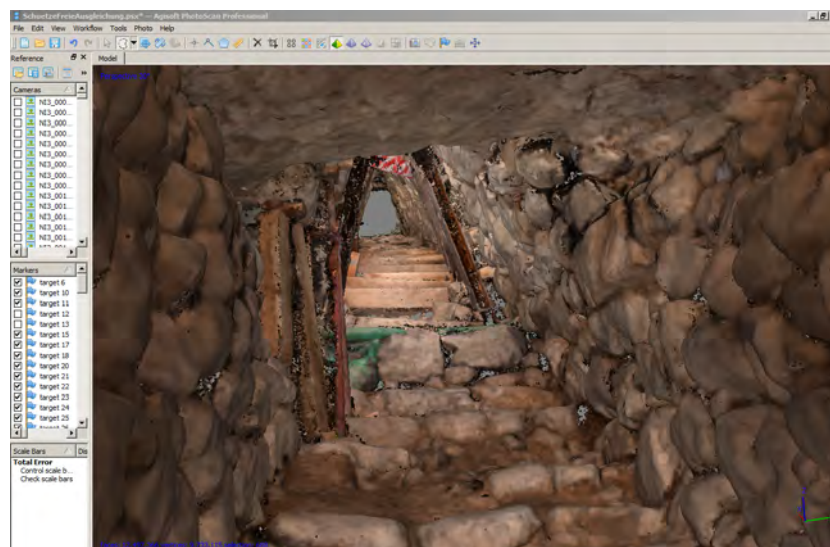


Abbildung 5.7.: Bearbeitetes Mesh

5.2.5. Texturierung des Meshs

Da die Flächen des Meshs bisher nur einfarbig dargestellt werden, kann man nun die aufgenommenen Photos auf diese Dreiecke hinterlegen. Die Photos wurden aus unterschiedlichen Winkeln aufgenommen, daher ist es notwendig, dass diese vorher entzerrt werden. Diese Entzerrung berechnet Photoscan automatisch bei der Berechnung der Texturierung.

Ursprünglich ist geplant, wie auch bei den vorherigen Schritten, alle Bereiche zusammen zu texturieren und ein fertiges Gesamtmodell zu generieren. Die erste Berechnung der Texturierung lief circa 500 Stunden, kann jedoch nicht fertig gestellt werden, da auf Grund eines Stromausfalles das Programm beendet wurde und der Fortschritt nicht gespeichert werden konnte. Beim zweiten Versuch wurde die Berechnung fertig gestellt, konnte jedoch wegen eines Programmabsturzes nicht gespeichert werden. Es liegt die Vermutung nahe, dass das Modell mit der Texturierung zu groß ist und daher in kleineren Bereichen durchgeführt werden muss. So wird der Eingangsbereich ausgedockt und die Texturierung in einem neuen Photoscanprojekt berechnet. Nach erfolgreicher Fertigstellung ist das Modell kaum noch betrachtbar, da jegliches Drehen und Schwenken zum minütigen Einfrieren des Programmes führen. Bei näherem Betrachten fällt zudem auf, dass die Texturierung sehr verpixelt ist, also die Pixelanzahl zu klein gewählt wurde (siehe Abbildung 5.8 links).

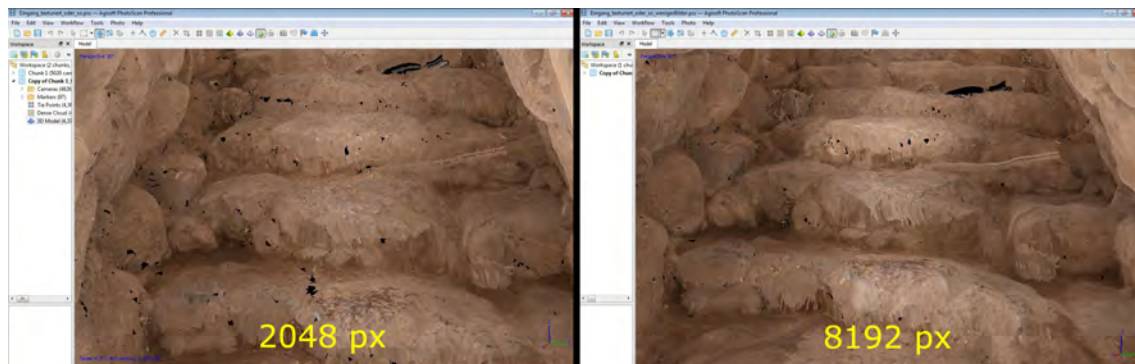


Abbildung 5.8.: Verpixelte Texturierung

Nach erneuter Berechnung mit höherer Auflösung kam es zu keiner wesentlichen Verbesserung im Tunnelleingangsbereich (siehe Abbildung 5.8 rechts). Im Eingangsbereich außerhalb des Tunnels sieht die Texturierung relativ in Ordnung aus (Abbildung 6.3), ist aber durch die sehr abgehackte Änderung der Perspektive trotz eines äußerst leistungsstarken PCs kaum brauchbar für weitere Analysen oder für eine einfache Betrachtung. Beim Prüfen des Leistungsmonitors des PCs kommt eine Leistungseinschränkung durch den Arbeitsspeicher (Auslastung 10-20%) oder durch die CPU (Auslastung etwa 6%) nicht in Frage. Eine Beschränkung, durch die Grafikkarten oder eventuell sogar durch das Programm selbst, wäre denkbar. Agisoft Photoscan bietet die Möglichkeit, die Texturierung in mehreren Dateien zu speichern, um die Anzeigeleistung zu steigern und den Arbeitsspeicher zu schonen. Eine Einstellung von vier oder mehr zu erzeugende sogenannter „Texturierungsatlanten“ brachte keine Besserung, bei 24 Atlanten wurde die Berechnung mit der Fehlermeldung „Not enough memory“ abgebrochen. Aus genannten Gründen wird von einer weiteren Texturierung der anderen Bereiche abgesehen.

5.2.6. Erstellung der Orthophotos

Vor der Berechnung des Orthophotos muss die Projektionsebene, auf die die Bilder entzerrt werden, festgelegt werden, indem man vorhandene Punkte verwendet oder drei neue Punkte erstellt. Für den Längsschnitt entlang des „Tunnelfirstes“, werden auf der ersten und letzten Treppenstufe ein Punkt und ein dritter 3 m über dem zweiten Punkt per Koordinateneingabe erstellt. So wird

gewährleistet, dass der Schnitt exakt orthogonal zur Horizontalebene, jedoch nicht entlang der YZ-Ebene verläuft (Abbildung 5.9). Dagegen werden für die Orthophotos des Eingangsbereiches und der Sondage die XY-Projektionsebene verwendet.

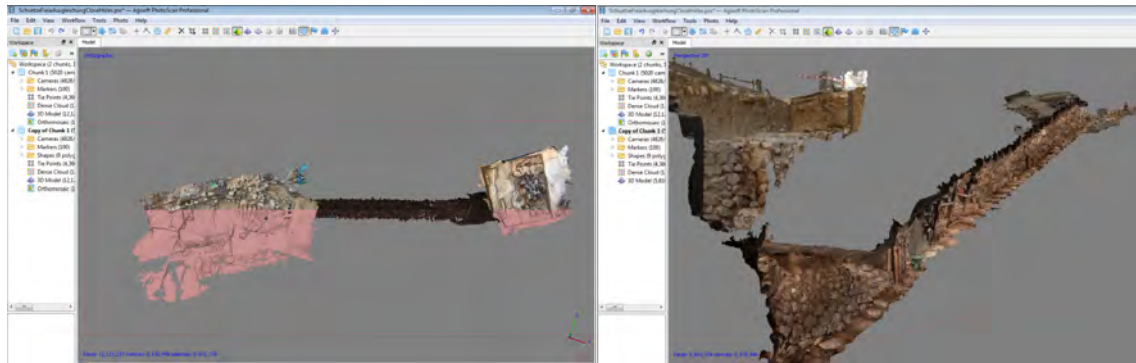


Abbildung 5.9.: Teilung des Meshs entlang des Tunnelfirstes

Die Pixelgröße des Orthophotos wird auf 2 mm gestellt, da sich so die resultierende .TIF-Datei später einfach in Adobe Illustrator, durch Eingabe von 250px/cm beim Importieren, im geforderten Maßstab von 1:50 befindet. Die resultierende Auflösung ist für einen Druck im geforderten Maßstab ausreichend und erfordert eine geringe Berechnungszeit von circa zwei Stunden.

Es entsteht ein Orthophoto mit automatisch erzeugten Bildrandlinien⁴ (Abbildung 5.10). Die Linien stellen dabei die Begrenzungslinien der Photos dar, die für das Orthophoto verwendet und entzerrt wurden. Bereiche, die schlecht gegliedert wurden, zum Beispiel eine überbelichtete Aufnahme neben einer unterbelichteten, oder unscharfe Bereiche können manuell bearbeitet werden. Dazu wird ein Polygon um den gewünschten Bereich gezogen und es lässt sich aus einer Liste das gewünschte Photo selektieren. Wenn der Bereich aus mehreren Bildern neu berechnet werden soll, lässt sich das durch eine Mehrfachselektion durchführen. Das oder die selektierten Photos werden dabei auch an die Helligkeit des Bereiches um das Polygon herum angepasst, um das Gesamtbild zu vereinheitlichen. Bei den Längsschnitten kam es zu einer Spiegelung der Darstellung, deshalb mussten diese nochmal mit Hilfe eines anderen Programmes richtig gespiegelt abgespeichert werden.

Die fertig bearbeiteten Orthophotomosaiken sind in Kapitel 6.4 auffindbar.

5.2.7. Berichtausgabe

Agisoft Photoscan bietet die Möglichkeit, einen zusammenfassenden Bericht zu erstellen. Darin enthalten sind viele wichtige Informationen, wie die Kamerakalibrierungen, die Ergebnisse der Ausgleichung und die Prozessierungsparameter für die Berechnungen.

Pro Bildverband werden die Parameter der radialen Verzeichnisse berechnet und die radiale Verzeichnungskorrektur als vektorielle Darstellung angezeigt. Beispielhaft ist in der Abbildung 5.11 links die vektorielle Darstellung der radialen Verzeichnungskorrektur eines Bildverbandes mit 7 Bildern und rechts mit 257 Bildern dargestellt.

Die Verzeichnungen des Bildverbandes mit 7 Bildern sind sehr viel größer (man beachte auch den Pixelmaßstab) und unregelmäßig verteilt, wohingegen bei dem Bildverband mit 257 Bildern ein Muster erkennbar wird. In der Mitte des Bildes und außen bestehen die größten radialen Verzeichnungen. Es handelt sich hierbei um eine tonnenförmige Verzeichnung, die häufig bei Weitwinkelobjektiven auftritt. Daraus folgt, dass ein Bildverband mit vielen Bildern zu einer genaueren Berechnung der radialen Verzeichnisse führt. Bei Projekten mit kleineren Bildverbänden, zum

⁴ engl. = „Seamlines“

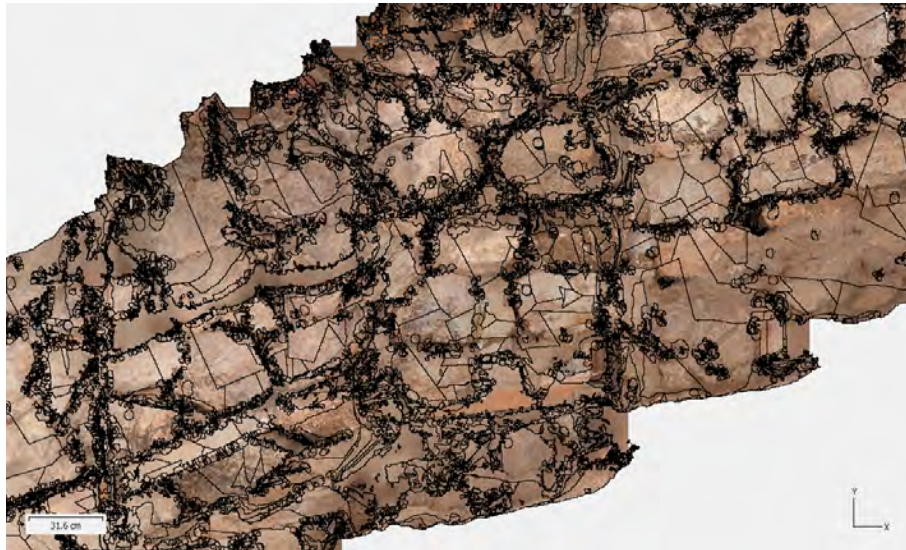


Abbildung 5.10.: Automatisch erstellte Seamlines

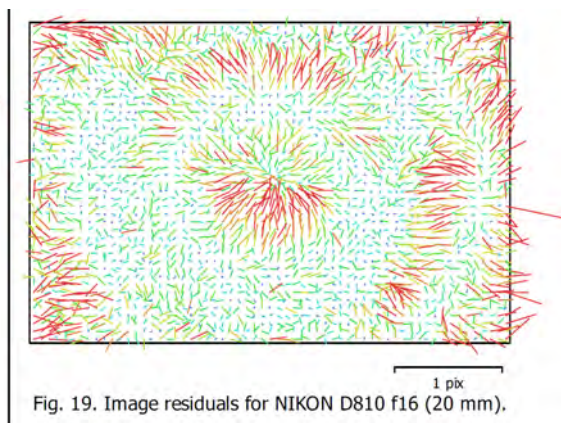
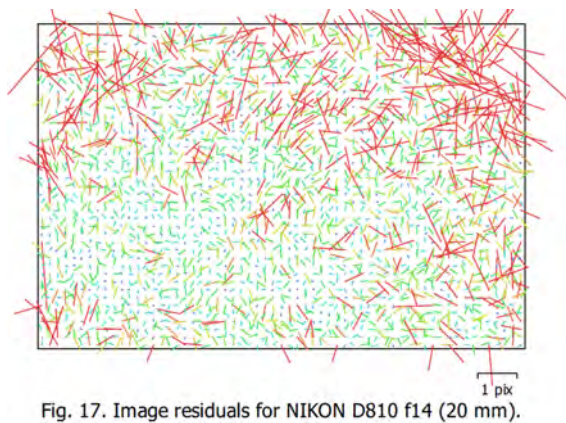


Abbildung 5.11.: Vektorielle Darstellung der radialen Verzeichnungskorrektur

Beispiel durch häufiges Umfokussieren, sollte eine Kamerakalibrierung mit Hilfe eines Testfeldes durchgeführt werden.

Weiterhin werden im Bericht pro Bildverband die Kalibrierungskoeffizienten und eine Korrelationsmatrix ausgegeben (Abbildung 5.12).

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	P1	P2
K3	-0.00693515										
F	4265.74	0.02	1.00	0.02	0.01	-0.24	0.04	-0.28	0.32	-0.01	0.06
Cx	33.5141	0.028		1.00	-0.13	0.04	0.07	0.01	-0.01	0.88	-0.09
Cy	-15.4648	0.027			1.00	-0.06	-0.07	-0.01	0.01	-0.10	0.78
B1	-0.172862	0.0083				1.00	-0.02	-0.08	0.04	0.07	-0.06
B2	-0.0959394	0.0078					1.00	0.00	-0.01	0.05	0.02
K1	-0.0458076	9.1e-06						1.00	-0.95	0.01	0.01
K2	0.0278946	9e-06							1.00	-0.00	-0.01
P1	-0.000183255	1.9e-06								1.00	-0.08
P2	-0.000600265	1.6e-06									1.00

Abbildung 5.12.: Kalibrierungskoeffizienten und Korrelationsmatrix

F Brennweite**Cx, Cy** Koordinaten des Bildhauptpunktes**K1 - K4** Radiale Verzeichnung**P1 - P4** Tangentiale Verzeichnung

Die Verzeichnungsanteile werden mit dem Brown'schen Modell beschrieben, welche aus radial-symmetrischen, radial-asymmetrischen und tangentialen Verzeichnungen bestehen. Die Korrektur wird erst entlang der Hauptpunktlage, dann in Form eines Polynoms höherer Ordnung angebracht.⁵[Bro66]

Der Abbildung 5.12 lässt sich entnehmen, dass Cx relativ hoch mit P1 und K1 mit K2 korrelieren, da ein Wert gegen 1 oder -1 angegeben wird und somit eine lineare Abhängigkeit zu erkennen geben. Ähnliche Werte tauchen auch bei den anderen Bildverbänden auf. Um eine Überparametrisierung zu verhindern, sollten diese nicht signifikanten Parameter P1 und K2 in der Berechnung der Kalibrierung nicht mit einbezogen werden. Außerdem können hohe Korrelationskoeffizienten zu einer numerisch instabilen Inversion der Normalgleichungsmatrix und somit der Lösung führen.⁶

⁵vg. [Pom16], Seite 29ff

⁶vg. [Luh10], Seite 155; 92

6. Ergebnisse

6.1. 3D-Punktwolke

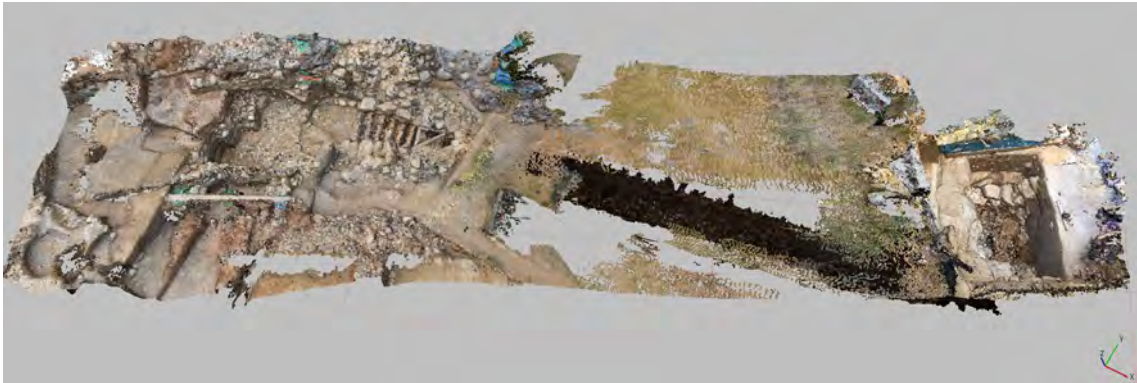


Abbildung 6.1.: Dichte Punktwolke

Die georeferenzierte dichte Punktwolke besteht aus 128 Millionen farbigen Punkten. Jeder Punkt hat X-Y-Z-Koordinaten im ED50/UTM Zone 36N (EPSG:23036) System. Dieses Koordinatensystem wird von den Archäologen verwendet.

6.2. Mesh



Abbildung 6.2.: Mesh

Das Mesh besteht aus 12 Millionen farbigen Dreiecken und ist ebenfalls georeferenziert. Das Mesh lässt sich zur weiteren Bearbeitung oder Ansicht exportieren, beispielsweise auch als 3D-PDF-Datei. Da hier Leistungsgrenzen bestehen, sollte nur ein Ausschnitt exportiert werden, andernfalls lässt sich die PDF-Datei nicht anzeigen. Als Beispiel wird eine 3D-PDF-Datei der Sondage auf der SD-Karte der Arbeit beigelegt.

6.3. Texturiertes Mesh



Abbildung 6.3.: Texturierung des Eingangsbereiches im Vergleich zu einer Aufnahme

Auf Grund der in Kapitel 5.2.5 genannten Probleme, ist nur eine Texturierung des Eingangsbereiches vorhanden. Diese kommt der Realität schon relativ nahe, ist aber nicht benutzbar, da das Ändern der Perspektive, wie es ohne Texturierung problemlos möglich ist, zu einer Geduldsaufgabe wird.

6.4. Orthophotomosaik

Für alle Orthophotos werden Pläne im Maßstab von 1:50 mit der Software Adobe Illustrator erstellt. Die Pläne werden der Arbeit digital und analog beigelegt.



Abbildung 6.4.: Orthophoto des Eingangsbereiches

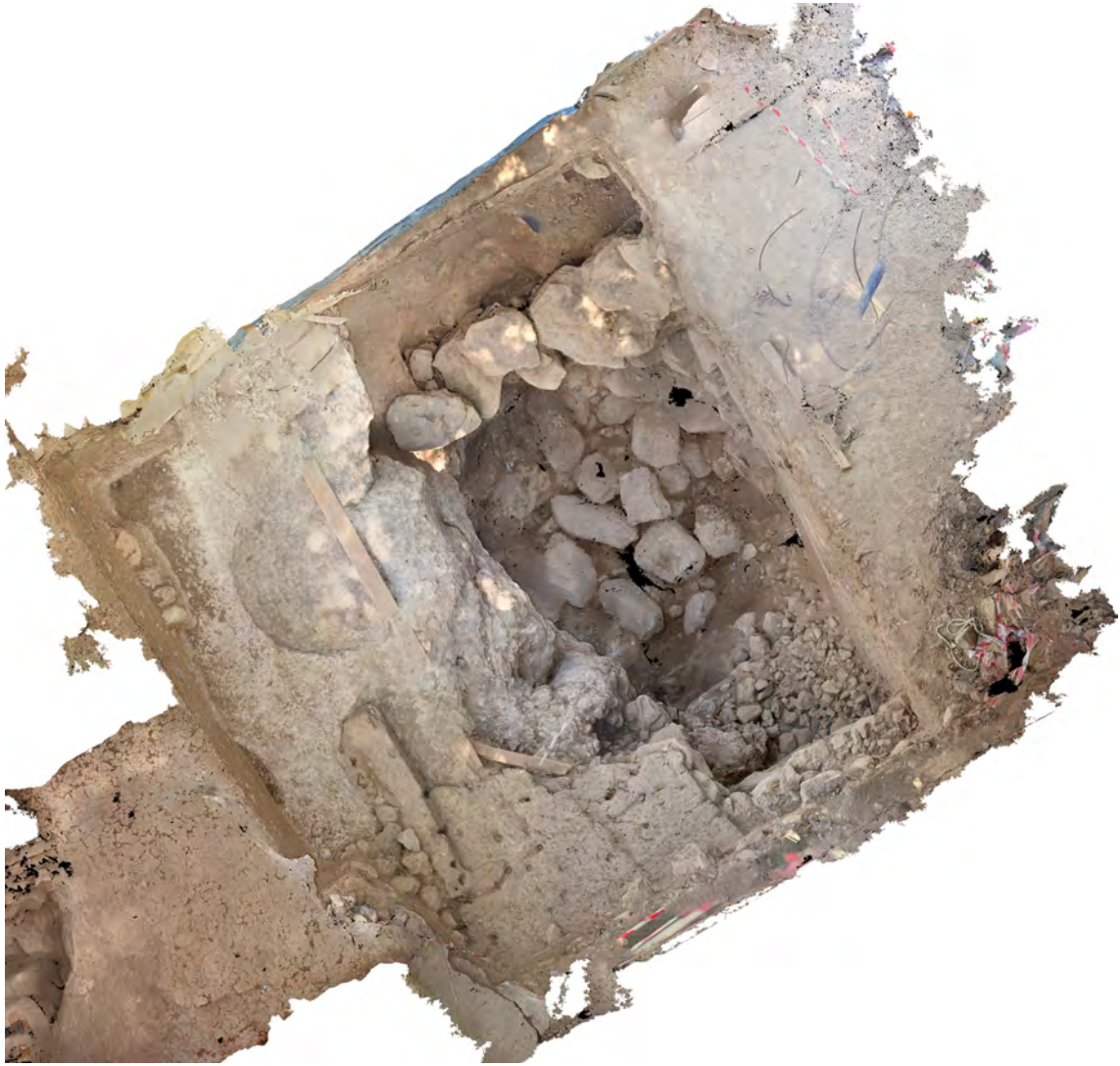


Abbildung 6.5.: Orthophoto der Sondage

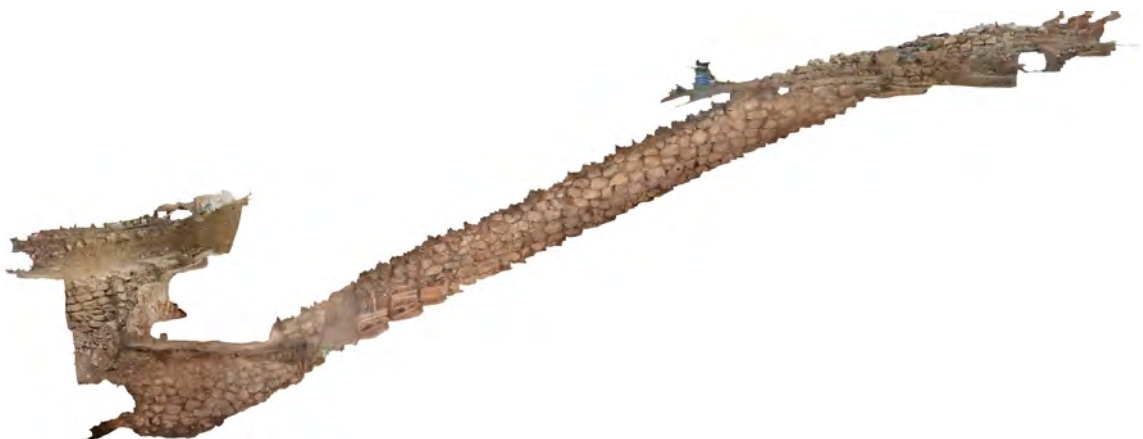


Abbildung 6.6.: Orthophoto der südlichen Wand des unterirdischen Ganges

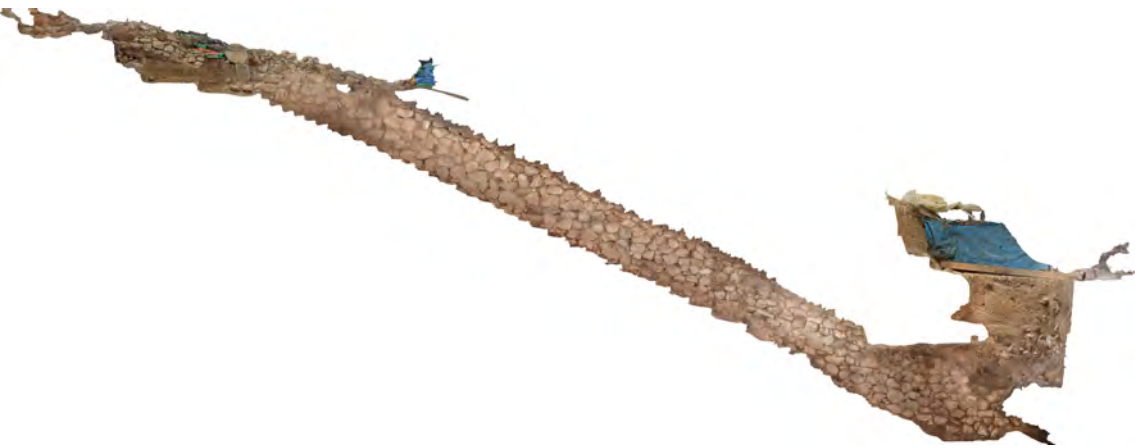


Abbildung 6.7.: Orthophoto der nördlichen Wand des unterirdischen Ganges

6.5. Genauigkeitsanalyse

Die erreichte Genauigkeit des erstellten Modells wird mit vier mit Maßband gemessenen Strecken zwischen Passpunktmarken geprüft. Der Unterschied zwischen mit Maßband gemessener Strecke und im Modell gemessener Strecke ist in der Abbildung 6.8 ersichtlich. Die in Kapitel 5.2.2 berechnete Standardabweichung von 10.9 mm spiegelt sich in der Strecke im Tunnel zwischen Passpunkt mit der Nummer 15 und 120 wieder. Der Durchschnitt liegt jedoch nur bei etwas mehr als der Hälfte der Genauigkeitsanforderung. Strecken die im Eingangsbereich oder in der Sondage gemessen wurden, weisen dagegen eine kleinere Standardabweichung auf.

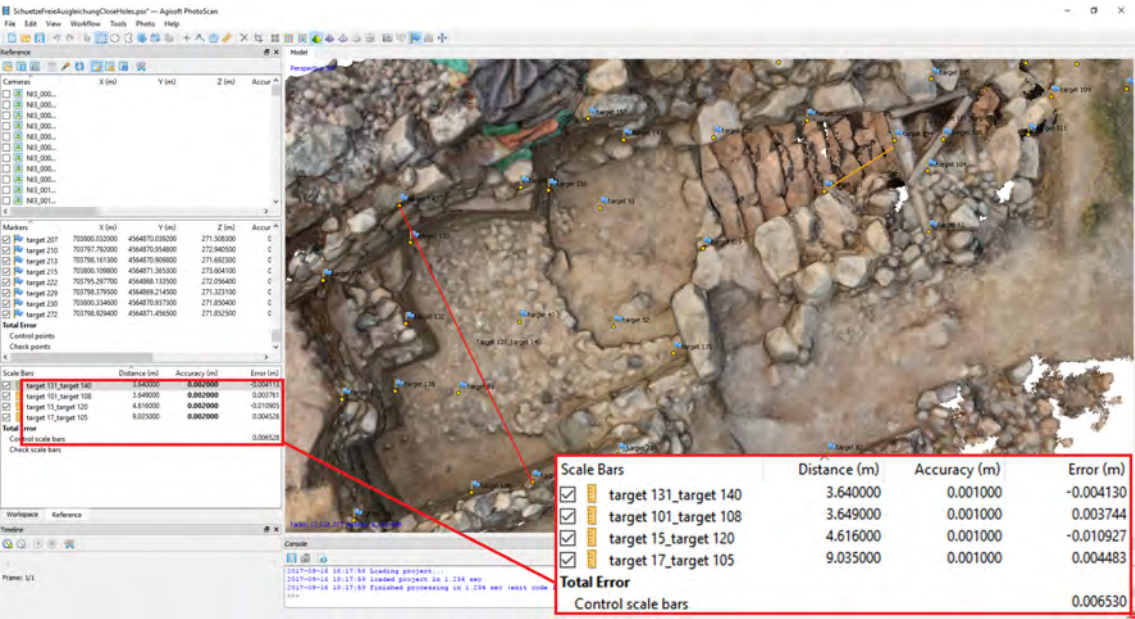


Abbildung 6.8.: Messung von Strecken im Modell

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die im Kapitel 1.2 errechnete Genauigkeitsanforderung von 1 cm wurde knapp, aber um einen Millimeter überschritten. Dies betrifft aber nur den Bereich in der Mitte des Tunnels, im Eingangsbereich und in der Sondage ist mit einer Genauigkeit von unter 1 cm zu rechnen, was die Streckenmessungen mit einem Maßband (siehe Kapitel 6.5) belegen. Daher ist es möglich, dass kleinere Abweichungen auf den Orthophotos messbar, jedoch mit dem bloßen Auge kaum erkennbar sind. Hätte man weitere Passpunkte bei der Berechnung der Ausgleichung ausgeschlossen, käme es zu einem genaueren Zahlenergebnis, welches aber die reale Genauigkeit wahrscheinlich nicht verbessert hätte, da die Koordinaten der Passpunktmarken mit einer Genauigkeit von unter 5 mm bestimmt wurden. Im Kapitel 5.2.7 wurde auf eine Überparametrisierung hingedeutet, da die Modellberechnung schon weiter durchgeführt wurde und die Bedeutung der Zahlenwerte im Bericht der Korrelationsmatrizen sich erst später ergab, wurde die Optimierung mit angepassten Parametern nicht nochmals durchgeführt. Hier wäre eventuell noch eine Genauigkeitssteigerung möglich. Grund für eine Abweichung, zusätzlich zu denen im Kapitel 3.1.2 genannten, könnte auch ein leichtes Erdbeben gewesen sein, welches zwischen den Messungen auftrat und Holzkeile, an denen auch Passpunktmarken befestigt wurden, heraustrieb.

Durch ein systematisches Vorgehen und Anwenden verschiedener Methodiken wurde eine hohe Überlappung der Bilder gewährleistet, sodass kaum Lücken im Modell und auf den Orthophotos auftreten.

Die entstandene Punktwolke, die Orthophotomosaik und Modelle bieten Archäologen eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Analyse und Visualisierung des unterirdischen Ganges. Die Orthophotos wurden mit einer Pixelgröße von 2 mm generiert, was ausreichend für einen Plot im Maßstab von 1:50 ist. Jedoch wird bei vergrößerter Betrachtung am Computermonitor eine Verpixelung sichtbar, daher sollte bei Bedarf eine Neuberechnung mit kleinerer Pixelgröße durchgeführt werden.

Unterschiedliche Versuche mit der Texturierung mit Agisoft Photoscan im Kapitel 5.2.5 haben gezeigt, dass noch technische Grenzen bestehen. Inwiefern sich diese Texturierung optimieren lässt, um flüssig und ansehnlich dargestellt zu werden, und mit welcher Software das eventuell besser möglich ist, gilt es noch zu untersuchen. Eine testweise erneute Berechnung des Meshs mit verdoppelter Dreiecksanzahl führte zu einem unproblematisch drehbaren Modell, welches eine höhere visuelle Auflösung aufweist und stärker einer Texturierung ähnelt. Eine weitere Untersuchung, ob mit einer noch viel höheren Dreiecksanzahl ein Mesh entsteht, welches dem texturierten Modell gleicht und gleichzeitig drehbar ist, käme in Frage. Dieses Modell wäre unter Umständen im Bereich der Virtual/Augmented Reality anwendbar. Die Beuth Hochschule besitzt eine sogenannte „Cave“, in der das Modell eventuell importiert werden kann und per Augmented Reality in 3D durchfliegen werden könnte. Allgemein könnte der Bereich der Visualisierung des unterirdischen Ganges oder ähnlicher Modelle Thema einer weiteren Abschlussarbeit sein.

In Hinblick auf die im Kapitel 1.3 beschriebenen Erwartungen wurde der Umgang mit Tachymeter, Kamera und der Auswertesoftware Agisoft Photoscan in der Praxis gefestigt und zudem wurden viele neue Kenntnisse und Erfahrungen gesammelt. Der Weg zum Ergebnis von der Planung bis zur Auswertung und Analyse gestaltete sich stellenweise als äußerst schwierig, häufig auch durch lange Berechnungszeiten des Computers. Es wurden jedoch immer Lösungen oder Lösungsansätze gefunden, um ansehnliche Ergebnisse zu erzielen.

A. Anhang

A.1. Register der gespeicherten Daten

Beigelegter Datenträger

- 1_ Bachelorarbeit
 - Bachelorarbeit als PDF
 - Zusammenfassung für Internetpräsenz als TXT
- 2_ Orthophotopläne
 - 4 Orthophotopläne des unterirdischen Ganges im Maßstab 1:50 als PDF
- 3_ Punktwolke
 - Dichte Punktwolke des unterirdischen Ganges (Agisoft Photoscan Export) im Format TXT
- 4_ 3D-PDF
 - Eine beispielhafte 3D-PDF-Datei der Sondage
- 5_ Anhang
 - Tagebuch der Messkampagne
 - Processing Report von Agisoft Photoscan

Zusätzlich wurden die Daten in der gleichen Struktur auf dem Hochschulnetzlaufwerk im Photogrammetrielabor der Beuth Hochschule Berlin *photo2/Bachelor_SS17/BA_Schütze_Abgabe* hinterlegt.

Abbildungsverzeichnis

1.1. Lage von Nerik im Hethiterreich und der umliegenden Reiche[ner]	2
2.1. Überlappung	6
2.2. 12-Bit codierter Passpunkt	7
2.3. Bildentstehung an einer Linse[Len11]	8
2.4. Das Belichtungsdreieck[bel]	9
2.5. Parameter der inneren Orientierung[Bre16]	10
2.6. Parameter der äußeren Orientierung[aeu]	11
2.7. Bündelblockausgleichung[bue]	11
2.8. Übersicht über die Kameras des Photogrammetrielabors[Beu17]	13
3.1. Netzplan der Stationierungen und Messungen	16
4.1. Übersicht der Teilbereiche des unterirdischen Ganges	17
4.2. Systematisches Vorgehen am Maßband	22
5.1. Ergebnis der Ausgleichung mit Anschlusspunkten (l.) und der freien Ausgleichung (r.)	25
5.2. Von den Verknüpfungspunkten bis zum Mesh	26
5.3. Verknüpfungspunkte	27
5.4. Dichte Punktwolke	28
5.5. Durch das Glänzen der Stufen kommt es zu Störpixeln und Lücken	29
5.6. Entfernung der Sandschicht	29
5.7. Bearbeitetes Mesh	29
5.8. Verpixelte Texturierung	30
5.9. Teilung des Meshs entlang des Tunnelfirstes	31
5.10. Automatisch erstellte Seamlines	32
5.11. Vektorielle Darstellung der radialen Verzeichnungskorrektur	32
5.12. Kalibrierungskoeffizienten und Korrelationsmatrix	33
6.1. Dichte Punktwolke	35
6.2. Mesh	35
6.3. Texturierung des Eingangsbereiches im Vergleich zu einer Aufnahme	36
6.4. Orthophoto des Eingangsbereiches	37
6.5. Orthophoto der Sondage	38
6.6. Orthophoto der südlichen Wand des unterirdischen Ganges	38
6.7. Orthophoto der nördlichen Wand des unterirdischen Ganges	39
6.8. Messung von Strecken im Modell	39

Tabellenverzeichnis

2.1. Technische Daten des Leica TS12[Lei11]	12
2.2. Technische Daten der Nikon D810 Kamera[d81]	12
4.1. Aufnahmemethodiken im Eingangsbereich	18
4.2. Aufnahmemethodiken im unterirdischen Treppengang	19
4.3. Aufnahmemethodiken in der Kammer	20
4.4. Aufnahmemethodiken in der Sondage	21
5.1. Endergebnis der Standardabweichung der Passpunkte	27

Literaturverzeichnis

- [aeu] Äußere Orientierung.
http://ivvgeo.uni-muenster.de/vorlesung/FE_Script/Bilder/abb3_9_2a.gif
Eingesehen am 12.09.2017.
- [bel] Belichtungsdreieck.
http://www.canon.de/youconnect_newsletter/tutorials/creative_exposure/
Eingesehen am 05.09.2017.
- [Beu17] Beuth Hochschule für Technik, Berlin. *Crashkurs Photographie*, 2017.
- [Bre16] Michael Breuer. *Grundlagen der Luftbildmessung - Innere Orientierung*. Beuth Hochschule für Technik, Berlin, 2016.
- [Bro66] Duane C. Brown. Photogrammetric engineering. *Decentering Distortion of Lenses*, pages 444–462, 1966.
- [bue] Bündelblockausgleichung.
<http://www.katja-kroenert.de/Diplomarbeit/Bilder/Abbildung%202-7.gif>
Eingesehen am 12.09.2017.
- [CKH⁺16] Rainer Maria Czichon, Jörg Klinger, Pavol Hnila, Dirk Paul Mielke, Herbert Böhm, Christoph Forster, Carol Griggs, Martin Kähler, Günther Karl Kunst, Monika Lehmann, Brita Lorentzen, Sturt Manning, Kathryn Marklein, Henning Marquardt, Silvio Reichmuth, Jana Richter, Corinna Rössner, Burhan Sadıklar, Katherine Seuffer, Robert Sobott, Irene Traub-Sobott, Harald von der Osten-Woldenburg, Melanie Weber, Horst Wolter, and Mehmet Ali Yılmaz. Mitteilungen der deutschen orient-gesellschaft 148. *Archäologische Forschungen am Oymaağaç Höyük/Nerik 2011-2015*, page 5–141, 2016.
- [d81] Technische Daten - d810.
https://www.nikon.de/de_DE/product/digital-cameras/slr/professional/d810#tech_specs
Eingesehen am 16.09.2017.
- [fes] Festpunktfeld.
<http://www.nerik.de/artikel/artikel.php?artikelid=259&abschnitt=1938>
Eingesehen am 12.09.2017.
- [Lei11] Leica Geosystems, Schweiz. *Leica Viva TS12 - Datenblatt*, 2011.
- [Len11] Lensation GmbH. *Newton-Linsengleichung*, 2011.
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/thumb/b/be/Newton-Linsengleichung.svg/1000px-Newton-Linsengleichung.svg.png>
Eingesehen am 12.09.2017.
-

- [Luh10] Thomas Luhmann. *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Wichmann, 2010.
- [MW12] Thomas Meves and Sebastian Wichert. *Photogrammetrische Dokumentation des unterirdischen Ganges von Oymaağaç Höyük*. 2012.
- [Nar15] Nadine Narnbach. *Vermessungsarbeiten auf der archäologischen Ausgrabung in Oymaağaç (Türkei), insbesondere im „Tunnelbereich“*. 2015.
- [ner] Hethiterreich.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hethiter.svg>
Eingesehen am 10.09.2017.
- [Pet10] Günter Petrahn. *Taschenbuch Vermessung - Grundlagen der Vermessungstechnik*. Cornelsen, 2010.
- [Pom16] Günter Pomaska. *Bildbasierte 3D-Modellierung*. Wichmann, 2016.
- [Rot14] Peter Rothe. *Vermessung und 3D Modellierung eines Tunnels auf der archäologischen Ausgrabung Oymaağaç Höyük, Türkei*. 2014.
- [web] Historische fragestellung.
http://www.nerik.de/projekt/historische_Fragestellung.php
Eingesehen am 10.09.2017.
- [Zie15] Ron Ziemann. *Vermessungsarbeiten auf der archäologischen Ausgrabung in Oymaağaç (Türkei), insbesondere im „Eingangsbereich“*. 2015.
-