



Kevin Roth, BSc

Blockgletscher-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern mittels unbemanntem Luftfahrzeug mit Durchführung von Pilotstudien

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium: Geomatics Science

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Viktor Kaufmann

Institut für Geodäsie an der Technischen Universität Graz

Graz, April 2018

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Mein Dank für die Möglichkeit diese Masterarbeit verfassen zu können (oder viel mehr verfassen zu dürfen) gilt meinen Eltern, meiner Familie und einer Person ganz besonders. Ohne die tatkräftige Unterstützung meiner Mutter, wäre ich nicht in den Genuss gekommen studieren zu dürfen. Die als selbstverständlich angenommenen Kleinigkeiten sind es, die es uns Kindern ermöglichen noch einen Schritt weiter hervorzutreten. Diese Kleinigkeiten sind jedoch auch jene, welche einige Zeit später betrachtet nervenaufreibend und anstrengend für Eltern sind. Für diese mentale Kraft mich immer wieder zu motivieren, vor allem in der Mittelschule und während des Abiturs, danke ich dir Mama! Ebenso dir Papa, für die Motivation, die du mir immer wieder gegeben hast.

Ebenfalls möchte ich mich bei Professor Viktor Kaufmann bedanken, für seine Geduld und für die Hilfestellungen während der Arbeit. Ein weiterer Dank geht an Walter Krämer und Gernot Seier für die Unterstützung während der Arbeit. Ebenfalls möchte ich mich bei den Angestellten des Instituts für Geodäsie für die zahlreichen Hilfen während des Studiums bedanken.

Die Frage, was mit den Erkenntnissen aus dieser Arbeit geschehen möchte ich ebenfalls kurz in diesem Abschnitt beantworten. Während dieser Arbeit wurde die Idee geboren, Befliegung und die daran angeschlossene Auswertung kommerziell zu betreiben. Die Befliegungen sollen ein breites Spektrum abdecken, neben Massenbestimmungen und Bewegungsanalysen sollen zum Beispiel auch landwirtschaftliche Nutzflächen spektral und thermal betrachtet werden und daraus den Landwirten Informationen zu den Pflanzen und Boden geliefert werden.

Zusammenfassung

Das Thema dieser Masterarbeit war das Erstellen einer Deformationsanalyse mittels unbemanntem Luftfahrzeug. Diese Analyse gliedert sich in die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung einer Befliegung des Tschadinhorn Blockgletschers zu unterschiedlichen Epochen. Hierfür wurde im Juli 2016 eine Felduntersuchung nach Kals in Osttirol durchgeführt und an drei Tagen der Gletscher begangen. Eine zweite Befliegung sollte im September 2016 stattfinden, wurde jedoch aufgrund von bereits früh einsetzendem Schneefall Ende August in den Sommer 2017 verschoben.

Im Rahmen der Vorbereitung musste die Herstellung von Bodenpunkten bzw. des dafür notwendigen Musters erfolgen. Hierfür wurden zwei Muster erstellt, wobei das Muster aus dem Jahr 2017 bereits die Modifikationen des Musters 2016 beinhaltet. Das Modell von 2016 sah ein rundes zweifarbiges Muster vor, während das Muster von 2017 ein quadratisches dreifarbiges Muster ist.

Die Befliegung wurde seitens Professor Kaufmann vorbereitet und konnte somit problemlos durchgeführt werden. Ein Vorteil wäre es gewesen, die erhobenen Daten bereits am Berg betrachten zu können, um etwaige qualitativ schlechtere Aufnahmen erneut aufnehmen zu können. Bezüglich der Positionsbestimmung der Bodenpasspunkte wurde im Winter 2016 die intern auf dem Leica GNSS Rover befindliche Transformation modifiziert, so dass Gebrauchskoordinaten exportiert und direkt mit in die Auswertung aufgenommen werden konnten.

Die Auswertung gliedert sich in die Abschnitte zur Vorbereitung der Daten, Durchführung der Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse. Als vorbereitende Arbeiten wurden die Aufnahmen betrachtet und nicht brauchbare Aufnahmen aussortiert. Die Durchführung erfolgte mittels kommerzieller Softwarepakete, wie Pix4dMapper und Agisoft Photoscan, zum Erstellen der Orthofotos und Geländemodelle. Die Software GlobalMapper wurde für den Export der Orthofotos in ein Greyscale-Format und für das Festlegen der exakten Koordinaten des umgebenden Rechtecks benutzt. Diese Orthofotos wurden in Matlab mittels NCC-Prinzip ausgewertet und die Veränderungen im Jahr 2017 gegenüber den Referenzbildern aus 2016 bestimmt. Die Fließbewegungen wurden auf Ausreißer überprüft und bereinigt. Die Bewegung im Rahmen dieser Auswertung zeigt eine Deformation bzw. Bewegung des Blockgletschers, welche unter denen der Vorjahre liegt.

Die Deformation liegt in der Epoche 2016/2017 in einem Bereich von 113 [cm] bis 224 [cm], im Bereich des ersten Bildfluges 2016 bei 228 [cm] bis 284 [cm] berechnet mit der Software Pix4D. Die Software Agisoft Photoscan liefert einen Bereich von 106[cm] bis 219 [cm] für das Gebiet des zweiten Bildfluges. Diese Werte liegen unterhalb der minimalen Bewegungen von 313 [cm] und der maximalen Bewegungen 356 [cm] aus 2015/2016. Abschließend lässt sich sagen, dass die Deformationsanalyse mittels UAV möglich ist.

Hierbei sind die Flexibilität bei der Arbeitszeit bzw. bei der Befliegung der Gebiete als Vorteil zu nennen, da man bei den Aufnahme-Intervallen nicht an große Institutionen gebunden ist. Zu beachten ist hierbei, dass die Aufnahmen der geforderten Qualität entsprechen und genügend Bilder mit ausreichender Überlappung vorhanden sind.

Abstract

The topic of this master thesis was the creation of a deformation analysis using unmanned aircraft. This is divided into the areas of preparation, execution and evaluation of a flight of the Tschardinhorn block glacier to different eras. For this purpose, a field survey was carried out in July 2016 in Kals in East Tyrol. The block glacier was climbed on three days. A second flight was scheduled to take place in September 2016, but was postponed to the summer of 2017 due to early snowfall at the end of August.

In the course of the preparation process, the production of ground points and the necessary pattern was dealt with. Two samples were created for this purpose, the model from 2017 already containing the modifications compared to 2016. The 2016 model featured a round two-coloured pattern, while 2017 saw a square three-coloured pattern.

The survey was prepared by Professor Kaufmann and could thus be carried out without any problems. An improvement would be to look at the data already on the mountain in order to be able to take up possibly poorer recordings again. In winter of 2016, the transformation internally located on the Leica GNSS Rover was modified by determining the position of the ground control points, so that usage coordinates can be exported and directly packed into the evaluation.

The evaluation is divided into the areas of data preparation, evaluation and visualization of the results. As preparatory work, the recordings were considered and useless recordings were sorted out. The implementation was carried out using commercial software packages such as Pix4dMapper and Agisoft Photoscan to create orthophotos and terrain models. The GlobalMapper software was used for exporting orthophotos to a Greyscale format and for defining the exact coordinates of the surrounding rectangle. These orthophotos were evaluated in Matlab using the NCC principle and a change compared to the period 2016 was determined. These flow movements were checked and corrected for outliers and displacements.

The movement of this evaluation shows a deformation or movement of the block glacier, which is below that of the previous years.

The deformation in the period 2016/2017 is in a range from 113 [cm] to 224 [cm], in the range of the first picture flight 2016 at 228[cm] to 284[cm] calculated with the software Pix4D. This Agisoft Photoscan software provides a range of 106 [cm] to 219 [cm] for the area of the second image flight. These values are below the minimum movements of 3.13 [m] and the maximum movements of 356 [m] from 2015/2016.

Finally, it can be said that deformation analysis using UAV is possible. Here are the advantages of a flexible working time or flight of the areas as one is not bound to large institutions with the recording intervals. It is important to ensure that the images are of the required quality and that there are sufficient images with sufficient overlapping.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	v
Zusammenfassung	vii
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Fragestellung und Zielsetzung	2
1.3. Gliederung der Arbeit	2
2. Stand der Technik	3
3. Theoretische Grundlagen	7
3.1. Geographische Lage Tschadinhorn Blockgletscher	7
3.2. Permafrost	8
3.3. Blockgletscher	9
3.3.1. Definition	9
3.3.2. Morphologie	10
3.3.3. Bewegung	11
3.4. Structure from motion	12
4. Praktische Durchführung	15
4.1. Herstellung der Passpunktsignale	15
4.2. Durchgeführte Geländearbeiten 2016	18
4.2.1. Bildflug 2016	19
4.2.2. GNSS Messungen 2016	22
4.3. Durchgeführte Geländearbeiten 2017	23
4.3.1. Bildflug 2017	24
4.3.2. GNSS Messung 2017	25

Inhaltsverzeichnis

5. Auswertung der Daten	27
5.1. Betrachtung und Auswertung der Bilddaten	27
5.1.1. Bildauswahl	27
5.1.2. Koordinaten	28
5.2. Berechnen der Orthophotos und Geländemodelle	29
5.3. Transformation der Orthophotos	31
5.4. Analyse der Bewegungen	32
5.5. Visualisierung der Ergebnisse	34
6. Ergebnis	37
6.1. Fließbewegung 2016 - 2017 berechnet mit Pix4D und Agisoft	38
6.2. Differenz der festen Bereiche um den Gletscher 2016 - 2017 .	45
6.3. Unterschied Höhe ALS Daten 2009 - DGM Pix4D, DGM Agisoft	51
6.4. Unterschiede im DGM Pix4D und Agisoft PhotoScan	61
6.5. Fließbewegung 2016 - 2017 GNSS vs UAV	67
6.6. Zusammenfassung Ergebnisse	71
6.7. Fazit	72
7. Ausblick	73
A. Anhang	77
A.1. Pix4D Bericht 2017 Flug 2	77
A.2. Pix4D Bericht 2016 Flug 2	85
A.3. Pix4D Bericht 2016 Flug 1	93
A.4. Agisoft Bericht 2017	101
A.5. Agisoft Bericht 2016 Flug 2	108
Literatur	115

Abbildungsverzeichnis

2.1. Vergleich Orthofoto UAV Flugzeug	4
3.1. Lage Tschadinhorn	7
3.2. Karte der Permafrostverteilung	9
3.3. Schematische Darstellung eines Blockgletschers	11
3.4. Ablauf Structure from Motion	13
3.5. Bild mit Keypoints	14
4.1. Entwurf Bodenpasspunk 2016	16
4.2. Entwurf Bodenpasspunk 2017	17
4.3. Startvorbereitung UAV	20
4.4. Bildflug 1 2016 mit Punktwolke	21
4.5. Bildflug 2 2016 mit Punktwolke	22
4.6. Verteilung der Passpunkte 2016	23
4.7. Passpunkt im Fels	24
4.8. Trajektorie des Bildfluges 2017	25
4.9. Verteilung der Passpunkte 2017	25
5.1. Vergleich Aufnahmen scharf unscharf	28
5.2. Ablauf der Prozessierung	29
5.3. Markieren der Passpunkte in Pix4D	30

1. Einleitung

1.1. Motivation

In Zeiten des Klimawandels und der globalen Klimaerwärmung wird es immer notwendiger, die dadurch betroffenen Bereiche zu untersuchen und das Ausmaß der Erwärmung zu detektieren [Wik18a]. Die Alpen sind ein Bereich, in welchem sich der Klimawandel deutlich stärker auswirkt als im global gemessenen Mittel [Umw15, S. 6]. Betroffen vom Klimawandel ist auch Permafrost, der für die Entstehung von Blockgletschern wesentliche Voraussetzung ist. Ein Indikator für Veränderungen durch den Klimawandel und die globale Klimaerwärmung im hochalpinen Bereich ist der Blockgletscher, welcher sehr rasch auf Änderungen der Temperatur des Permafrosts reagiert [Kau17, S. 2]. Die Untersuchung dieser Gebiete ist meist mit hohem Aufwand für die Erfassung der Bilddaten bzw. Positionsdaten verbunden, da zur Erzeugung der Fotos ein Bildflug per Flugzeug oder Hubschrauber benötigt wird. Das Bundesamt für Eich und Vermessungswesen (BEV) befliegt das Gebiet nur alle 3 Jahre [Eic13, S. 10]. Damit ist eine kontinuierliche jährliche Beobachtung nicht möglich. Die Begehung des Blockgletschers für eine terrestrische Vermessung ist ebenfalls sehr personal- und arbeitsintensiv. Eine kontinuierliche Beobachtung ist jedoch erforderlich, da dadurch Rückschlüsse auf die Kinematik des Blockgletschers gezogen und eine Änderung der Massenbilanz berechnet werden können. Ebenfalls ist es möglich, dadurch die lokale Änderung des Geländes bzw. der daraus resultierenden Geländehöhe zu bestimmen. Mit der fortlaufenden Entwicklung von sogenannten „unmanned aerial vehicles“ (in Folge UAV oder Drohne) ist es nun möglich, flexible Beobachtungen vor Ort zu tätigen. Die Datenreihe, könnte somit jährlich nach der Schneeschmelze im Frühling bis zum Spätsommer erhoben werden.

1. Einleitung

1.2. Fragestellung und Zielsetzung

Ziel dieser Masterarbeit ist die Erarbeitung und Auswertung eines Konzepts für einen erstmaligen Einsatz eines UAV, um mit den aus diesen Befliegungen gewonnenen Daten im Anschluss eine Analyse der Bewegung bzw. Deformation des Blockgletschers zu dokumentieren.

Hierzu wurde am Tschadinhorn Blockgletscher der Schobergruppe eine Pilotstudie im Sommer 2016 und 2017 durchgeführt. Aus den erhaltenen Daten wurde mittels geeigneter Software multitemporale Orthophotos sowie eine Deformationsanalyse berechnet. Ebenfalls wurde evaluiert, wie sich das UAV im Außeneinsatz verhält und wie weit die Ergebnisse aus anderen Datenquellen übereinstimmen.

Des Weiteren sollte für die Verwaltung des Nationalparks Hohen Tauern eine Empfehlung und auch ein Leitfaden für den Einsatz eines UAV zur Datenerfassung an Blockgletschern geschrieben werden.

1.3. Gliederung der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in drei Bereiche auf: die Theorie, den praktischen Teil und die Ergebnisse. Im Bereich der Theorie wird Permafrost, der Blockgletscher sowie „Structur from Motion“ definiert und erklärt. Da die meisten anderen verwendeten Themenbereiche, wie beispielsweise die Grundlagen der Photogrammetrie, Themen aus dem Studium der Geodäsie sind, werden diese als bekannt vorausgesetzt und nicht weiter erläutert.

Der praktische Teil umfasst die Herstellung der Bodenpasspunkte und eine Beschreibung der Bildflüge von den Begehungen des Gebietes um den Blockgletscher aus den Jahren 2016 und 2017. Ebenfalls im praktischen Teil wird die Auswertung der Daten mit den Softwarepaketen Agisoft Photoscan, Pix4D, Global Mapper, Matlab und Surfer erklärt.

Der letzte Bereich beinhaltet die erhaltenen Ergebnisse aus den Berechnungen. Diese werden analysiert und interpretiert.

2. Stand der Technik

Der Einsatz von UAV erhält immer mehr Einzug in die Bereiche der Geodäsie. Befliegung von Objekten und Gebieten mittels Drohnen und die Auswertung der Bilder mittels eines Structure-from-Motion Algorithmus nehmen stetig zu. Nachfolgend werden einige Projekte erläutert, um aufzuzeigen, dass der Einsatz von Drohnen ein sinnvolles Hilfsmittel für die Gewinnung von Bildern und die darauf folgende weitere Auswertung ist. Die DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. hat in einem Artikel das Thema sehr ausführlich bearbeitet [DVW17, S. 129]. Der Rittersturz in Koblenz ist ein steil abfallender Schieferhang an welchem sich ein Riss geöffnet hat. Durch diesen besteht die Gefahr eines Hangrutsches. Um zu berechnen in wieweit Maßnahmen ergriffen werden müssen, wurde das Gebiet mit einem UAV befliegen. Hierfür wurden in dem Bereich des 100 [m] hohen und 300 [m] breiten Felshangs mit 45-90 Grad Neigung 27 Bodenpunkte vermarktet und tachymetrisch koordinativ bestimmt [DVW17, S. 131]. Mittels 300 aufgenommenen Bilder wurde ein 3D-Modell mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich für die entsprechenden Bereiche berechnet. Beruhend auf diesem Modell konnten Felsmechaniker nun ihr wirklichkeitsnahes Kräfte- und Bewegungsmodell aufbauen. Die Stadt Koblenz entschied anhand der Ergebnisse, dass der Hang seiner natürlichen Erosion überlassen wird und die angrenzende Bundesstraße 9 sowie die Bahnstrecke Köln-Bingen durch die Erhöhung eines vorhandenen Erdwalls und einen 4 [m] hohen Steinschlagschutzzaun vor möglichen Steinschlägen ausreichend geschützt ist [DVW17, S. 132]. Das Team von Messpunkt plus aus Unnau beflieg im Juli 2015 den Gletscher des Hinteren Brunnenkogelferners in unmittelbarer Nachbarschaft der Wildspitze mit einem UAV. Bei diesem Projekt sollten Daten für die Erstellung von Eisstärkenmodellen gesammelt werden. Problematisch hierbei war die große Höhe von ca. 3.440 [m], da der Luftdruck von 730 [hPa] für den internen Höhenmesser der Drohne zu gering war [Mes15]. Nachdem die

2. Stand der Technik

Software vor Ort umprogrammiert wurde, konnte die Befliegung manuell erfolgen. Ergebnis waren Bilder mit einer hohen Auflösung und ein daraus resultierendes Punktwolke für die weiteren Modelle.

Ein Projekt aus Graz mit dem sich Marlene Tillian und Wolfgang Sulzer von der UNI Graz und NAWI Graz beschäftigt haben ist die Wildbachbegehung in der Gemeinde Weng im Gesäuse. Laut dem Forstgesetz 1975 (§101 Abs.6) ist jede Gemeinde verpflichtet mindestens einmal jährlich im Frühjahr nach der Schneeschmelze, die Gebiete eines Wildbaches zu begehen. Dabei müssen die vorgefundenen Übelstände beseitigt werden, wie Holz oder anderen den Wasserlauf hemmende Gegenständen [Til14, S. 14]. Eingesetzt wurde für diesen Flug eine kommerzielle DJI Phantom 2 Drohne mit einer Action-Kamera als Sensor. Das Ergebnis der Auswertung ergab, dass sehr viele Übelstände erkennbar waren und die Daten aktuell zu dem jeweiligen Aufnahmezeitpunkt waren. Verglichen mit Laserscannerdaten und Orthophotos ist die Befliegung mittels UAV eine sinnvolle Ergänzung zur Wildbachbegehung [Til14, S. 21]. Problematisch sind lediglich Sichtfeld-einschränkungen sowie Schlechtwetterlagen oder der Einfluss von starkem Wind für die Untersuchung mittels einer Drohne [Til14, S. 22].



Abbildung 2.1.: Vergleich Orthofoto 2014 UAV 3 [cm] (links) mit Orthofoto 2014 Flugzeug 10 [cm] (rechts). Quelle :[Til14, S. 18]

Die Universität Mailand untersuchte im August 2014 im Stelvio National Park in Italien, ob die Beobachtung mittels UAV eine schnelle und zuverlässige Methode für die Gletscher Beobachtung ist. Die Höhe des Gletschers liegt im Bereich zwischen 3670 [m] und 2600 [m], mit einer aus zwei Gletschern zusammen gesetzten Zunge von ca. 2 km Länge [FUG+15, S. 26]. Als Fluggerät wurde eine Starrflügler Drohne mit einer handelsüblichen Digitalkamera mit einem 16 Megapixel CMOS Sensor eingesetzt. Die Aufnahmen fanden um 08:20 Uhr Sommerzeit statt um direkte Sonneneinstrahlung, sowie durch den Wind bedingtes blurring zu verringern [FUG+15, S. 27]. Des Weiteren wurden die Bilder unkalibriert mit in die Berechnung genommen. Die Auswertung erfolgte mittels Bündelblock Ausgleich und diversen geometrischen Korrekturen. Die Passpunkte (engl ground control points (GCPs)) wurden mittels Orthophotos koordinativ bestimmt und in die Berechnung mit 3 [m] Unsicherheit in den X und Y Achsen übernommen [FUG+15, S. 27]. Verglichen wurden die Daten mit einer Landsat 8 Band Aufnahme vom September 2014. Der Vergleich der Daten zeigt, dass sich die Ergebnisse bezogen auf die Gletscherfläche um 3.2% (Landsat 8 -UAV) und im Moränen Bereich um 0.34% (Landsat 8 -UAV) unterscheiden. Die Untersuchung kam zu dem Ergebnis, dass es möglich ist, hochauflösende Kartierungen eines Gletschers mittels UAV zu erstellen [FUG+15, S. 32].

3. Theoretische Grundlagen

3.1. Geographische Lage Tschadinhorn Blockgletscher

Das zu untersuchende Gebiet liegt am Tschadinhorn, einem 3017 m über Adria (ü. A.) hohen Berggipfel der Schobergruppe in Osttirol [Wik18b]. Der Berggipfel liegt östlich der Gemeinde Kals am Großglockner, nahe der Grenze zu Kärnten. Die Schobergruppe liegt in den zentralen Ostalpen nach der Einteilung des Alpenvereins. Die Schobergruppe ist seit 1981 teil des Nationalparks Hohen Tauern [Wik17b].

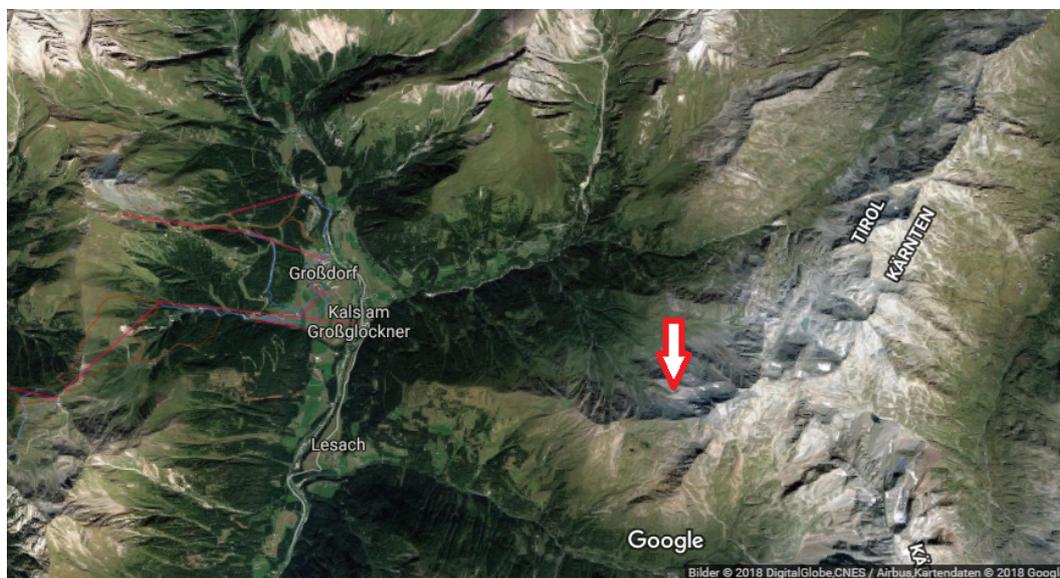


Abbildung 3.1.: Lage Tschadinhorn Quelle: Google Maps

3. Theoretische Grundlagen

Die Gruppe der Hohen Tauern setzt sich aus verschiedenen Untergruppen zusammen. Diese sind: Ankogelgruppe, Goldberggruppe, Glocknergruppe, Kreuzeckgruppe, Granatspitzgruppe, Venedigergruppe, Villgratner Bergen und der Rieserfernergruppe [Wik17b].

Das Tschadinhorn ist ein stumpfer Kegel am Ende des langen Nordostrückens. Dieser reicht vom Tschadinsattel (2993 m ü. A.) bis zum Tschadinhorn. Der Sattel wird nordöstlich vom Bösen Weibl (3119 m ü. A.) abgegrenzt [Wik18b]. Der Normalweg ist eine Aufstiegsmöglichkeiten zum Sattel des Tschadinhorn und kann durch einen Aufstieg von der Glorerhütte, dem Lucknerhaus oder der Lesachalmhütte erreicht werden [Wik18b].

Geologisch betrachtet setzt sich das Gebiet der Zentralalpen hauptsächlich aus Gneisen und kristallinen Schiefen [Wik17c] zusammen. Die Zentralalpen sind am stärksten vergletschert und besitzen die höchsten Gipfel der Ostalpen [Wik17c].

3.2. Permafrost

Als Permafrost oder auch Dauerfrost wird Boden, Sediment oder Gestein bezeichnet, welches in unterschiedlicher Mächtigkeit und Tiefe unter der Erdoberfläche mindestens zwei Jahre ununterbrochen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt aufweist [C Mo2, S. 326]. Unterschieden wird zwischen trockenem Permafrost (dry-frozen ground) und eisreichem Permafrost (wet-frozen ground). Der trockene Permafrost besitzt durch seinen geringeren Wassergehalt nicht genug Eis als Bindemittel, wodurch nicht alle Poren des Bodens gefüllt sind. Bei eisreichem Permafrost hingegen kann sogar ein Gleichgewicht zwischen gefrorenem und ungefrorenem Wasser in Abhängigkeit der Temperatur vorkommen [Ver18].

In die Definition des Permafrostes fallen nicht die Gletscher und deren geomorphologischen Formenschatzen. Das Eis eines Permafrosts kann bis zu 80 % seines Volumens ausmachen, die unterschiedlichen periglazialen Eistypen werden als Grundeis oder Bodeneis bezeichnet [Ver18]. Bildet sich Permafrost neu wird dies als Permafrostaggradation bezeichnet [Ver18]. Die

3.3. Blockgletscher

Abnahme wird als Permafrostdegradation bezeichnet [Ver18]. Charakteristisch für einen Permafrostboden ist sein vertikales Profil. Neben den polaren und subpolaren Gebieten ist der Permafrost auch in den Hochgebirgen (auf periglaziale Höhengrenzen) verbreitet [Ver18].

Die Verteilung des Permafrost um das Studiengebiet ist in Abbildung 3.2 ersichtlich. Der Tschadinhorn Blockgletscher liegt an der Grenze der Klassen Permafrost bei allen Bedingungen, Permafrost bei kalten Bedingungen und Permafrost bei sehr günstigen Bedingungen.

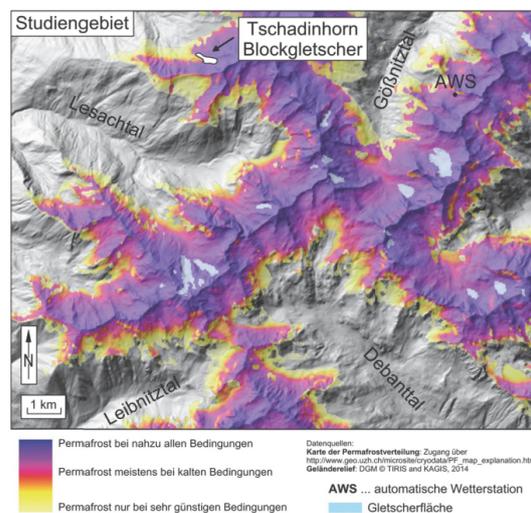


Abbildung 3.2.: Karte der Permafrostverteilung Quelle: Kaufmann Poster 2017 „Tschadinhorn Blockgletscher, Schobergruppe, Hohe Tauern – ein Beitrag zur aktuellen Kinematik“

3.3. Blockgletscher

3.3.1. Definition

Es gibt eine Vielzahl von Definitionen für Blockgletscher. Die gängigste ist von Barsch eingeführt: "Blockgletscher sind lappen- bis zungenförmige Körper aus ständig gefrorenem, unverfestigtem Material, übersättigt mit

3. Theoretische Grundlagen

interstitiellem Eis (Eiszement) und Eislinsen, die sich kriechend hang- oder talabwärts bewegen als Folge der internen Deformation des Eises“ [Bar96]

3.3.2. Morphologie

Ein Blockgletscher unterscheidet sich grundlegend von dem weitläufig bekannten Begriff Gletscher, welcher aus einer Eismasse besteht. Morphologisch gesehen sind Blockgletscher scharf von dem umgebenden Bereich abgegrenzt. Die Mächtigkeit liegt im Bereich von 15 bis 30 [m] bei einem Böschungswinkel von 40 bis 45 Grad abhängig von ihrer Aktivität. Bewuchs ist aufgrund der Aktivität ebenfalls nicht vorhanden. Die Oberfläche besteht aus grobblockiger Schuttlage, welche mehrere Meter dick sein kann. Diese Schicht ist im Sommer nicht gefroren und wird als Aufbauschicht (engl. active layer) bezeichnet. Im Sommer schützt die Schuttlage den gefrorenen Körper des Permafrosteis vor verstärktem Abschmelzen [Nik15, S. 12].

Auf einem aktiven Blockgletscher ist die Oberfläche von transversalen und longitudinalen Rücken gekennzeichnet. Diese können im Bereich mehrere Meter liegen und entstehen durch die Fließbewegungen des Blockgletschers. In den wärmeren Sommermonaten ist an der Wurzelzone eine Depression (Senke) ausgebildet in der sich Schmelzwasser sammelt und in Folge dessen kleine Seen entstehen können. Hingegen sind bei fossilen Blockgletschern unregelmäßige Oberflächenmorphologien vorhanden, welche aus dem vollständigen Abschmelzen des Eises entstanden sind [Nik15, S. 12].

Eine Unterscheidung findet hinsichtlich der Form statt, handelt es sich um einen zungenförmigen Blockgletscher ist das Verhältnis Länge zur Breite größer 1, bei einem lappenförmigen Blockgletscher ist es kleiner 1 [Nik15, S. 13]. In seinen Ausdehnungen kann ein Blockgletscher 100 bis 700 [m] lang und zwischen 50 [m] bis 200 [m] breit sein [Nik15, S. 13].

3.3. Blockgletscher

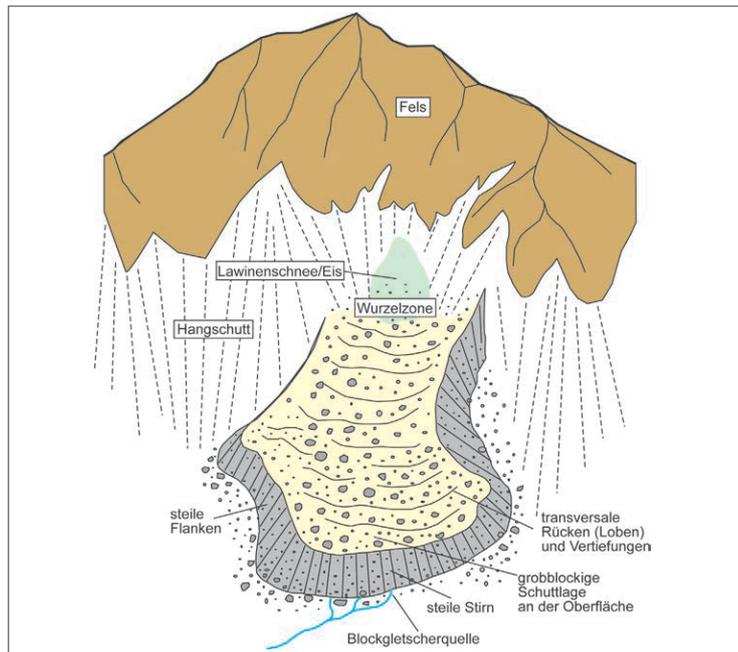


Abbildung 3.3.: Schematische Darstellung eines Blockgletschers mit den typischen morphologischen Merkmalen Quelle: [Nik15, S. 12]

3.3.3. Bewegung

Bezüglich der Bewegung werden die Blockgletscher in aktiv, inaktiv und in fossil unterschieden [Nik15, S. 13]. Aktive Blockgletscher bewegen sich z.B. hangabwärts mit einer Fließgeschwindigkeiten im Dezimeter bis Meterbereich pro Jahr. Die inaktiven Blockgletscher werden in dynamisch inaktiv und kinematisch inaktiv unterschieden. Bei dynamisch inaktiven Blockgletschern reicht die Neigung des Untergrundes nicht mehr aus, bei Blockgletschern des zweiten Bereichs reicht die Mächtigkeit des Körpers nicht mehr aus um eine Kriechbewegung zu erzeugen.

Blockgletscher der Kategorie fossil enthalten kein Eis mehr und sind meistens schon stark bewachsen [Nik15, S. 14]. Eine weitere Unterscheidung kann über den Eisgehalt hergeleitet werden. Hierbei wird zwischen dem eiszementierten Blockgletscher und Blockgletscher mit einem reinen Eiskern unterschieden. Der gefrorene Kern eines eiszementierten Blockgletscher be-

3. Theoretische Grundlagen

steht aus einem Gemisch aus Schutt und Eis, wobei das Eis den freien Raum zwischen dem Gestein ausfüllt [Nik15, S. 14]. Die Form des eiszementierten Blockgletschers ist die meist verbreitete Form in den österreichischen Alpen. Grundsätzlich ist die Unterscheidung aufgrund fließender Übergänge zwischen den Klassifikationen schwierig und muss durch Bewegungsmessungen entschieden werden.

3.4. Structure from motion

Der Begriff Structure from motion (SfM) beschreibt den Prozess der dreidimensionalen Oberflächenberechnung aus zweidimensionalen Bildinformationen durch sich unterscheidende Perspektiven (Höhe, Rotation, Distanz), aufgrund korrespondierender Merkmale in den Bildern. Aus biologischer Sicht bezieht sich SfM auf das Phänomen, dass Menschen 3D-Strukturen aus dem projizierten 2D (retinalen) Bewegungsfeld eines bewegten Objekts oder einer bewegten Szene wiederherstellen können [con18].

Eine oft genutzte Möglichkeit für den Ablauf eines Structure from Motion Prozesses ist die Berechnung mittels Scale Invariant Feature Transform (SIFT) und dem Bündelblockausgleich (engl. Bundle Adjustment). Dieser Ablauf wird in Abbildung 3.4 schematisch dargestellt.

Das Verfahren SIFT sucht sich Keypoints, mit zum Beispiel Ecken oder Flecken und erstellt für jeden Punkt ein Histogramm der Gradienten. Jeder Spitze im Histogramm wird ein Vektor zugeordnet, alle Vektoren werden dann im Keypoint descriptor (als Features) zusammengefasst [Wes+12, S. 311]. Die damit berechneten Features sind unabhängig von der Rotation und der Skalierung der aufgenommenen Bilder. Für jedes Bild wird ein Vergleich auf passende Eigenschaftsübereinstimmungen (engl. Feature Matches) mit allen andern Bildern berechnet. Abhängig sind die Keypoints von der Textur des Objektes, der Pixel Auflösung (Größe) des Bildes und der Spatial Auflösung (feinste erkennbare Struktur) [Mun15, S. 8]. Ebenfalls wichtig ist eine ausreichende Überlappung, Agisoft schlägt hierfür eine Überlappung von 60% bis 80% vor [LLC18, S. 9].

Aus den extrahierten Features folgt im nächsten Schritt die Schätzung der Position der Kameras. Eine Minimierung der Fehler erfolgt aus dem

3.4. Structure from motion

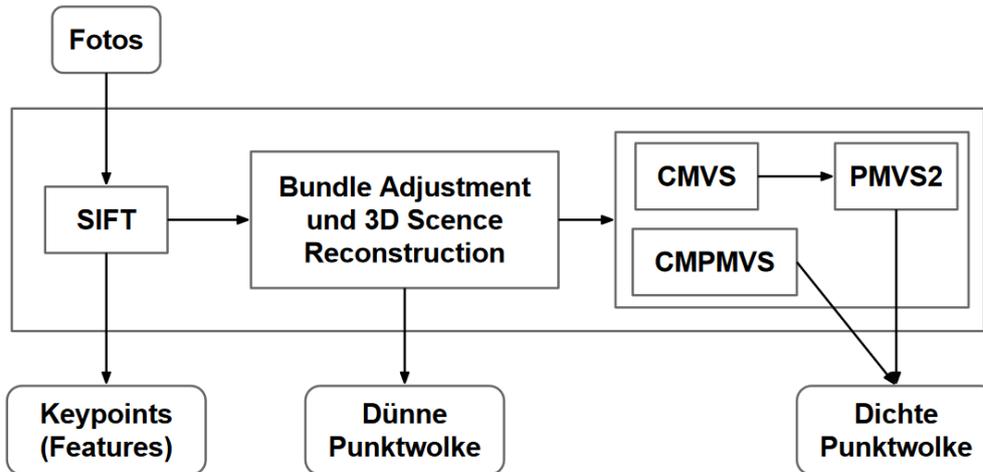


Abbildung 3.4.: Ablauf Structure from Motion mittels Scale Invariant Feature Transform (SIFT) Quelle: [Mun15, S. 5]

Vergleich zwischen der gemessenen und geschätzten Position aller bekannten Features. Aus der Triangulation und der Szenengeometrie werden 3D Punkte in ein relatives Koordinatensystem übertragen und fixiert [Wes+12, S. 301]. Eine verdichtete Punktwolke wird aus dem Ergebnis Clustering View for Multi-view Stereo (CMVS) und Patch-based Multiview Stereo (PMVS2) erzeugt. Im Clustering View for Multi-view werden für jede berechnete Kamera-Position die überlappenden Originalbilder in unabhängige Cluster zerlegt [Wes+12, S. 303]. Im Patch-based Multiview Stereo Prozess werden aus den Clustern die einzelnen dreidimensionalen Punkte berechnet. Alternativ kann das Verfahren Multi-View Reconstruction Software (CMPMVS) verwendet werden. CMPMVS und CMVSPMVS2 unterscheiden sich dadurch, dass bei ersterem direkt eine vermaschte Oberfläche berechnet werden kann. Grenzen dieser Systeme liegen in der Sichtbarkeit zu der Oberfläche, die Sicht des zu erfassenden Objekt muss sichtbar und zugänglich sein [Mun15, S. 20]. Einschränkungen gibt es durch die Belichtung des Objekts, hierbei muss darauf geachtet werden, dass der Kontrastumfang möglichst gering bleibt. Dies kann durch ein gleichmäßiges Abschatten oder Ausleuchten des Objektes bzw. des Gebietes umgesetzt werden. In den

3. Theoretische Grundlagen

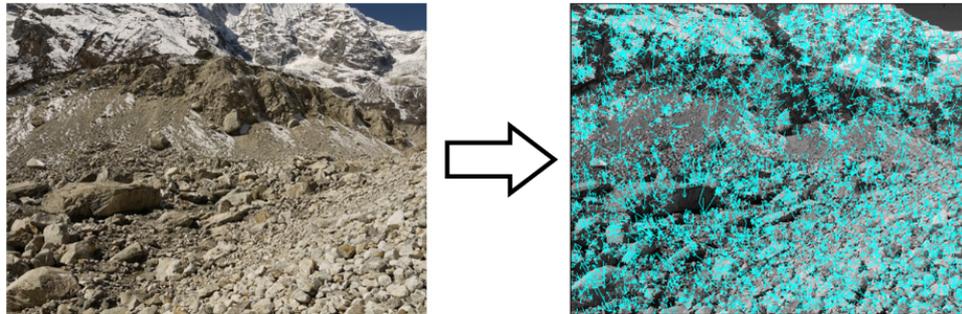


Abbildung 3.5.: Der Algorithmus zerlegt ein gegebenes Bild (links) in eine Datenbank von keypoint descriptors (rechts) Quelle: [Wes+12, S. 302]

dunklen und hellen Bereichen fehlen dem SfM Algorithmus die Bildinformationen, um die Auswertung umsetzen zu können.

Ein weiterer Faktor für etwaige Fehler ist die Brennweite. Hier muss darauf geachtet werden, dass eine mittlere Brennweite verwendet wird. Besonders im Weitwinkelbereich treten Verzerrungen auf. In den meisten SfM-Programmen werden diese Ungenauigkeiten rechnerisch eliminiert, jedoch kann bei Beachtung dieses Sachverhaltes ein Unsicherheitsfaktor minimiert werden [Fis15, S. 2]. Die zu erwartende Genauigkeit der Darstellung des Objekts aus der Berechnung hängt von verschiedenen Faktoren ab. Ist eine hohe Auflösung vorhanden, können Bereiche später stärker vergrößert werden. Für eine repräsentative Darstellung des Ergebnis ist eine gut ausgeleuchtete Textur notwendig [Fis15, S. 3]. Der Aufnahmesensor bzw. die Größe des Chips ist ebenfalls ausschlaggebend, da die Textur des Modells wie eine Haut über ein Gitternetz gespannt wird. Ebenfalls von Bedeutung ist die Anzahl der Bilder bzw. der prozentuale Anteil der verwendeten Bilder [Mun15, S. 32], wobei hierbei zwischen der Punktwolke und dem daraus resultierenden Netzmodell unterschieden werden muss. Die Punktwolke ist in Relation zu der ursprünglichen Aufnahme sehr genau [Fis15, S. 3]. Aus diesen Punkten kann dann ein vernetztes Modell berechnet werden.

4. Praktische Durchführung

4.1. Herstellung der Passpunktsignale

Die für die Befliegung notwendigen Bodenpasspunkte wurden extra für die Messung des Blockgletschers in Selbstversuchen entwickelt. Hierfür wurde mit dem Programm InkScape eine 75 [cm] × 75 [cm] Vorlage erstellt und in einem kleineren Maßstab (DIN -A₃) ausgedruckt. Die Vorlage wurde dann in einer Entfernung von 70 [m] betrachtet. Die Distanz wurde zu Reproduktionszwecken und um konsistent bleibende Rahmenbedingungen für die Versuchsreihe zu erhalten, mit Kreide auf der Straße markiert. So konnte bei den Versuchsaufnahmen schneller die Start- und Zielposition für die Kamera und die Vorlage gefunden werden. Die Versuche wurden mit einer Sony DSC-HX50 Digitalkamera durchgeführt, auch hier wurde bei den Versuchsreihen das selbe Modell mit gleichbleibenden Einstellungen verwendet, um eine Vergleichbarkeit zu erreichen. Die Auswahl der verwendeten Kamera erfolgte aus dem Grund, dass es sich ähnlich wie die bei dem Bildflug 2016 verwendeten RICOH GXR A12 Modell um eine Kamera des Kompakt-Segments handelt. Des Weiteren ist diese Kamera im privaten Besitz des Verfassers und daher frei verfügbar.

Die Bodenpasspunkte der beiden Bildflug-Epochen unterscheiden sich deutlich im Design, Material und im Ablauf der Versuchsreihen. Dies ist mit der Weiterentwicklung des Herstellungsverfahrens zu begründen. Die Abläufe von 2016 wurden optimiert und 2017 entsprechend umgesetzt. Während bei den Bodenpasspunkten aus dem Jahr 2016 direkt von der Papiergröße DIN -A₃ auf das endgültige Layout und Material gewechselt wurde, kamen 2017 noch Zwischenschritte hinzu. Durch die Betrachtung der 2016 (Abbildung 4.1) gewonnenen Bilddaten wurde ersichtlich, dass die Gestaltung

4. Praktische Durchführung

nicht optimal war. Die manuelle Identifikation des Bodenpunktes und des dazugehörigen Mittelpunktes war durch die geometrische Anordnung und die Größe des Ziels nicht optimal für das menschliche Auge zu erkennen.

In den Auswertungen der Daten aus 2016 stellt sich heraus, dass das Layout nicht optimal gewählt wurde und eine genaue Identifikation des Mittelpunktes des Bodenpasspunktes schwierig war. Eine automatisierte Messung der Mittelpunkte wurde nicht durchgeführt, um Differenzen durch unterschiedliche Umsetzung der Mittelpunktbestimmung beider Softwareumgebungen auszuschließen.



Abbildung 4.1.: Entwurf Bodenpasspunkt 2016 Quelle: eigene Aufnahme

4.1. Herstellung der Passpunktsignale

Um die Ergebnisse der Bodenpasspunktherstellung 2016 zu optimieren, wurde das Design auf die endgültige Größe 75 [cm] x 75 [cm] geplottet und ebenfalls einer Versuchsreihe unterzogen. Hierbei wurde die Distanz zwischen dem Ziel und der Kamera auf 140 [m] erweitert und einige Probeaufnahmen zu unterschiedlichen Tageszeiten mit sich unterscheidendem Schattenwurf aufgenommen.



Abbildung 4.2.: Entwurf 2017 Versuchsreihe Originalgröße Quelle: eigene Aufnahme

Hierbei stellte sich heraus, dass das weiß-schwarz Kreuz Design in Abbildung (4.2) dem einfarbigen Punktdesign aus 2016 (Abbildung 4.1) aus Gründen der besseren Sichtbarkeit und Identifikation des Mittelpunktes vorzuziehen ist. Grund hierfür ist die schärfere Abgrenzung der Farben, welche für den Menschlichen Betrachter besser zu differenzieren sind. Zusätzlich wurde der Rand der Bodenpasspunkte gelb eingefärbt um eine stärkere Abhebung von der Umgebung zu erzielen. Der Zweck hierbei war, dass die

4. Praktische Durchführung

auf dem Blockgletscher natürlich vorkommende Farbe meistens Grautöne sind. Ab einer bestimmten Entfernung verschwimmen die Farben für den menschlichen Betrachter aufgrund der begrenzten Anzahl an Pixeln bzw. der Auflösung. Die Farben grau, weiss und schwarz sind damit schwerer exakt abzugrenzen. Die Farbe gelb steht hierbei in starkem Kontrast, denn sie ist in der natürlichen Farbumgebung der Alpen kaum vorhanden und damit optimal als Umrandung geeignet. Der nächste Schritt der Optimierung befasste sich mit dem Material der Passpunkte. Die Bodenpasspunkte aus dem Jahr 2016 waren aus UV-beständigem Markisenstoff, welche mittels einer angefertigten Schablone mit einem Durchmesser von 60 cm auf ein dazu passendes blaues Rechteck zurechtgeschnitten wurden. Die beiden Stoffzuschnitte wurden mit einem Zwei-Komponenten-Kleber zusammengefügt und als zusätzliche Befestigung sowie Orientierungshilfe im Mittelpunkt des Kreises eine Metallöse gestanzt.

Die weiter entwickelten Bodenpasspunkte aus dem Jahr 2017 wurden auf eine UV-beständige LKW-Plane gedruckt. Dies hat den Vorteil, dass eine exaktere Darstellung des aufwendigeren Designs möglich ist. Die zuerst versuchte Variante, einzelne Quadrate aus Markisenstoff auszuschneiden und auf ein größeres 75 [cm] x 75 [cm] Quadrat zu kleben scheiterte an der Umsetzung.

4.2. Durchgeführte Geländearbeiten 2016

Die erste Befliegung des Tschadinhorn Blockgletscher am Großglockner fand am 26. Juli 2016 statt. Expeditionsteilnehmer waren:

- Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Kaufmann Viktor
- Amtsrat Ing. Krämer Walter
- Mag.rer.nat. Seier Gernot
- Roth Kevin

4.2. Durchgeführte Geländearbeiten 2016

Die verwendete Ausrüstung beinhaltetete :

- 1 x Hexacopter twinHEX v3.0
- 1 x RICOH GXR A12 (4288 x 2848) für Bildaufnahmen
- Leica Viva CS15 Feld-Controller
- Leica GNSS Empfänger
- 2 x Notebooks
- Messausrüstung (Antennenstab etc.)
- 12 x Bodenziele
- Ersatzakkus

4.2.1. Bildflug 2016

Der erste Tag wurde als Ankunfts- und Organisationstag genutzt, zudem wurde die Ausrüstung ausgeladen und überprüft. Am zweiten Tag wurde der Blockgletscher begangen, um die Bodenpunkte auszulegen sowie die Bildflüge mittels UAV durchzuführen. Dafür wurden auf und um den Blockgletscher Passpunkte ausgelegt. Hierbei wurde besonders darauf geachtet, dass die Bodenpasspunkte ausreichend mit Steinen beschwert wurden, um ein Wegwehen durch den Wind zu vermeiden und um am nächsten Tag die geodätische Einmessung durchführen zu können. Der zweite Teil des Tages bestand darin, das Fluggerät für den Flug vorzubereiten und die Flüge durchzuführen. Insgesamt wurden drei separate Flüge durchgeführt.

Der Ablauf eines Bildfluges kann entweder automatisch oder manuell erfolgen, jedoch müssen laut Vorschriften immer zwei Personen mit Fluggenehmigung anwesend sein um im Notfall einschreiten zu können. Im Fall eines automatischen Fluges, auch Wegpunktflug genannt, wird nach der Eingabe der Flugdaten mittels Laptop und Überprüfung der Funktionsfähigkeit am Boden der Flug eingeleitet. Die Drohne steigt dann auf eine Höhe von ca. 8 [m], um eine letzten Überprüfung der Parameter und einen Startabbruch im Notfall einzuleiten. Bis zu diesem Zeitpunkt muss der Pilot aktiv den Flug übernehmen. Sind zu diesem Zeitpunkt keine Auffälligkeit vorhanden und die äußeren Umstände für einen Flug optimal, gibt der Pilot den automatisch gesteuerten Flug frei. Das Fluggerät fliegt zu der in der Missionsplanung vorgegebenen Positionen und fängt mit der Aufnahme

4. Praktische Durchführung



Abbildung 4.3.: Startvorbereitung UAV Quelle: eigene Aufnahme

der Bilder an. Nach erfolgreicher Bearbeitung kommt das UAV wieder zu der vorgegebenen Lageposition zurück und landet.

Für die Datengewinnung wurden in der Kamera die folgenden Einstellungen verwendet:

- Blende: $f/5.6 - f/7.1$
- Belichtung: $1/800 \text{ s}$

Im ersten Bildflug wurde der obere Teil des Gletschers beobachtet wie in Abbildung 4.4 des berechneten Punktwolkenmodells ersichtlich. Nachdem die erste Aufnahmereihe durchgeführt war, wurde der Flug aufgrund von starken Windböen abgebrochen und das Fluggerät sicher zur Basisstation zurückgerufen, und manuell gelandet. Die Erkenntnisse aus dem ersten Flug, wie Flughöhe und Kameraeinstellungen, wurden mittels Notebook vor Ort ausgewertet, angepasst und in den zweiten Bildflug implementiert.

4.2. Durchgeführte Geländearbeiten 2016

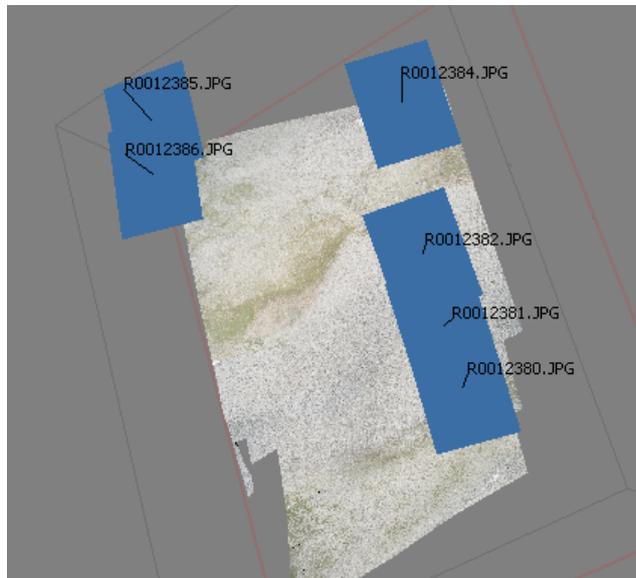


Abbildung 4.4.: Aufnahme Übersicht Bildflug 1 2016 mit Geländestructur, Quelle: Auswertung Agisoft

Im zweiten Bildflug wurden nur jene Teile des Blockgletschers befliegen, welche im ersten Flug nicht aufgenommen wurden. Der Bildflug ist der Abbildung 4.5 des berechneten Punktwolkenmodells zu entnehmen. Auch hier gab es durch starke Böen bedingt Turbulenzen, wobei der Flug erfolgreich abgeschlossen und die Drohne erfolgreich gelandet werden konnte. Nachdem das UAV auf etwaige Schäden überprüft worden war, wurde ein dritter Flug in niedriger Höhe durchgeführt, um eine bessere Bodenauflösung zu erreichen. Da zu diesem Zeitpunkt die Böen immer stärker wurden und ein sicherer Flug nicht mehr möglich war, wurde ein Flugabbruch mit der Landung initiiert. Bei diesem dritten Teilflug setzte das Gerät hart auf, die Folge daraus waren Materialschäden und eine Flugunfähigkeit. Insgesamt konnten jedoch 13 Aufnahmen des Blockgletschers mit den beiden Flügen aufgenommen werden.

Die Idee, den Gletscher mittels eines Flächenfliegers zu befliegen wurde bei der Planung und während des Organisationstag diskutiert. Jedoch konnte kein sicherer Landeplatz für das Fluggerät gefunden werden, sodass der Flieger nicht eingesetzt wurde.

4. Praktische Durchführung



Abbildung 4.5.: Aufnahme Übersicht Bildflug 2016 mit Geländestruktur, Quelle: Auswertung Agisoft

4.2.2. GNSS Messungen 2016

Am dritten Tag wurde die Einmessung der Bodenziele sowie der fest installierten Passpunkte (siehe Abbildung 4.7) auf dem Gletscher vorgenommen. Neben den Punkten auf dem Blockgletscher, gibt es vier Punkte die in den umgebenden statischen Bereichen im Fels installiert sind. Diese werden genutzt um ein lokales System bei einer terrestrischen Aufnahme zu definieren. Die Passpunkte sind in Abbildung 4.6 ersichtlich. Hierfür wurde mittels des in Österreich verfügbaren Austrian Positioning Service (APOS) Dienst die 3D Position der Punkte im Zentimeterbereich bestimmt. Das BEV gibt hierbei für den APOS Dienst eine maximale Genauigkeit von 1,5 [cm] in der Lage sowie 4 [cm] in der Höhe an [Eic]. Die am Tag zuvor ausgelegten Bodenziele wurden nach dem Einmessen wieder abgebaut und mitgenommen. Die Positionsbestimmung mittels GNSS dient dazu, die photogrammetrischen Ergebnisse zu validieren und die Ergebnisse mittels der Passpunkte in Pix4D und Agisoft georeferenzieren zu können.

4.3. Durchgeführte Geländearbeiten 2017

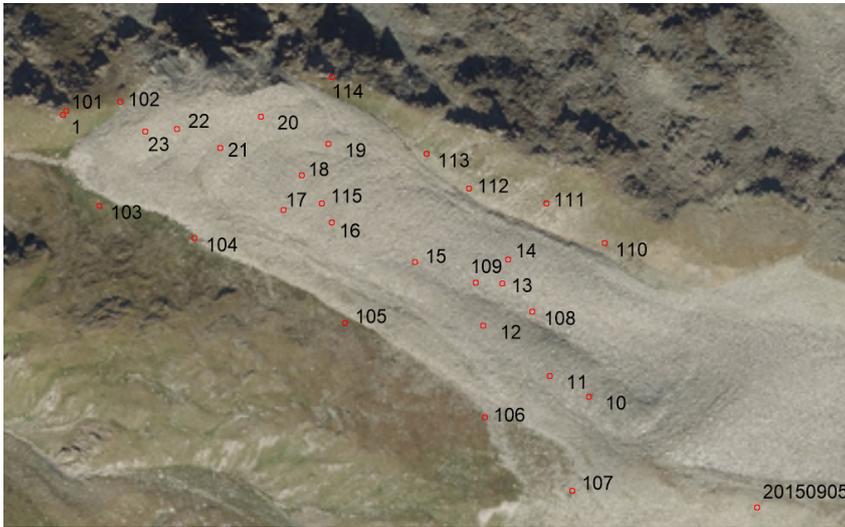


Abbildung 4.6.: Verteilung der Passpunkte 2016 Quelle: eigene Darstellung

4.3. Durchgeführte Geländearbeiten 2017

Die Befliegung des Tschadinhorn Blockgletscher fand am 22. August 2017 statt, dabei konnten die vorgesehenen Wiederholungsmessungen durchgeführt werden. Expeditionsteilnehmer waren hierbei:

- Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Kaufmann Viktor
- Amtsrat Ing. Krämer Walter
- Seka Wolfgang
- Augello Carlo
- u.a.

In dieser Begehung und Befliegung wurden vier verschiedene Luftfahrzeug Typen bzw. Modelle geflogen.

- DJI Maveric Pro (Quadrokopter)
- DJI Phantom 4 (Quadrokopter)
- Falcon 8 (Oktokopter)
- QUEST (Starrflügler)

4. Praktische Durchführung



Abbildung 4.7.: Passpunkt im Fels stabilisiert Quelle: eigene Aufnahme

4.3.1. Bildflug 2017

Der Bildflug für die DJI Phantom 4 mit dem berechneten Punktwolkenmodell ist in Abbildung 4.8 ersichtlich. Bei der Vorbereitung wurde für die zweite Befliegung 2017 darauf geachtet, dass eine optimale Fluggeometrie für den Blockgletscher bestimmt wird. Optimal bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine ausreichende Überlappung von mindestens 60% vorhanden ist, des Weiteren wurde die Flughöhe dem Gelände angepasst. Dies bedeutet, dass für die Flughöhe einer neuen Bildreihe das zum Tal abfallende Gelände des Blockgletschers berücksichtigt werden musste. Die Anzahl der Aufnahmen betrug für diesen Flug 180 Bilder. Die Segmente des Bildfluges können der Abbildung 4.8 entnommen werden. Für die anderen Fluggeräte (siehe Aufzählung) wurden ebenfalls Bildflüge des Gebietes durchgeführt. Da die Aufnahmen nicht in die Auswertung der Arbeit mit eingeflossen sind, wird nicht näher darauf eingegangen.

Für die Datengewinnung mittels Bildpunktflug wurden die interne Kamera FC330 mit folgenden Einstellungen verwendet:

- Blende: $f/2.8$
- Belichtung: $1/668[s]$ - $1/1335[s]$

4.3. Durchgeführte Geländearbeiten 2017

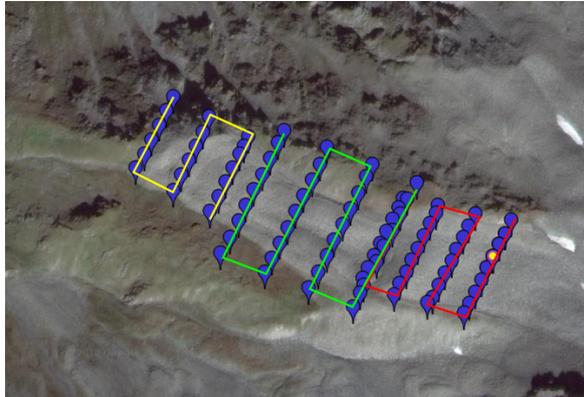


Abbildung 4.8.: Trajektorie des Bildfluges 2017 DJI Phantom Pro. Erster Teilflug rot, zweiter Teilflug grün, dritter Teilflug gelb. Beginn der Aufnahme rechts oben. Quelle: Eigene Darstellung

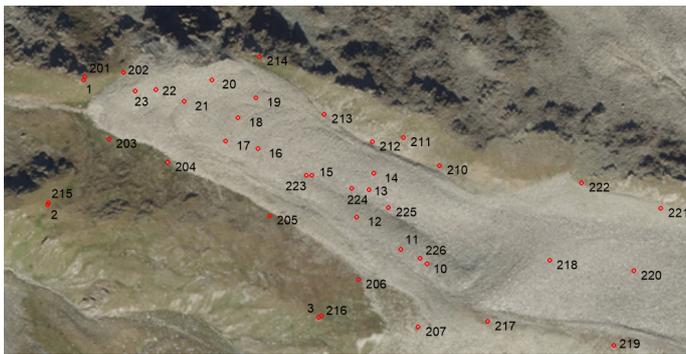


Abbildung 4.9.: Verteilung der Passpunkte 2017 Quelle: eigene Darstellung

4.3.2. GNSS Messung 2017

Um die photogrammetrischen Ergebnisse der Bilder aus dem Jahr 2017 validieren zu können, wurde wie im Jahr 2016 das auf dem Blockgletscher befindliche Passpunktfeld mittels GNSS aufgenommen. Die Position der Passpunkte kann Abbildung 4.9 entnommen werden. Zum Einsatz kam das gleiche bereits 2016 verwendete System Leica GNSS System, welches den APOS Dienst nutzt.

5. Auswertung der Daten

Das Kapitel 5 Auswertung gliedert sich in drei Teilgebiete, Betrachtung und Auswertung der Bilddaten, Analyse der aus dem vorigen Schritt erhaltenen Ergebnisse sowie der Visualisierung der Ergebnisse. Als PC-System wurde ein Lenovo Y500 Notebook mit Windows 10 Pro Betriebssystem und folgenden Hardware Komponenten verwendet:

- CPU Intel i7 3630QM
- 8.00 GB Arbeitsspeicher
- GPU 2 x NVIDIA GeForce GT 650M 2 GB SLI Verbund
- Samsung EVO 650 SSD

5.1. Betrachtung und Auswertung der Bilddaten

5.1.1. Bildauswahl

Die aus den Bildflügen 2016 und 2017 erhaltenen Aufnahmen können nicht direkt in die Auswertungs-Software übernommen werden. In der Epoche 2016 wurde während der Durchsicht der Daten festgestellt, dass die Bilder teilweise sehr unscharf gespeichert wurden. Von den ursprünglich 13 Aufnahmen konnten nur 10 verwendet werden. Die Bilder des Bildfluges 2017 wurden von einer DJI Phantom 4 aufgenommen. Es standen insgesamt 180 Aufnahmen zur Verfügung, wobei jedoch nur 88 Aufnahmen verwendet wurden. Kriterium für die Auswahl war, jeweils nur jedes zweite Bild in der Aufnahmereihe zu verwenden. Dadurch konnte noch eine ausreichende Überdeckung gewährleistet werden. Dies reduziert die Datenmenge und die daraus resultierende Prozessierungszeit.

5. Auswertung der Daten

Abbildung 5.1 zeigt im Vergleich eine verworfene Aufnahme mit einer verwendeten Aufnahme. Es ist sehr gut ersichtlich, dass die linke Aufnahme unschärfer ist. Dafür gibt es eine Vielzahl an Gründen, zu lange Belichtungszeit, eine Defokussierung oder ein auf die Mechanik der Kamera zurück zu führendes Problem. Für die Auswertung wurde ein Kompromiss aus benötigten Bildern für eine ausreichende Überlappung und ignorierten Aufnahmen getätigt.



Abbildung 5.1.: Vergleich Aufnahmen: links nicht verwendete Aufnahme, rechts verwendete Aufnahme Quelle: eigene Darstellung

Die gleiche Vorgehensweise wurde für die Bilder aus 2017 wiederholt, wobei in diesem Fall nur eine Verringerung der Datenmenge angestrebt wurde. Durch die hohe Anzahl und daraus bedingte Überlappung der Bilder musste nicht penibel darauf geachtet werden, dass genügend Bildinformation vorhanden sind.

5.1.2. Koordinaten

Die gegebenen Koordinaten sind MGI GK M31 Koordinaten. Die Positionen wurden mit einem Leica GS15 und der APOS Echtzeitpositionierung nach

5.2. Berechnen der Orthophotos und Geländemodelle

dem Konzept der "virtuellen" Referenzstation -VRS erstellt. Auf dem Leica System wurde im ETRS89 Koordinaten System gemessen und dann mittels einer 3D-Transformation in das System MGI GK M31 mit Gebrauchshöhen überführt. Die dafür notwendigen Parameter sind auf dem Gerät als „Tschad MGI M31“ gespeichert. Für die Höhenkorrektur wurde das seitens des BEV angebotene Höhengrid_plus_Geoid mit einer Geoidundulation von ΔN 2.907 [m] in diesem Gebiet verwendet.

5.2. Berechnen der Orthophotos und Geländemodelle

Für die Auswertung der UAV Bilder mittels des Structure from motion Verfahren, wurden zwei Softwarepakete verwendet. Es handelt sich hierbei um Pix4D (Webseite <https://pix4d.com/>) sowie Agisoft PhotoScan (Webseite <http://www.agisoft.com/>). Die Auswertung wird anhand eines Diagramms (in Abbildung 5.2 ersichtlich) erklärt, da beide Programme einen ähnlichen Ablauf der Prozessierung besitzen. Bei beiden Programmen kann entweder Schritt für Schritt ausgewertet werden, oder direkt eine Prozessierung eingestellt werden. In dieser Prozessierung ist es möglich, eigene Werte für die Parameter der Prozesskette hinzuzufügen. Noch zu erwähnen ist, dass bei Pix4D und Agisoft der jeweilige Algorithmus hinter dem Prozess nicht veröffentlicht und damit unbekannt ist.

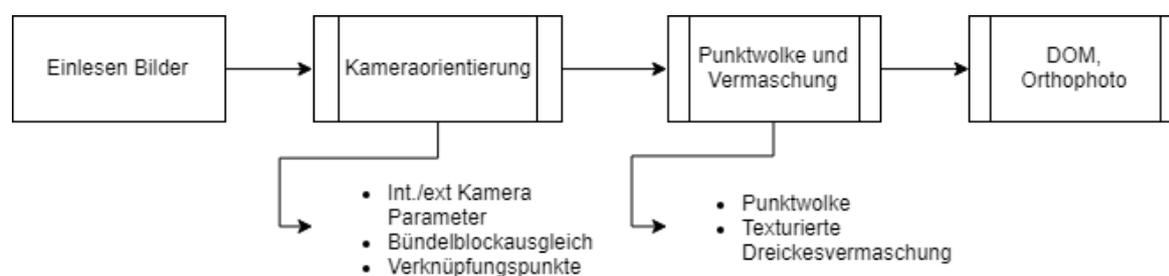


Abbildung 5.2.: Ablauf der Prozessierung Quelle: eigene Abbildung

5. Auswertung der Daten

Der erste Schritt ist das Einlesen der Daten bzw. der Bilder, die Softwareumgebungen verlangen hierbei mindestens zwei Aufnahmen. Nachdem ein Ausgangskordinatensystem festgelegt wurde, in diesem Fall MGI GK M31 (EPSG:31252), können die Bilder bzw. die Kameraorientierung durchgeführt werden. Hierbei werden die internen sowie externen Parameter der Kamera berechnet. Als interne Orientierung wird die Position der Projektionszentrums im Bezug auf eine Bildebene bezeichnet. Die äußere Orientierung beschreibt die Lage und Position der photogrammetrischen Aufnahmen bezüglich des Aufnahmeobjekts. Um ein geocodiertes Ergebnis zu erhalten müssen der Software Passpunkte auf dem Boden und deren ermittelte Position mitgeteilt werden. Dies kann wie in diesem Fall mittels der Positionsbestimmung über GNSS erfolgen. Nachdem einige Passpunkte in den Bildern markiert wurden und eine Reoptimierung der Aufnahmegeometrie durchgeführt wurde, schlagen beide Programme eine Pseudoposition der noch übrigen nicht fixierten Punkte vor. In Abbildung 5.3 ist dies exemplarisch dargestellt.



Abbildung 5.3.: Markieren der Passpunkte in Pix4D Quelle: eigene Darstellung

Sind alle Passpunkte markiert, sollte eine Reoptimierung der Aufnahme-

5.3. Transformation der Orthophotos

geometrie durchgeführt werden. Die weiteren Schritte in diesem Abschnitt der Prozesskette sind die Bündelblockausgleichung und das bestimmen von Verknüpfungspunkten. In dieser Masterarbeit wurden alle Schritte der Prozessierung ohne Unterbrechung abgearbeitet. Es wurden die höchsten Einstellungen für die Qualität der Punktdichte und die Auflösung der texturierten Dreiecksvermaschung verwendet. Als Auflösung für das Orthophoto wurden 10 [cm] ausgewählt. Diese Größe wurde gewählt, um eine einheitliche Auflösung der Ergebnisse zu erhalten, da die beiden Softwareumgebungen sonst unterschiedliche Bodenauflösungen (Ground sample distance (GSD)) ausgeben. Der Wert 10 [cm] ist die nächste ganzzahlige Schranke für die GSD. Nachdem das Orthophoto sowie das optional berechnete DEM erzeugt wurden, speichert die Software dieses ebenso wie den Qualitätsbericht in einem Ordner ab. Den jeweiligen Prozessierungsreport bzw. den Bericht für die jeweilige Epoche mit detaillierten Informationen zu den Berechnungen können dem Anhang ab Seite 61 entnommen werden.

5.3. Transformation der Orthophotos

Das Programm Global Mapper wurde ausgewählt, um die aus den beiden Programmen Pix4Dmapper sowie Agisoft PhotoScan Pro berechneten Orthophotos in ein monochromes 8 Bit mit einer definierten Ausdehnung zu transformieren. Für die Pixelgröße wurde die Größe 10 [cm] festgelegt. Der Grauwert wird aufgrund der Vorteile bei der Bildanalyse mittels Matlab verwendet. Eine rasche Änderung der Grauwerte lässt auf eine Kante in einem Bild zurückschließen [Bru]. Ein Übergang aus dem Farbbereich in den Grauwertbereich kann über die Formel [Pro, S. 112] erfolgen: Grauwert = 0,299 rotanteil + 0,587 grünanteil + 0,114 blauanteil

Da die durch Herrn Professor Kaufmann zur Verfügung gestellte Matlab Routine Bilder der gleichen Ausdehnung voraussetzt, mussten die Export-Grenzen definiert werden. Hierfür wurde wieder zuerst das Projektionssystem festgelegt und danach die Grenzen benannt.

5. Auswertung der Daten

Im Fall der Untersuchung 2016 und 2017 wurden die Grenzen wie folgt festgelegt, um den Pixelmittelpunkt nutzen zu können:

- X upper left -48199.95
- Y upper left 206529.95
- X lower right -47699.95
- Y lower right 206280.05

Das Berechnen eines Grauwert Bildes wurde für alle berechneten Orthophotos 2016 und 2017 durchgeführt.

Für den Vergleich der beiden erstellten Geländemodellen musste aufgrund von unterschiedlicher Ausgabegröße noch eine einheitliche Ausdehnung definiert werden. Dafür wurden die Modelle in Global Mapper geladen und entsprechende in ein Golden Software .grd Format mit den bereits in der Übersicht benannten Ausdehnungen exportiert.

5.4. Analyse der Bewegungen

Die finale Analyse der Bewegung des Blockgletschers zwischen den beiden Epochen 2016 und 2017 wird in der Softwareumgebung Matlab untersucht. Dafür standen seitens des Institut für Geodäsie entwickelte und in Matlab umgesetzte Funktionen bereit, welche durch Herrn Professor Kaufmann freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden.

Die Arbeit in Matlab umfasst die Auswertung der Bildpaare durch ein Konstrukt von Funktionen. Die Steuerung dabei übernimmt eine m-Datei (compute_kinematics...), in welcher die Parameter für die Auswertung angegebenen werden können. Die Parameter der Auswertung können der Tabelle 5.1 auf der nachfolgenden Seite entnommen werden. Für die Auswertung des Daten wurden die Ecken X_{ul} , Y_{ul} , X_{lr} und Y_{lr} mit den bereits bekannten Koordinaten definiert. Ebenfalls wurde die GSD angepasst, in den ersten Versuchen der Auswertung wurde noch mit eine GSD von 5 [cm] gearbeitet. Es stellte sich jedoch heraus, dass es sich mit 10 [cm] GSD besser rechnen

5.4. Analyse der Bewegungen

lässt und die Konsistenz der Beobachtungen im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Auswertungen seitens des Instituts für Geodäsie erhalten wird. Seitens Herrn Professor Kaufmann kam eine Empfehlung, die von ihm gewählten Werte für die Parameter zu übernehmen, da die Werte sich als sinnvoll in vorherigen Untersuchungen herausgestellt hatte.

Tabelle 5.1.: Parameter der Matlabfunktionen Quelle: eigene Darstellung

deltaX	deltaY	w	cmin	dmax	smax	GSD	deltaT
2.5	2.5	31	0.4	30.0	1.0	0.1	1.0711

Über die Funktion *grid_transferbycorrelation()* wird die erste Berechnung durchgeführt und dann in den vorgebenden Dateien als .dat gespeichert. In dieser Funktion werden die definierten Parameter geladen. Die Werte deltaX und deltaY stehen dabei für den Abstand der Messpunkte im regelmäßigen Raster, auch dieser Wert wurde seitens Herrn Professor Kaufmann vorgeschlagen, da er vom Wert w [px] (window size of correlation matrix) abhängig ist. Bei einer GSD von 10 [cm], deltaX sowie deltaY = 2.5 [m] und einem umgerechneten w von 3.1 [m] ergibt sich eine Korrelation von 19% zu den benachbarten Messungen. Diese Wirkung entspricht der eines Tiefpassfilters, also einer Filterung in der Frequenzen oberhalb einer Grenzfrequenz gedämpft werden. Seitens der Detektion von Ausreißern wurde ebenfalls ein eher pragmatischer Ansatz gewählt. Die erhaltenen Daten wurde in Surfer visualisiert und betrachtet. Hierbei wurden Daten die unterhalb von 10 cm liegen nicht visuell dargestellt, von Interesse waren die Ausreißer, welche über der üblichen Bewegung des Gletschers liegen. Bei der Betrachtung der Daten wurden keine groben Ausreißer (beispielsweise 100 [m]) für beide Epochen und Softwareumgebungen gefunden. Es wurde trotzdem eine semi-automatische Elimination von nicht detektieren Ausreißern durchgeführt. Dafür wurde in Surfer der Bereich um den Blockgletscher digitalisiert und als .bln Datei in die Funktion *selectpoint4SURFER* geladen. Die Tabelle 5.2 zeigt einige Werte vor und nach der Ausreißerdetektion. Es ist ersichtlich, dass die Ausreißerkorrektur einige Werte gefiltert hat und dadurch die Güte der Ergebnisse verbessert hat. Die aus Matlab erhaltenen .dat Dateien wurden in Surfer entsprechend weiter bearbeitet und visualisiert.

5. Auswertung der Daten

Tabelle 5.2.: Gegenüberstellung einiger Werte vor der Ausreißer Detektion (v AD) und nach der Ausreißer Detektion (n AD) Quelle: eigene Darstellung

	Pix4D v AD	Pix4D n AD	AS v AD	AS n AD
Maxima	450 [cm]	224[cm]	551[cm]	219[cm]
Mittelwert	72[cm]	176 [cm]	60[cm]	172 [cm]
Standarabweichung	74[cm]	23[cm]	80[cm]	23[cm]

5.5. Visualisierung der Ergebnisse

Das Programm Surfer ist ein sehr vielseitiges Visualisierungswerkzeug, um Daten weiter zu bearbeiten und entsprechend zu visualisieren. In der Grid Umgebung können aus den in Matlab berechneten .dat-Dateien Grids interpoliert und selbige dann weiter analysiert werden. Über den Button Grid Data können die für die weitere Visualisierung notwendigen Grids berechnet werden. Als Interpolationsmethode wurde Kriging verwendet. Unter dieser Methode versteht man ein geostatistisches Verfahren mit dem Werte an Orten, für die keine Stichprobe vorliegt, durch umliegende Messwerte interpolieren oder angenähert werden können [Wik17a]. Ein weiterer Vorteil bei dieser Methode ist das Berücksichtigen der räumlichen Varianz [Wik17a].

5.5. Visualisierung der Ergebnisse

Nachdem das Grid erfolgreich interpoliert wurde, kann es per Contour Map dargestellt werden. Dazu wurden zuerst per Grid Edit Bereiche außerhalb des Gletschers eliminiert bzw. gelöscht. Für die Ausreißer Detektion in Matlab musste ein Bereich um den Gletscher digitalisiert und als .bln Datei gespeichert werden. Diese Datei wurden dann in die Matlab Funktion übergeben. Diese erzeugt aus den Daten der .bln Datei ein Polygon in der die Auswertung stattfindet. Die berechneten Informationen wurden über den bereits beschriebenen Weg als .dat Datei in Surfer als Grid interpoliert, auf den Blockgletscherbereich zurechtgeschnitten und als Contour Map visualisiert.

Die Untersuchung auf systematische Restfehler wurde über die festen Bereiche um den Gletscher überprüft. Es wurden einige Testgebiete in Surfer digitalisiert und dann in die Matlab Funktion *selectpoint4SURFER* geladen. Durch eine Überprüfung von statistischen Kenngrößen, wie zum Beispiel Mittelwert oder Standardabweichung, konnte eine Aussage über etwaige Verschiebungen getroffen werden. Im Fall dieser Masterarbeit wurden geringe Verschiebungen in den Bildern bzw. Daten detektiert. Diese waren wie in der Tabelle 5.3 ersichtlich jedoch so gering, dass keine Korrekturen angebracht wurden, da keine signifikante Beeinflussung der Auswertung und daraus resultierenden Ergebnisse stattfand. Die Daten wurden durch die Betrachtung der Differenz der festen Bereiche 2016 und 2017 gewonnen.

Tabelle 5.3.: Übersicht Verschiebungen in den Aufnahmen 2016 - 2017

	Mittelwert	Median	Standard Abweichung
Pix4D	3,2 [cm]	3,1 [cm]	1,1 [cm]
Agisoft	3,2 [cm]	3,1 [cm]	1,4 [cm]

6. Ergebnis

Die aus den Berechnungen resultierenden Ergebnisse zeigen, wie der Tschadhorn Blockgletscher sich im Zeitraum vom 26. Juli 2016 bis zum 22. August 2017 bewegt hat. Nachfolgend werden die Ergebnisse der beiden Softwarepakete Pix4d und Agisoft miteinander verglichen, des Weiteren folgt ein Vergleich der Airborne Laser Scanning (ALS) Höhen des BEV aus dem Jahr 2009 mit den Höhen der berechneten Geländemodelle. Ebenfalls wird die horizontale Fließbewegung der GNSS Punkte mit denen Bewegungen des jeweiligen Bereiches auf der UAV Berechnung verglichen.

zusätzlich werden die Digitalen Geländemodelle der beiden Softwarepakete verglichen. Um eine Aussage für die Güte der Ergebnisse tätigen zu können, werden die Differenzen der festen Bereiche um den Gletscher in der Epoche verglichen.

Der erste Flug 2016 wurde nur in Pix4D dargestellt, aufgrund einer minimalen Konfiguration an Bildern mit nicht optimaler Überlappung wurde auf die Visualisierung in Agisoft verzichtet.

Um eine gewisse Robustheit des Mittels in den Daten zu erhalten wurde der Median berechnet und in den Ergebnis Plots genannt. Der Median ist im Gegensatz zu dem Mittelwert weniger anfällig für Ausreißer und dient als Verifizierung des Mittelwertes.

6. Ergebnis

6.1. Fließbewegung 2016 - 2017 berechnet mit Pix4D und Agisoft

Die Ergebnisse aus der Berechnung mit Pix4D zeigen, dass der Gletscher sich weniger als in der Epoche 2015-2016 bewegt hat. In diesem Zeitraum lagen die minimalen Bewegungen bei 3,13 [m], die maximalen Bewegungen bei 3,56 [m] der Mittelwert bei 2,91 [m]. In den Jahren 2016 (Flug 2)-2017 lag das Minimum bei 1,13 [m], das Maximum bei 2,24 [m] bei einem Mittelwert von 1,76 [m]. Es handelt sich hierbei um das größere der Gebiete, welche in den beiden nachfolgenden Plots dargestellt werden.

Für den ersten Flug liegen die Werte der Fließbewegung bei einem Minimum vom 2,28 [m], das Maximum bei 2,84 [m] mit einem Mittelwert von 2,47 [m]. Betrachtet man die vorangehenden Epochen liegen die Werte in den Bereichen von 2009-2012 [Kau17]. Hierbei handelt es sich um das kleinere der beiden Gebiete auf der Darstellung „Mittlere jährliche horizontale Flieobewegung 2016 - 2017 berechnet mit Pix4D“

Die Ergebnisse aus der Softwareumgebung Agisoft Photoscan entsprechen bis auf kleinere Abweichungen denen aus Pix4D. Das Minimum liegt hier bei 1,06 [m] (vgl. Pix4D 1,13 [m]), das Maximum bei 2,19 [m] (vgl. Pix4D 2,24 [m]) bei einem Mittelwert von 1,73 [m] (vgl. Pix4D 1,76 [m]). Die Ergebnisse aus dem ersten Flug 2016 verglichen mit 2017 wurden ausgewertet, jedoch aufgrund von unzureichender Datengrundlage nicht visualisiert. Wegen der nicht optimalen Befliegung 2016 konnten keine ausreichende Anzahl an Daten gewonnen werden. Da für die Ausreißerkorrektur ebenfalls der ausgewertete Bereich beschnitten wurde, verringert sich dadurch ebenfalls noch einmal der virtualisierbare Bereich wie in der Darstellung für Pix4D zu sehen ist.

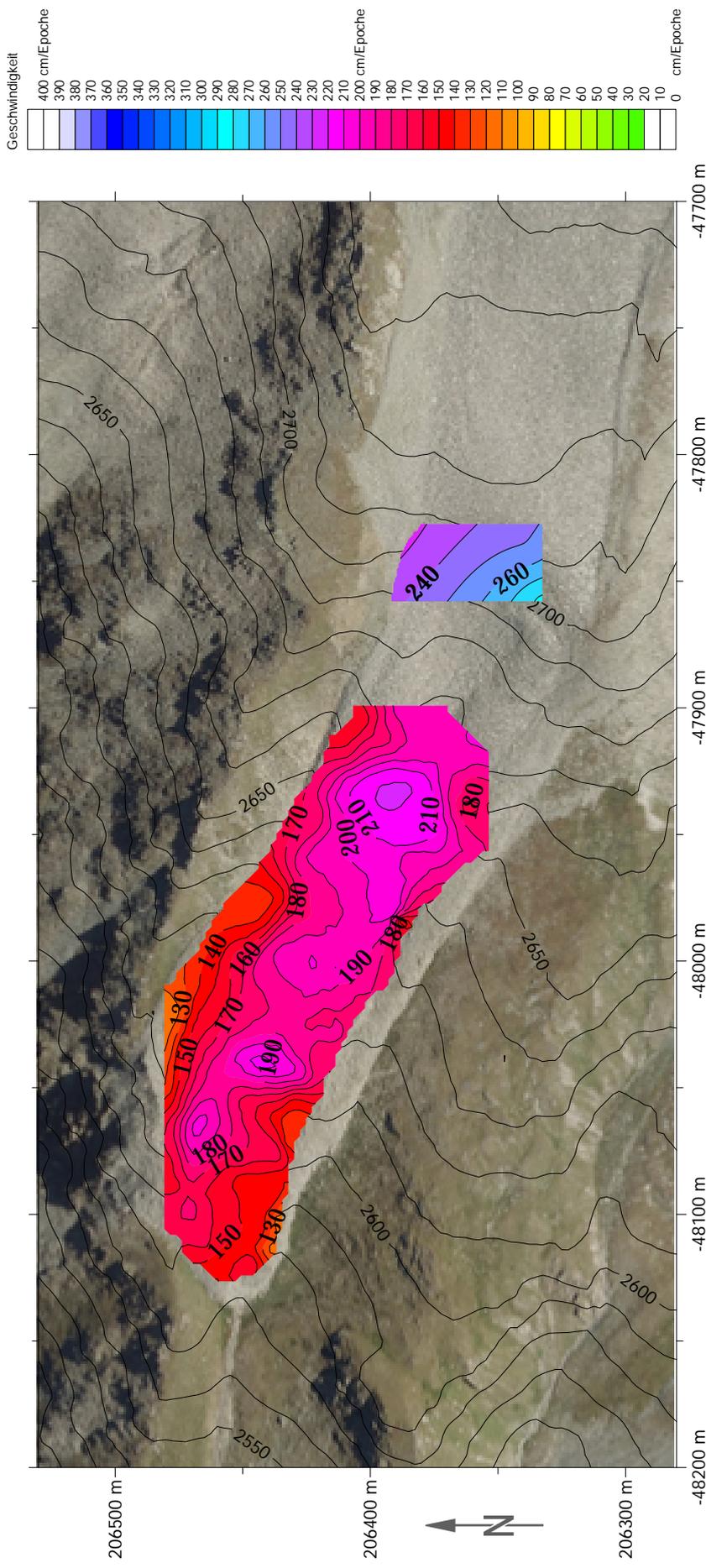
Ersichtlich ist, dass sich die Ergebnisse der beiden Softwareumgebungen über den ganzen Gletscher verteilt entsprechen. Vergleicht man die Standardabweichungen der beiden Ergebnisse fällt auf, dass sich beide Werte annähern diese jedoch sehr hoch sind. Zu begründen ist dies durch Abweichungen von der statistischen Grundgesamtheit der Berechnungen. Ein möglicher Verursacher dafür könnten Ausreißer in den Daten sein, welche trotz Ausreißerdetektion und Bereinigung nicht eliminiert werden konnten.

6.1. Fließbewegung 2016 - 2017 berechnet mit Pix4D und Agisoft

Ein ausschlaggebender Fehlereinfluss ist die Befliegung im Jahr 2016. Aufgrund der nicht optimalen Befliegung im Bezug auf Anzahl der Bilder sowie Unschärfe der Aufnahmen liegt der Fehler in diesem Bereich begründet. Die Ergebnisse des Structure-from-Motion Algorithmus sind abhängig von den Ausgangsdaten. Bei einer feinkörnigeren Struktur wie in diesen Fall, ist es bei unscharfen Aufnahmen schwerer eine höhere Genauigkeit zu erreichen. Eine Möglichkeit zur Überprüfung der Ergebnisse ist der Vergleich der festen Bereiche um den Gletscher. Ebenfalls kann die Güte der Aufnahmen mit Daten aus anderen Aufnahmemethoden verglichen werden. Damit kann eine von den Befliegungen unabhängige Aussage über die Ergebnisse getätigt werden.

Tschadinhorn Blockgletscher 1 : 2 500

Mittlere jährliche horizontale Fließbewegung 2016 - 2017 berechnet mit Pix4D



Datenquellen:
 Orthophoto Epoche 1: 26. Juli 2016, 1. Flug (8 Bilder), RGB, GSD 5,06 cm; 2. Flug RGB (10 Bilder), GSD 4,39 cm UAV-Daten (c) TU/UIVI Graz
 Orthophoto Epoche 2: 22. August 2017, 1. Flug (90 Bilder), RGB, GSD 3,7 cm UAV-Daten (c) TU/UIVI Graz
 Digitales Geländemodell (DGM): Laserscannerbefliegung 20. August 2009, 1m-Raster, Daten (c) Land Tirol
 Orthophoto Hintergrund 28. August 2015, RGB, GSD 16 cm; UltraCam-Daten (c) Land Tirol

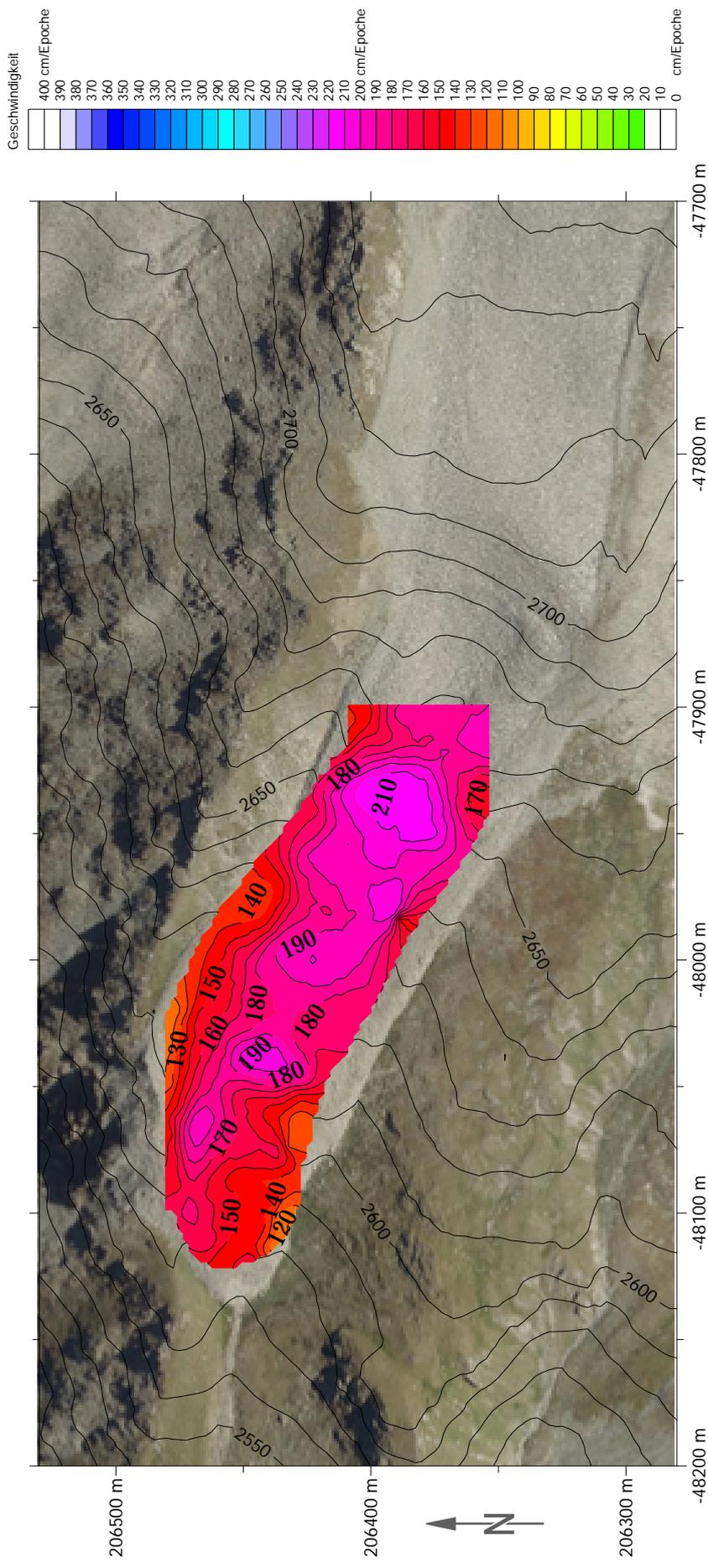
Zeitraum: 392 Tage (1.07118 Jahre)
 Berechnung der Verschiebungsvektoren durch Image Matching (Methode NCC).
 Punktabstand 2,5 m, GSD 10 cm, W 31 px (3,1 m), min. NCC 0,4, BMD < 1 px, 2000 Punkte

Finanzielle Unterstützung: Kärntner Nationalparkfonds Hohe Tauern, Döllach 14, 9843 Großkirchheim

(c) Viktor Kaufmann, Kevin Roth 2018

Tschadinhorn Blockgletscher 1 : 2 500

Mittlere jährliche horizontale Fließbewegung 2016 - 2017 berechnet mit Agisoft Photoscan



Bewegung
 Flug 2:
 Minimum: 106 cm
 Maximum: 219 cm
 Mittelwert: 173 cm
 Median: 175 cm
 Standard Abweichung 23,35 cm

Datenquellen:
 Orthophoto Epoche 1: 26. Juli 2016, 1. Flug (8 Bilder), RGB, GSD 5,06 cm, 2. Flug RGB (10 Bilder), GSD 4,39 cm UAV-Daten (c) TU/UIUNI Graz
 Orthophoto Epoche 2: 22. August 2017, 1. Flug (90 Bilder), RGB, GSD 3,7 cm UAV-Daten (c) TU/UIUNI Graz
 Digitales Geländemodell (DGM): Laserscannerbefliegung 20. August 2009, 1m-Raster, Daten (c) Land Tirol
 Orthophoto Hintergrund 28. August 2015, RGB, GSD 16 cm, UltraCam-Daten (c) Land Tirol

Zeitraum: 392 Tage (1.0718 Jahre)
 Berechnung der Verschiebungsvektoren durch Image Matching (Methode NCC).
 Punktabstand 2,5 m, GSD 10 cm, W 31 px (3,1 m), min. NCC 0,4, BMD < 1 px, 2000 Punkte

Finanzielle Unterstützung: Kärntner Nationalparkfonds Hohe Tauern, Dollach 14, 9843 Großkirchheim
 (c) Viktor Kaufmann, Kevin Roth 2018

6.2. Differenz der festen Bereiche um den Gletscher 2016 - 2017

Um die Güte der Ergebnisse kontrollieren zu können, wurden die statischen Bereiche um den Gletscher in jeweils drei Testregionen untersucht. Hierfür wurden Gebiete ausgesucht, die um den Gletscher verteilt liegen und nicht am Rand der berechneten Ergebnisse, um Fehler durch aufnahmebedingte Datenlücken zu vermeiden. Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass sowohl strukturiertes, als auch ebenes Gelände betrachtet wird.

Beide Programme erreichen hier annähernd die selbe Differenz, Pix4d liegt bei 2,8 [cm], Agisoft bei 3 [cm]. Da die nicht kinematischen Bereiche um den Gletscher einen Wert gegen Null anzeigen müssen bestätigen die berechneten Differenzen die Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Diese Werte liegen im Bereich der maximalen Bodenauflösung und können aufgrund dessen nicht genau Null werden. In dieser Auswertung wurden diese Werte nicht als Offset angenommen, da die Größe der Differenz einen nicht ausschlaggebenden Einfluss auf das Ergebnis der Auswertung hat.

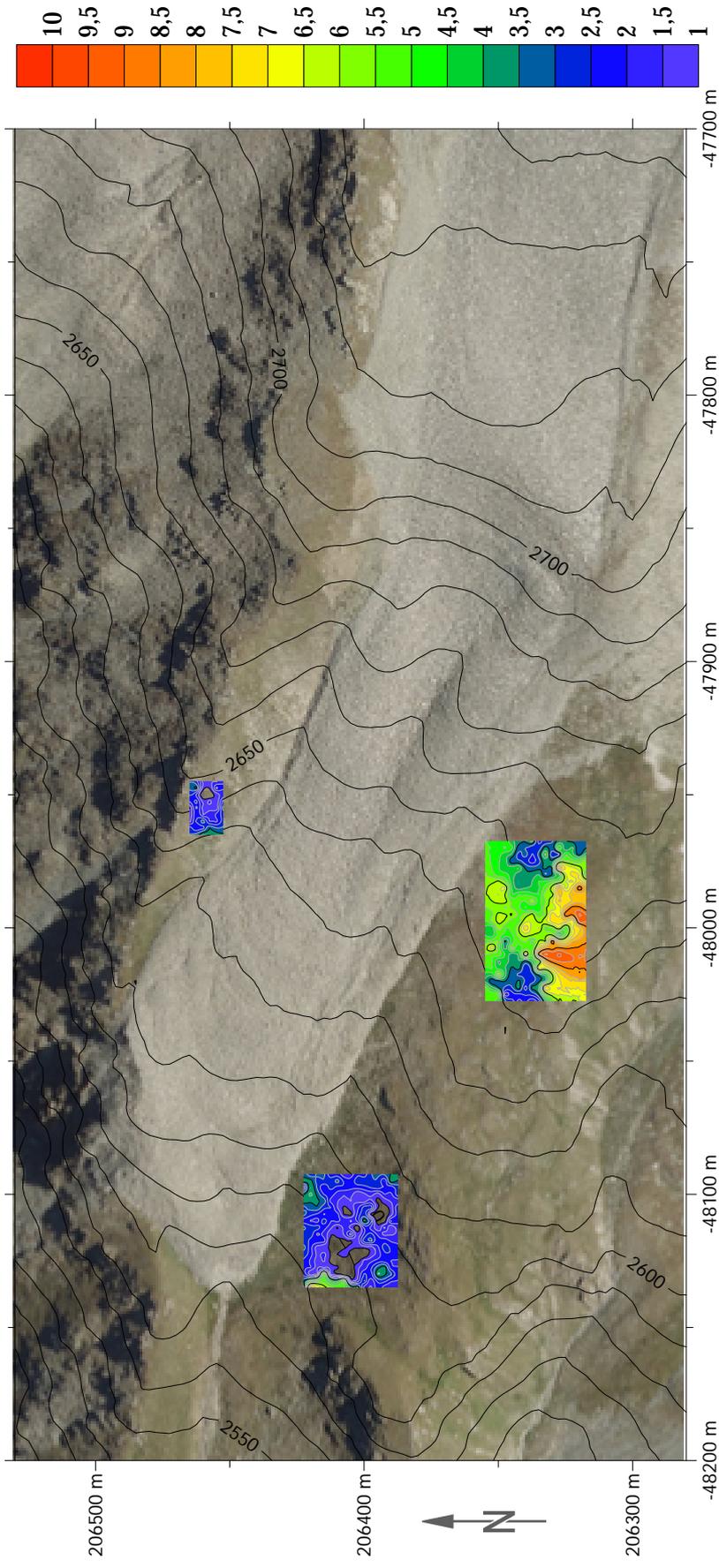
Die Ergebnisse zeigen, dass in den Aufnahmen eine geringe Differenz vorhanden ist. Da diese jedoch in einem Bereich unterhalb von 3 [cm] liegt, werden die Ergebnisse übernommen. Gründe für diese Differenz kann die maximale mögliche Auflösung der Aufnahmen und daraus resultierend die Auflösung der Orthophotos sein.

Abschließend ist diese Kontrolle der Berechnungen positiv und zeigt, dass die Ergebnisse aus den Berechnungen stimmen.

Tschadinhorn Blockgletscher 1 : 2 500

Differenz der statischen Bereiche um den Gletscher 2016 - 2017 berechnet mit Pix4D

Differenz in cm



Datenquellen:
 Orthophoto Epoche 1: 26. Juli 2016, 1. Flug (8 Bilder), RGB, GSD 5.06 cm, 2. Flug RGB (10 Bilder), GSD 4.39cm UAV-Daten (c) TU/UIVI Graz
 Orthophoto Epoche 2: 22. August 2017, 1. Flug (90 Bilder), RGB, GSD 3.7 cm UAV-Daten (c) TU/UIVI Graz
 Digitales Geländemodell (DGM): Laserscannerbefliegung 20. August 2009, 1m-Raster, Daten (c) Land Tirol
 Orthophoto Hintergrund 28. August 2015, RGB, GSD 16 cm, UltraCam-Daten (c) Land Tirol

Zeitraum: 392 Tage (1.0718 Jahre)
 Berechnung der Verschiebungsvektoren durch Image Matching (Methode NCC).
 Punktabstand 2.5 m, GSD 10 cm, W 31 px (3.1 m), min. NCC 0.4, BMD < 1 px, 2000 Punkte

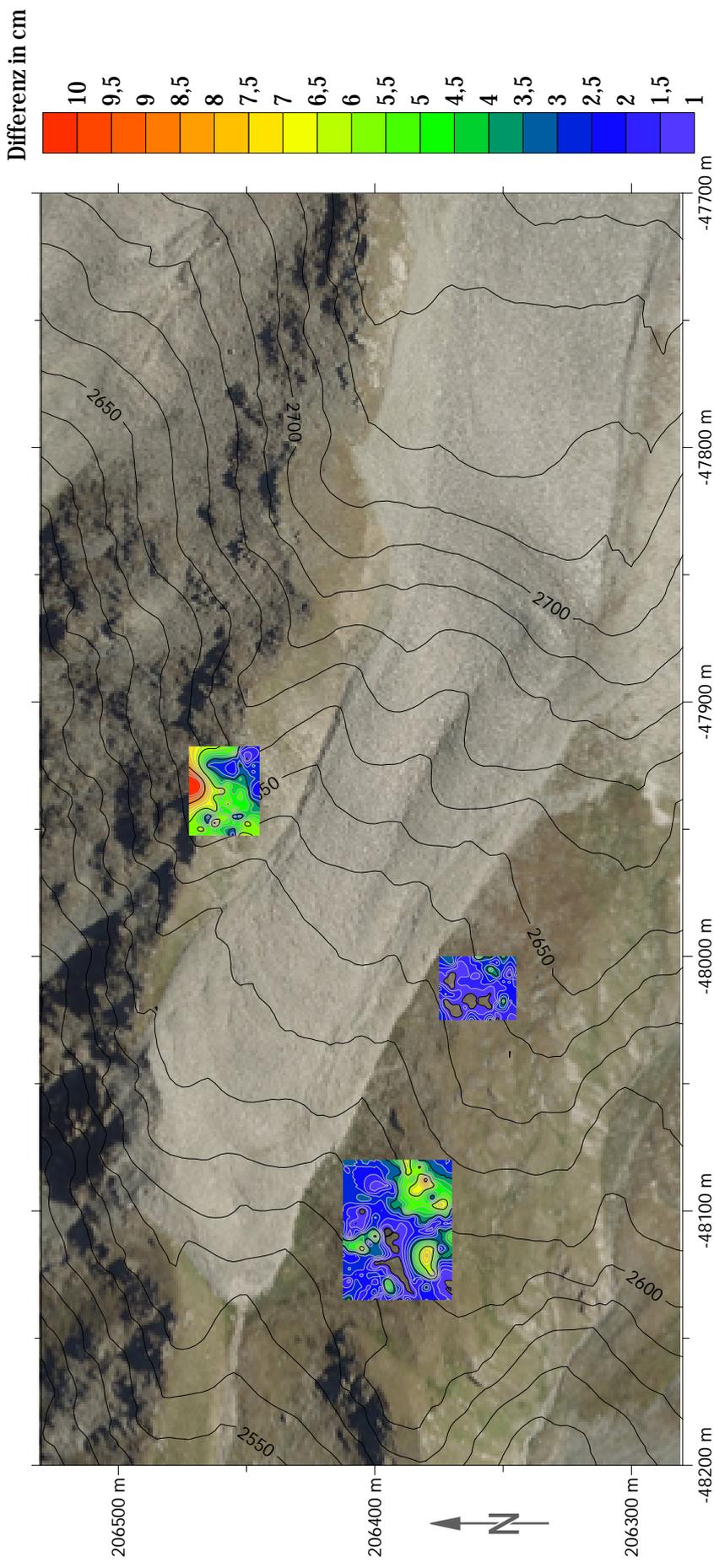
Finanzielle Unterstützung: Kärntner Nationalparkfonds Hohe Tauern, Dollach 14, 9843 Großkirchheim

(c) Viktor Kaufmann, Kevin Roth 2018

Übersicht statische Testgebiete
 Mittelwert: 3.2 cm
 Median: 3.1 cm
 Standard Abweichung: 1.1 cm
 Root Mean Square: 3.4 cm

Tschadinhorn Blockgletscher 1 : 2 500

Differenz der statischen Bereiche um den Gletscher 2016 - 2017 berechnet mit Agisoft Photoscan



Datenquellen:
 Orthophoto Epoche 1: 26. Juli 2016, 1. Flug (8 Bilder), RGB, GSD 5,06 cm, 2. Flug RGB (10 Bilder), GSD 4,39cm UAV-Daten (c) TU/UIWI Graz
 Orthophoto Epoche 2: 22. August 2017, 1. Flug (90 Bilder), RGB, GSD 3,7 cm UAV-Daten (c) TU/UIWI Graz
 Digitales Geländemodell (DGM): Laserscannerbefliegung 20. August 2009, 1m-Raster, Daten (c) Land Tirol
 Orthophoto Hintergrund 28. August 2015, RGB, GSD 16 cm, UltraCam-Daten (c) Land Tirol

Zeitraum: 392 Tage (1.07118 Jahre)
 Berechnung der Verschiebungsvektoren durch Image Matching (Methode NCC).
 Punktabstand 2,5 m, GSD 10 cm, W 31 px (3,1 m), min. NCC 0,4, BMD < 1 px, 2000 Punkte

Übersicht statische Testgebiete
 Mittelwert: 3,2 cm
 Median: 3,1 cm
 Standard Abweichung: 1,4 cm
 Root Mean Square: 3,7 cm

Finanzielle Unterstützung: Kärntner Nationalparkfonds Hohe Tauern, Dollach 14, 9843 Großkirchheim

(c) Viktor Kaufmann, Kevin Roth 2018

6.3. Unterschied Höhe ALS Daten 2009 - DGM Pix4D, DGM Agisoft

Als weitere Kontrolle der Ergebnisse dienen die Vergleiche der berechneten digitalen Geländemodelle mit denen im Jahr 2009 erhobenen Laserscanner Daten. Hierfür wurden zwei Testgebiete ober- sowie unterhalb des Gletschers bestimmt. In diesen Bereichen wurden die Höhenunterschiede berechnet. Es wurde darauf geachtet, dass möglichst großflächige Bereiche ausgewählt wurden, um ein repräsentatives Ergebnis zu gewährleisten.

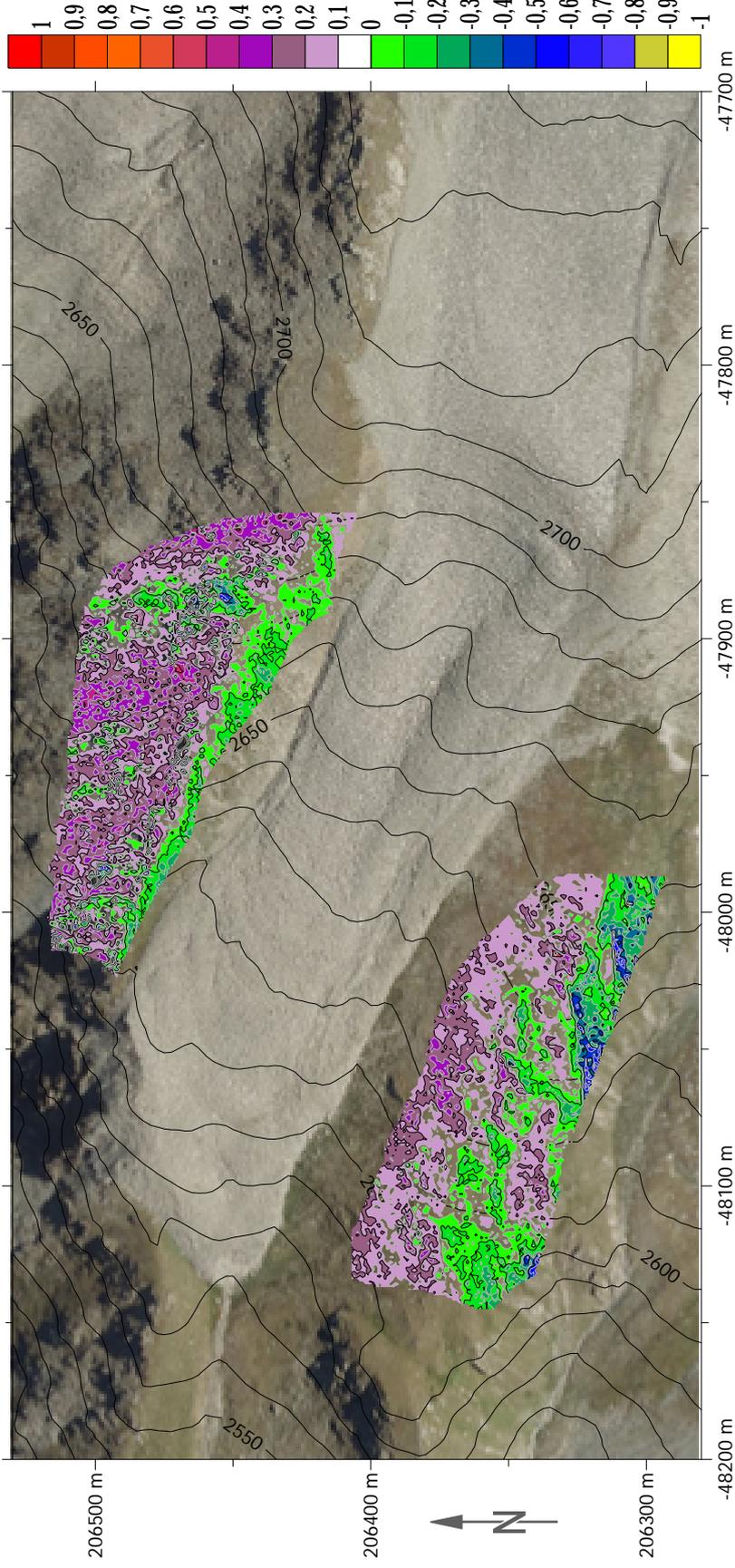
Beide Softwareumgebungen liegen für die Aufnahme 2017 unterhalb von 10 [cm] Differenz. Diese Abweichung kann zum Einen damit erklärt werden, dass die ALS Daten aus 2009 stammen zum Anderen liegen die statischen Bereiche eher am Rand des beobachteten Gebietes. An einer Überprüfung der stabilen Bereiche bestand bei den Befliegung 2017 kein primäres Interesse. Durch Einflüsse wie Wind, Schneedecken sowie Niederschlag fand eine Veränderung gegenüber den Jahren 2016 und 2017 statt. Gerade die Boden-erosion kann durch Schneeschmelze beeinflusst werden, da es sich hierbei um einen überwiegend felsigen Bereich handelt sind die Veränderungen nur minimal bzw. im Zentimeterbereich [Tho]. Die Ergebnisse zeigen, dass die Höhen der Geländemodelle bis auf die beschriebenen Differenzen zu den durch das Bundesamt erhobenen Daten passen.

Die Vergleiche der Modelle aus Pix4d und Agisoft 2016 zeigen Unterschiede in den Differenzen. Die Unterschiede liegen für das Geländemodell berechnet von Agisoft bei 13,8 [cm] im Mittel, für Pix4D liegt der Wert bei 19,4 [cm] Differenz. Dies kann zum einen damit begründet werden, dass die Randbereiche 2016 kleiner ausfallen und Datenlücken bzw. Ausreißer in diesem Gebiet vorkommen können. Vergleicht man die Größe der Testgebiete 2017 zu 2016 ergeben sich ebenfalls Unterschiede, über das größere Gebiet wird die Stichprobe zuverlässiger. Dies ist dadurch zu begründen, dass mehr Daten für die Untersuchung verwendet werden können. Schlussendlich stützen diese Vergleiche die Kontrolle der berechneten Geländemodelle und den daraus resultierenden Höhen.

Tschadinhorn Blockgletscher 1 : 2 500

Unterschied Höhe ALS Daten 2009 - DGM Pix4D 2017

Differenz in m



Datenquellen:
Orthophoto 22. August 2017 1. Flug (90 Bilder), RGB, GSD 3.7 cm UAV-Daten (c) TU/UNI Graz
Digitales Geländemodell (DGM): Laserscannerbefliegung 20. August 2009, 1m-Raster, Daten (c) Land Tirol
Orthophoto Hintergrund 28. August 2015, RGB, GSD 16 cm, UltraCam-Daten (c) Land Tirol

Berechnung der Verschiebungsvektoren durch Image Matching (Methode NCC).
Punktabstand 2.5 m, GSD 10 cm, W 31 px (3.1 m), min. NCC 0.4, BMD < 1 px, 2000 Punkte

Finanzielle Unterstützung: Kärntner Nationalparkfonds Hohe Tauern, Döllach 14, 9843 Großkirchheim

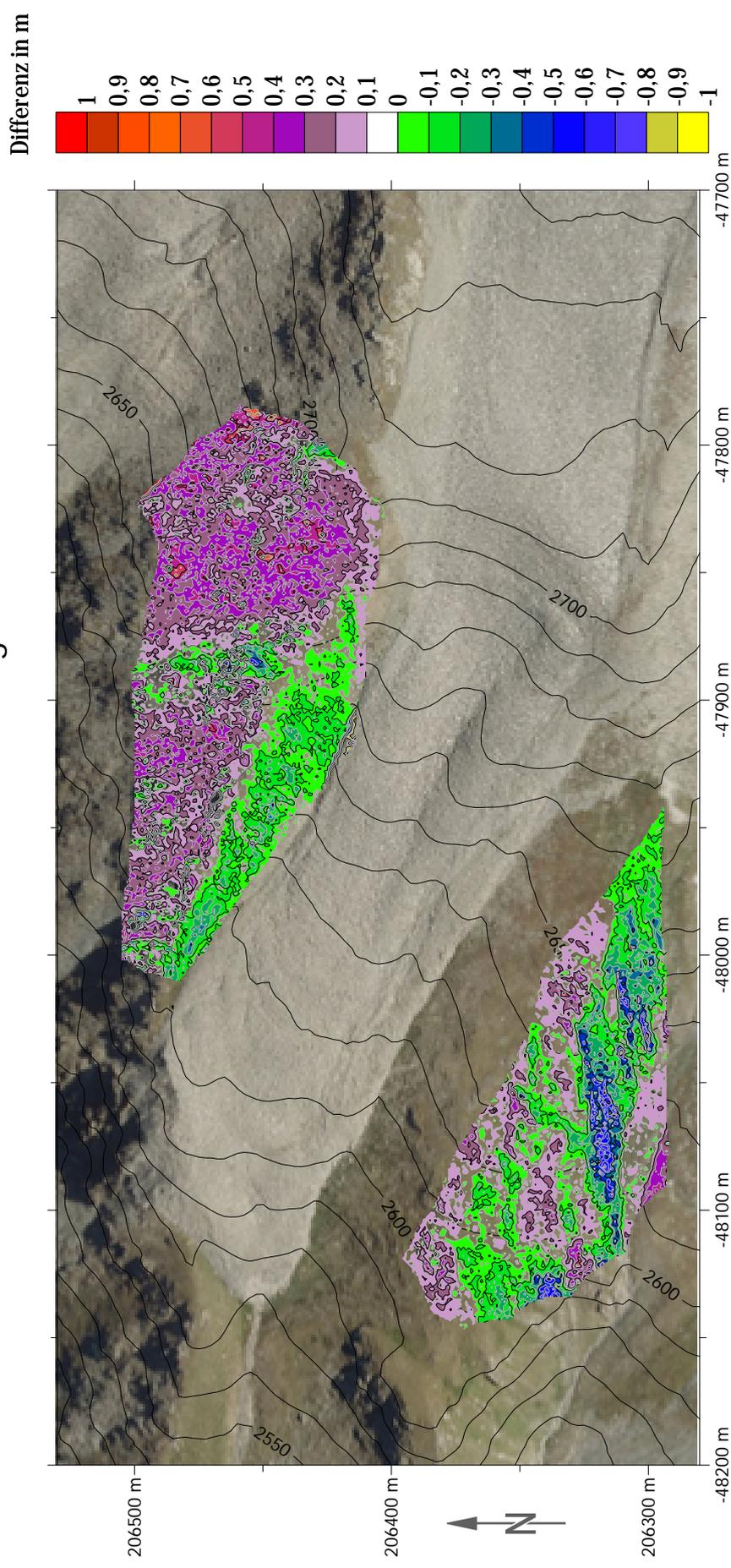
(c) Viktor Kaufmann, Kevin Roth 2018

Differenz ALS Daten-Pix4D DGM

Median: 9,9 cm
Standardabweichung: 7,1 cm
Standardabweichung: 20,3 cm
Root Mean Square Error: 21,5 cm

Tschadinhorn Blockgletscher 1 : 2 500

Unterschied Höhe ALS Daten 2009 - DGM Agisoft Photoscan 2017



Datenquellen:
Orthophoto: 22. August 2017 1. Flug (90 Bilder), RGB, GSD 3,7 cm UAV-Daten (c) TU/UNI Graz
Digitales Geländemodell (DGM): Laserscannerbefliegung 20. August 2009, 1m-Raster, Daten (c) Land Tirol
Orthophoto Hintergrund 28. August 2015, RGB, GSD 16 cm, UltraCam-Daten (c) Land Tirol

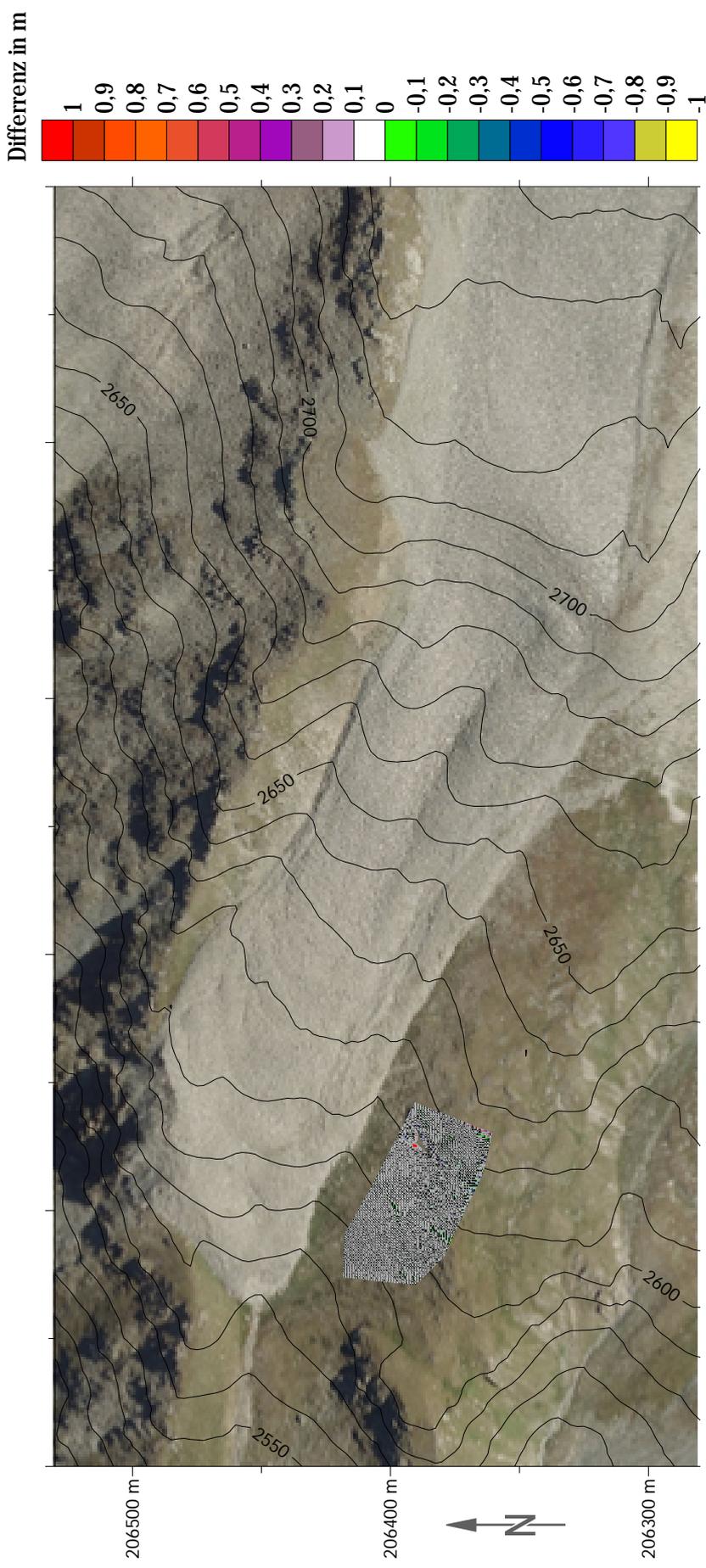
Berechnung der Verschiebungsvektoren durch Image Matching (Methode NCC).
Punktabstand 2,5 m, GSD 10 cm, W 31 px (3,1 m), min. NCC 0,4, BMD < 1 px, 2000 Punkte

Finanzielle Unterstützung: Kärntner Nationalparkfonds Hohe Tauern, Döllach 14, 9843 Großkirchheim
(c) Viktor Kaufmann, Kevin Roth 2018

Differenz ALS Daten-Agisoft DGM
Mittelwert: 7,9 cm
Standardabweichung: 23,6 cm
Root Mean Square Error: 24,4 cm

Tschadinhorn Blockgletscher 1 : 2 500

Unterschied Höhe ALS Daten 2009 - DGM Pix4D 2016



Datenquellen:
Orthophoto: 22. August 2017 1. Flug (90 Bilder), RGB, GSD 3.7 cm UAV-Daten (c) TU/UNI Graz
Digitales Geländemodell (DGM): Laserscannerbefliegung 20. August 2009, 1m-Raster, Daten (c) Land Tirol
Orthophoto Hintergrund 28. August 2015, RGB, GSD 16 cm, UltraCam-Daten (c) Land Tirol

Berechnung der Verschiebungsvektoren durch Image Matching (Methode NCC).
Punktabstand 2.5 m, GSD 10 cm, W 31 px (3.1 m), min. NCC 0.4, BMD < 1 px, 2000 Punkte

Finanzielle Unterstützung: Kärntner Nationalparkfonds Hohe Tauern, Döllach 14, 9843 Großkirchheim

(c) Viktor Kaufmann, Kevin Roth 2018

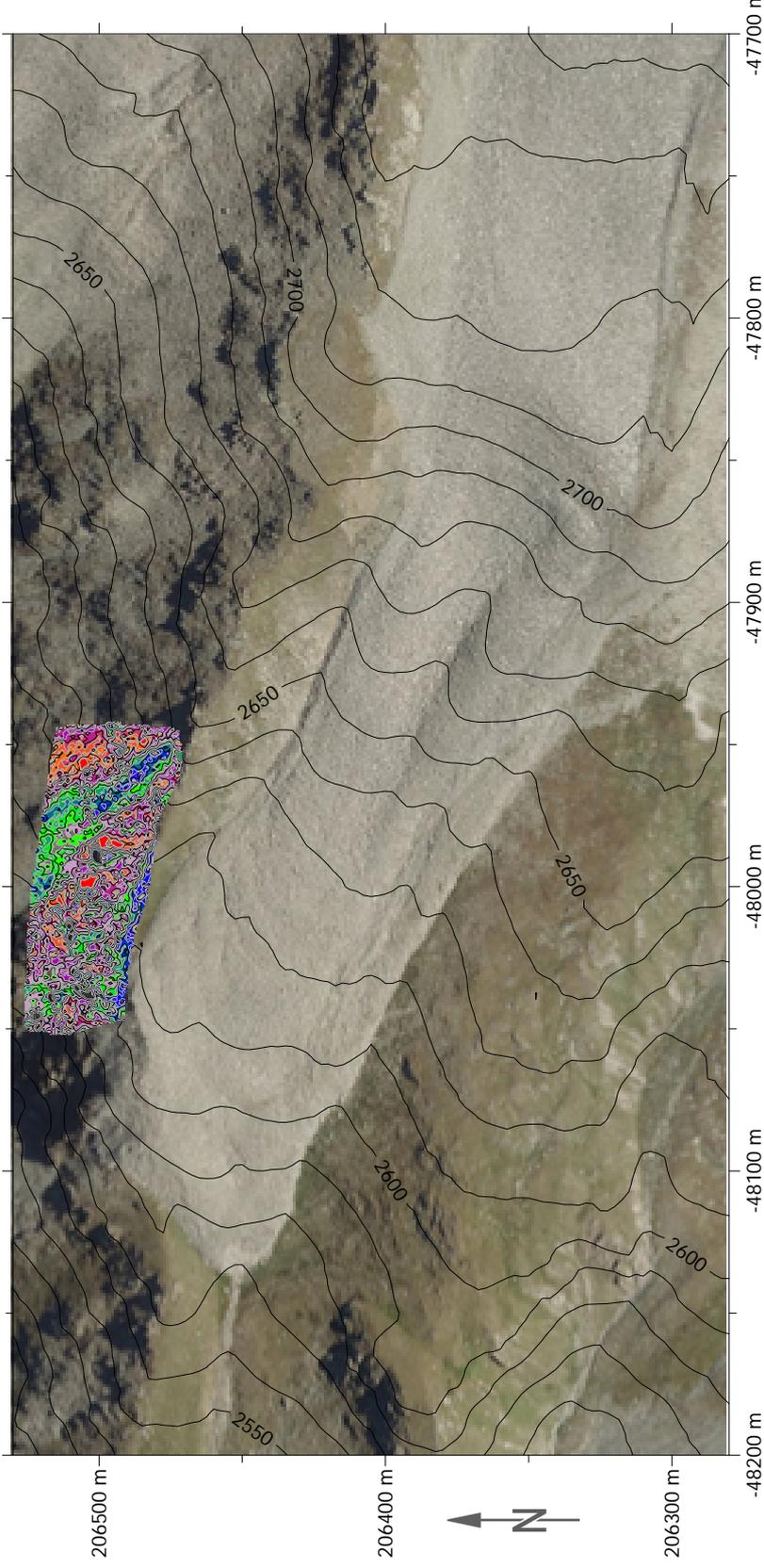
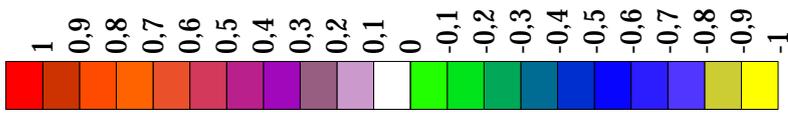
Differenz ALS Daten-Pix4D DGM

Median: -19,4 cm
Mittelwert: -20,6 cm
Standard Abweichung: 27,2 cm
Root Mean Square: 34,2 cm

Tschadinhorn Blockgletscher 1 : 2 500

Unterschied Höhe ALS Daten 2009 - DGM Agisoft 2016

Differenz in m



Datenquellen:
Orthophoto 22. August 2017 1. Flug (90 Bilder), RGB, GSD 3,7 cm UAV-Daten (c) TU/UNI Graz
Digitales Geländemodell (DGM): Laserscannerbefliegung 20. August 2009, 1m-Raster, Daten (c) Land Tirol
Orthophoto Hintergrund 28. August 2015, RGB, GSD 16 cm, UltraCam-Daten (c) Land Tirol

Berechnung der Verschiebungsvektoren durch Image Matching (Methode NCC).
Punktabstand 2,5 m, GSD 10 cm, W 31 px (3,1 m), min. NCC 0,4, BMD < 1 px, 2000 Punkte

Finanzielle Unterstützung: Kärntner Nationalparkfonds Hohe Tauern, Döllach 14, 9843 Großkirchheim

(c) Viktor Kaufmann, Kevin Roth 2018

Differenz ALS Daten-Agisoft DGM

Median: 13,8 cm
Mittelwert: 12,1 cm
Standard Abweichung: 47,3 cm
Root Mean Square: 48,8 cm

6.4. Unterschiede im DGM Pix4D und Agisoft PhotoScan

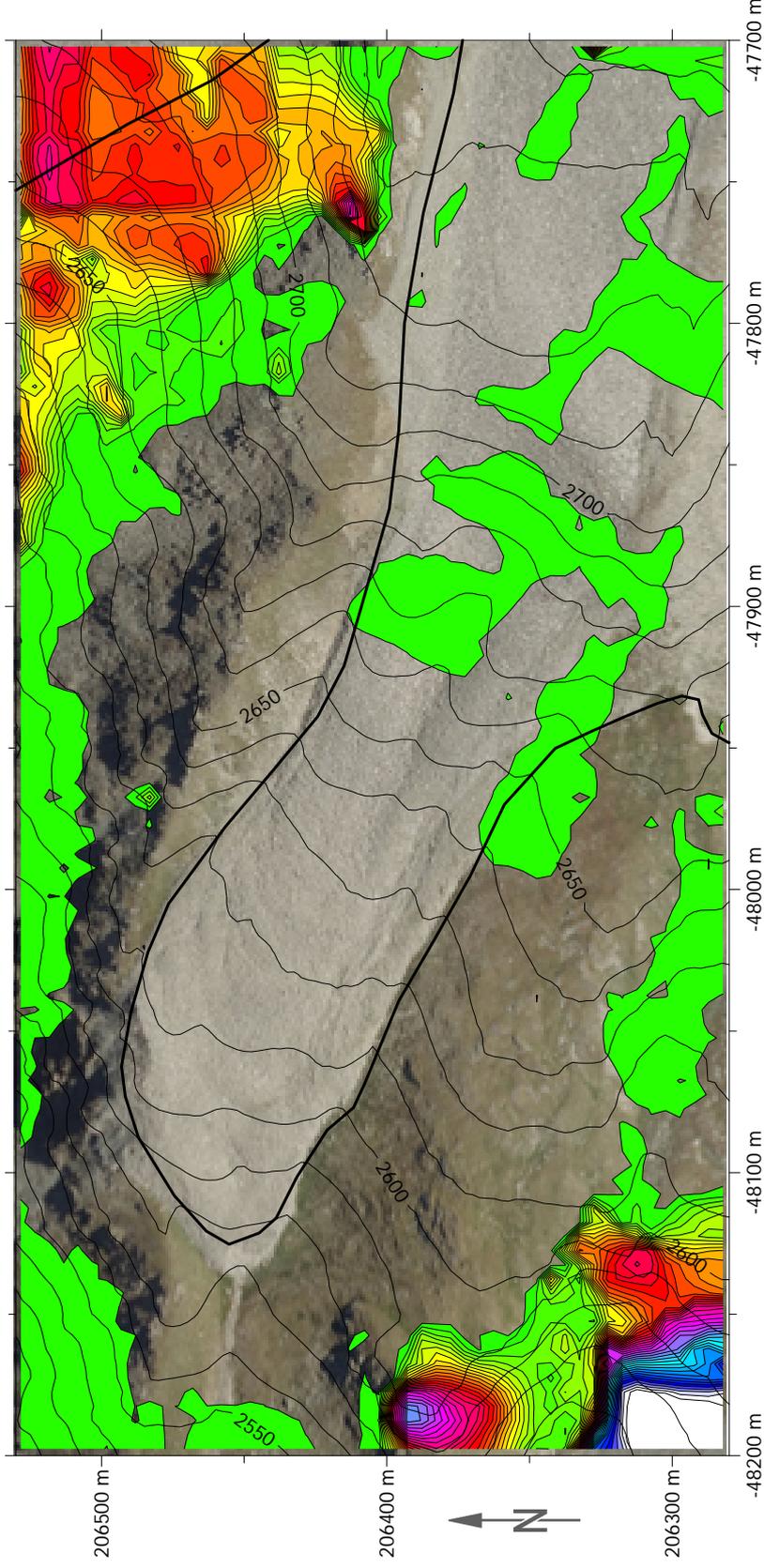
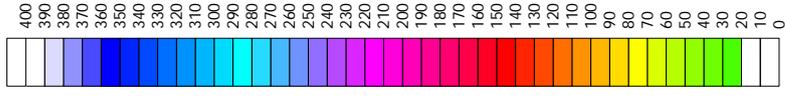
Um zu validieren, wie die beiden digitalen Geländemodelle zueinander passen, wurden die Epochen 2016 und 2017 miteinander verglichen. Der Median liegt für die Epoche 2016 bei 5 [cm], für 2017 bei 8 [cm]. Zu beachten ist hierbei, dass die Fläche über welche die Differenz 2017 gebildet wird wesentlich größer ist als 2016. Dies liegt an der besseren Befliegung im Jahr 2017, in der mehr und qualitativ hochwertigere Bilder aufgenommen wurden. Wie auf dem Plot 2017 ersichtlich, liegt in der linken unteren Ecke am Rand der Aufnahmen eine nicht mehr optimale Aufnahmegeometrie vor. Dies führt zu Ausreißern bzw. zu höheren Differenzen zwischen den beiden digitalen Geländemodellen. In dem Modell von 2017 ist ersichtlich, dass die größten Abweichungen auf dem eigentlichen Blockgletscher vor dem steiler ansteigenden Stück liegen. Dies kann mit Problemen im Algorithmus bzw. in dem eigentlichen Flug begründet werden. Aufgrund der stärker abfallenden Topographie, erhöht sich der Abstand der Drohne zum Boden. Dadurch bedingt nimmt die Qualität der berechneten Ergebnisse ab, da es für den Algorithmus schwieriger ist Keypoints zu finden. In den Bereichen in denen das Gelände weniger stark steigt, sind die Differenzen geringer bzw. tendieren gegen Null.

Für die Epoche 2016 Flug 2 gilt das selbe wie für die bestimmten Differenzen: In den Bereichen der Randzone nehmen die Differenzen aufgrund von unzureichenden Informationen zu. Im Bereich des stärkeren Anstiegs, in der Mitte des Blockgletschers, steigen die Differenzen wieder über 3 [m] an. Der relativ gleichmäßig steigend bzw. fallende Teil, am Anfang des Blockgletschers, hat hingegen geringe Differenzen.

Tschadinhorn Blockgletscher 1 : 2 500

Unterschiede im DGM aus 2017 berechnet mit Pix4D und Agisoft PhotoScan

Differenz in cm



Datenquellen:
 Orthophoto Epoche 1: 26. Juli 2016, 1. Flug (8 Bilder), RGB, GSD 5,06 cm, 2. Flug RGB (10 Bilder), GSD 4,39cm UAV-Daten (c) TU/UIVI Graz
 Orthophoto Epoche 2: 22. August 2017, 1. Flug (90 Bilder), RGB, GSD 3,7 cm UAV-Daten (c) TU/UIVI Graz
 Digitales Geländemodell (DGM): Laserscannerbefliegung 20. August 2009, 1m-Raster, Daten (c) Land Tirol
 Orthophoto Hintergrund 28. August 2015, RGB, GSD 16 cm, UltraCam-Daten (c) Land Tirol

Zeitraum: 392 Tage (1.07118 Jahre)
 Berechnung der Verschiebungsvektoren durch Image Matching (Methode NCC).
 Punktabstand 2,5 m, GSD 10 cm, W 31 px (3,1 m), min. NCC 0,4, BMD < 1 px, 2000 Punkte

Differenz Pix4d DGM-Agisoft DGM
 Minimum: 0,3 cm
 Maximum: 502 cm
 Median: 8,2 cm
 Mittelwert: 26,9 cm
 Standard Abweichung: 56,9 cm
 Root Mean Square: 62,9 cm

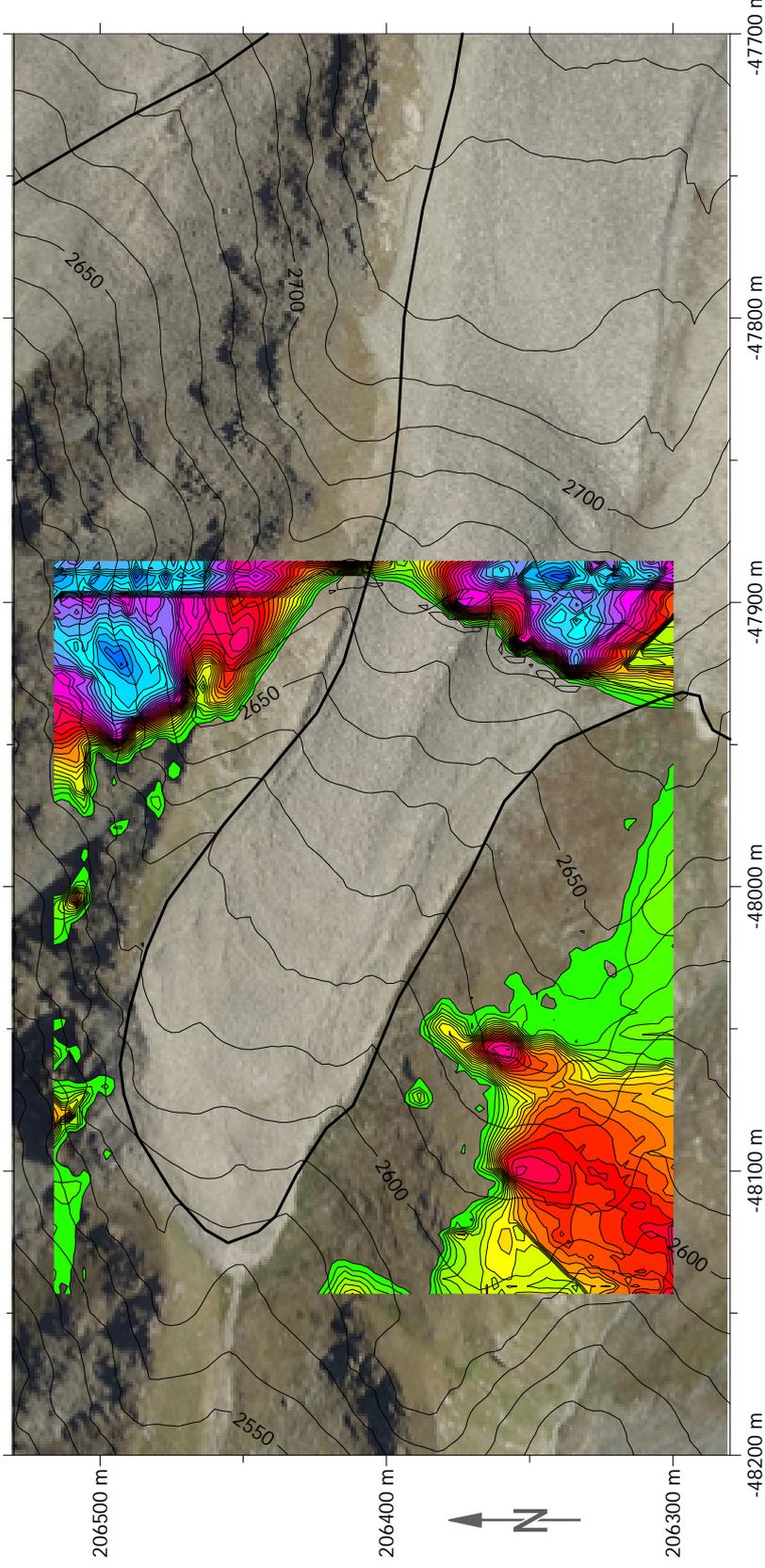
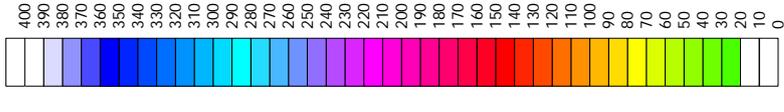
Finanzielle Unterstützung: Kärntner Nationalparkfonds Hohe Tauern, Döllach 14, 9843 Großkirchheim
 (c) Viktor Kaufmann, Kevin Roth 2018



Tschadinhorn Blockgletscher 1 : 2 500

Unterschiede im DGM aus 2016 berechnet mit Pix4D und Agisoft PhotoScan

Differenz in cm



Datenquellen:
 Orthophoto Epoche 1: 26. Juli 2016, 1. Flug (8 Bilder), RGB, GSD 5,06 cm, 2. Flug RGB (10 Bilder), GSD 4,39 cm UAV-Daten (c) TU/UII Graz
 Orthophoto Epoche 2: 22. August 2017, 1. Flug (90 Bilder), RGB, GSD 3,7 cm UAV-Daten (c) TU/UII Graz
 Digitales Geländemodell (DGM): Laserscannerbefliegung 20. August 2009, 1m-Raster, Daten (c) Land Tirol
 Orthophoto Hintergrund 28. August 2015, RGB, GSD 16 cm, UltraCam-Daten (c) Land Tirol

Zeitraum: 392 Tage (1.07118 Jahre)
 Berechnung der Verschiebungsvektoren durch Image Matching (Methode NCC).
 Punktabstand 2,5 m, GSD 10 cm, W 31 px (3,1 m), min. NCC 0,4, BMD < 1 px, 2000 Punkte

Finanzielle Unterstützung: Kärntner Nationalparkfonds Hohe Tauern, Döllach 14, 9843 Großkirchheim

(c) Viktor Kaufmann, Kevin Roth 2018

Differenz Pix4D DGM-Agisoft DGM

Minimum: -4,8 cm
 Maximum: 342 cm
 Median: 5,4 cm
 Mittelwert: 45,8 cm
 Standard Abweichung: 78 cm
 Root Mean Square: 90,5 cm

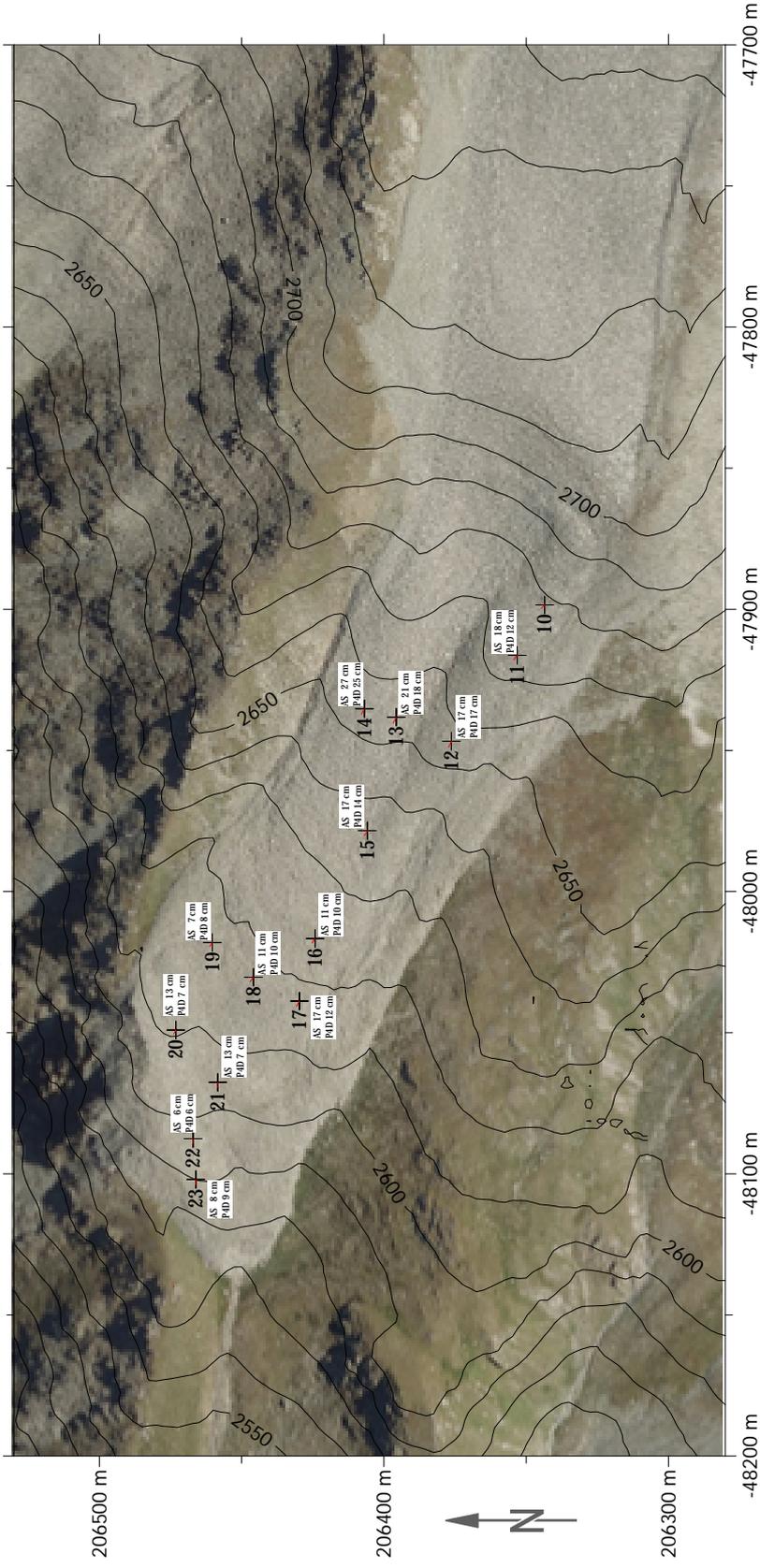
6.5. Fließbewegung 2016 - 2017 GNSS vs UAV

Als Verifizierung für die Güte der Lage dienen die Differenzen der aus den GNSS Messungen bestimmten Positionen. Diese Differenz wurde mit den berechneten Ergebnissen aus Agisoft und Pix4D verglichen. Zu sehen ist, dass der Median für Pix4D bei 10 [cm] Abweichung liegt, Agisoft liegt bei 13 [cm]. Das Maximum der Abweichung liegt bei Punkt 14 vor. Hier beträgt die Abweichung 27 [cm] und 25 [cm] für Agisoft. Interessant ist, dass im Punkt 20, 21, 17 und 11 die Abweichungen von Agisoft verglichen mit denen von Pix4D deutlich höher sind. Hier scheint es Unterschiede in der internen Berechnungsroutine der Programme zu geben, da Pix4D andere Abweichungen liefert als Agisoft.

Die Differenz zu den GNSS Messungen zeigt jedoch, dass die Auswertung mittels UAV dennoch verwertbare Ergebnisse liefert, welche im Bereich der tatsächlichen Fließgeschwindigkeit liegen.

Tschadinhorn Blockgletscher 1 : 2 500

Mittlere jährliche horizontale Fließbewegung (Lage) 2016 - 2017 GNSS vs UAV
 Festpunkte mittels GNSS bestimmt



Datenquellen:
 GNSS Messung Epoche 1: 26. Juli 2016, (c) TU/UIUNI Graz
 GNSS Messung Epoche 2: 22. August 2017 (c) TU/UIUNI Graz
 Orthophoto Epoche 1: 26. Juli 2016, 1. Flug (8 Bilder), RGB, GSD 5,06 cm, 2. Flug RGB (10 Bilder), GSD 4,39 cm UAV-Daten (c) TU/UIUNI Graz
 Orthophoto Epoche 2: 22. August 2017, 1. Flug (90 Bilder), RGB, GSD 3,7 cm UAV-Daten (c) TU/UIUNI Graz
 Orthophoto Hintergrund 28. August 2015, RGB, GSD 16 cm, UltraCam-Daten (c) Land Tirol

Zeitraum t: 392 Tage (1.07118 Jahre)

Finanzielle Unterstützung: Kärntner Nationalparkfonds Hohe Tauern, Döllach 14, 9843 Großkirchheim
 (c) Viktor Kaufmann, Kevin Roth 2018

Abweichung zu GNSS Punkten

	Pix4D	Agisoft
Minimum:	7 cm	6 cm
Maximum:	25 cm	27 cm
Median:	10 cm	13 cm
Standard Abw	11 cm	17 cm

— Differenzvektor GNSS 2016/2017

6.6. Zusammenfassung Ergebnisse

Die Ergebnisse und die Kontrollen der Ergebnisse zeigen, dass sich mittels eines UAV eine Bestimmung der Fließgeschwindigkeit und Deformation des Blockgletschers durchführen lässt. Die Vergleiche der digitalen Geländemodelle und die Differenz zu den mittels GNSS gemessenen Fließgeschwindigkeiten liegt in einem für die Auswertung ausreichenden Bereich. Es gilt zu beachten, dass die Befliegung 2016 nicht optimal-aufgrund von äußeren Umständen wie Böen und dem fast Absturz der Drohne durchgeführt werden konnte. In der Epoche 2017 wurde mit anderen Drohnen die Messungen wiederholt, wobei die DJI Maveric Pro als Vergleichsplattform für diese Masterarbeit genutzt wurde. Betrachtet man die Orthophotos aus den beiden Epochen fällt auf, dass schon für einen menschlichen Betrachter die beiden Photos aus 2017 feinkörniger sind. Aufgrund der großen Anzahl an Aufnahmen ist die Überdeckung optimal und die Bereiche am Rande des Blockgletschers können ebenfalls für Untersuchungen und Kontrollen genutzt werden. 2016 hingegen sind die festen Bereiche um den Blockgletscher kleiner als die in 2017, dies hängt mit der deutlich kleineren Anzahl an Bilder zusammen.

6. Ergebnis

6.7. Fazit

Die durch die Auswertung gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist mit einer Drohne Bilder für die Bewegungs- und Deformationsanalyse aufzunehmen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Blockgletscher im Mittel um 179 [cm] bei einer Standard Abweichung von 23,1 [cm] (Pix4D) bzw. 175 [cm] bei einer Standard Abweichung von 23,4 [cm] für Agisoft bewegt hat. Im steilen Bereich lag die Bewegung für die Auswertung in Pix4D bei 246 [cm] mit einer Standard Abweichung von 11,1 [cm]. Die Verifizierung der Ergebnisse mit einem vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen aufgenommenen Geländemodell aus LIDAR Befliegungen ist ebenfalls positiv. Es gibt zwar Unterschiede jedoch liegen diese für Pix4D in einem Bereich von 7,1 [cm] (Agisoft 6,3 [cm]) mit einer Standard Abweichung von 20,3 [cm] (Agisoft 23,6 [cm]) für die Befliegung 2017 bei einem Zeitunterschied der Aufnahmen von 8 Jahren. Der Unterschied der Befliegung 2016 für Pix4D liegt bei -19,4 [cm] (Agisoft 12,1 [cm]) mit einer Standard Abweichung von 27,2 [cm] (Agisoft 47,3 [cm]). Die Auswertung liegt beim Vergleich der festen Bereiche von 2016 gegenüber 2017 für Pix4D bei 3,2 [cm] (Agisoft 3,2 [cm]) Unterschied mit einer Standard Abweichung von 1,1 [cm] (Agisoft 1,4 [cm]). Dieser Wert ist ebenfalls sehr gering und zeigt, wie gut die beiden Epochen zueinander passen.

Interessant wäre eine erneute Befliegung mit einem besseren Kamerasystem, als Beispiel seinen hier Mittelformat Spiegelreflexkameras genannt. Grund hierfür sind die größeren Sensoren und die daraus resultierende bessere Auflösung der Bilder. Ein weiterer Aspekt für die Verwendung ist die Anzahl von 10 Bit für die Aufnahmen.

Der Vorteil der Konfiguration 2017 liegt in dem Gesamtpakete der DJI Drohne mit eingebauter Kamera. Bei einem Totalschaden des UAV ist ein geringerer Geldbetrag verloren als bei einem UAV und Kamera System wie im Jahr 2016.

7. Ausblick

Die positiven Aspekte, die sich durch die Befliegung des Blockgletschers oder den jeweils zu untersuchenden Gebieten mittels eines UAV bieten sind vielzählig: Eine positive Eigenschaft ist die zeitliche Unabhängigkeit von Institutionen wie beispielsweise des BEV. Da Bildflüge jederzeit, vorausgesetzt die Wetterbedingungen vor Ort lassen es zu, stattfinden können, ist eine jährliche Befliegung möglich. Durch das Einsetzen eines UAV, können spezielle Anforderungen des Anwenders berücksichtigt werden.

Nimmt man das Beispiel Landwirtschaft, können Befliegungen einer Fläche mit einem thermalen Sensor durchgeführt werden. Aus den Rückstrahlungscharakteristiken können Rückschlüsse auf die Eigenschaften jeder Pflanze gezogen werden.

Interessant ist ebenfalls die Entwicklung der UAV. Es werden immer mehr Pakete bestehend aus Drohne, Kamera sowie Software angeboten sowohl im Bereich von Freizeit und Film als auch im Sektor der Vermessung und Fernerkundung. Die Leistungen der Programme mit den inkludierten Möglichkeiten werden über die Zeit immer umfangreicher. Das Beobachten von Gebieten mittels UAV eröffnet einen neuen Sektor in der Geodäsie bzw. revolutioniert die Luftbildphotogrammetrie in gewisser Weise. Ein ähnliches Phänomen war in der Geodäsie zu beobachten, als vor einigen Jahren die terrestrische Aufnahme von Gebäuden und Objekten mittels eines Laserscaners aufkam. Das Befliegen wird sich, ähnlich wie das Scannen von Objekten mittels Laser, als Alternative in die täglichen Aufgaben eines Geodäten einfügen.

Problematisch bei dieser Entwicklung ist jedoch die Tatsache, dass bei einem Absturz des UAV physischer Schaden entstehen kann. Werden zum Beispiel besiedelte Gebiete befliegen, muss gewährleistet sein, dass es sich um eine Drohne mit redundanten Systemen handelt, um bei einem Ausfall einzelner Komponenten die Flugfähigkeit aufrecht zu erhalten oder gegebenenfalls sicher landen zu können.

7. Ausblick

Der zweite Unsicherheitsfaktor ist der Pilot bzw. der Bediener des UAV. Hier muss bei einem professionellen Einsatz sicher gestellt sein, dass die Person ausreichendes zertifiziertes Fachwissen mitbringt, um Mitmenschen und Umwelt nicht zu gefährden.

Ebenfalls sollte das Befliegen eines Gebietes und die Auswertung der Daten verpflichtender Bestandteil des Masterstudienganges werden. Dem Studierenden wird damit die Möglichkeit gegeben, sich durch fundiertes Fachwissen bezogen auf die Flugplanung bzw. den Flug als auch durch die Kenntnis der photogrammetrischen Hintergründe, von der von Mitbewerbern aus anderen Fachrichtungen absetzen zu können.

Anhang

Anhang A.

Anhang

A.1. Pix4D Bericht 2017 Flug 2

- !** **Important:** Click on the different icons for:
- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
 - i** Additional information about the sections

💡 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	17
Processed	2017-12-15 07:24:03
Camera Model Name(s)	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	3.7 cm / 1.45 in
Area Covered	0.1973 km ² / 19.7281 ha / 0.0762 sq. mi. / 48.7743 acres
Time for Initial Processing (without report)	09m:55s

Quality Check



? Images	median of 63137 keypoints per image	✓
? Dataset	90 out of 90 images calibrated (100%), all images enabled	✓
? Camera Optimization	2.16% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
? Matching	median of 34271.7 matches per calibrated image	✓
? Georeferencing	yes, 24 GCPs (24 3D), mean RMS error = 0.015 m	✓

? Preview

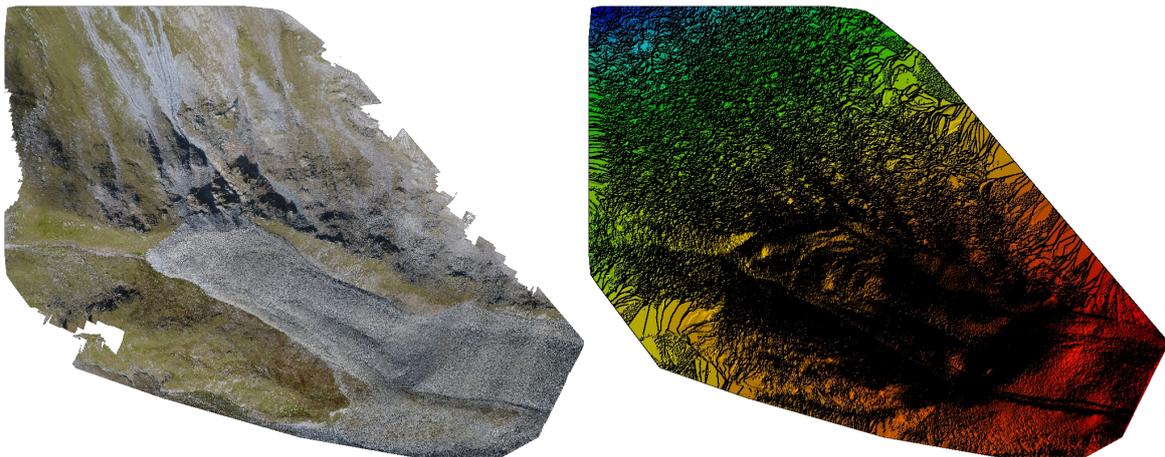


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details



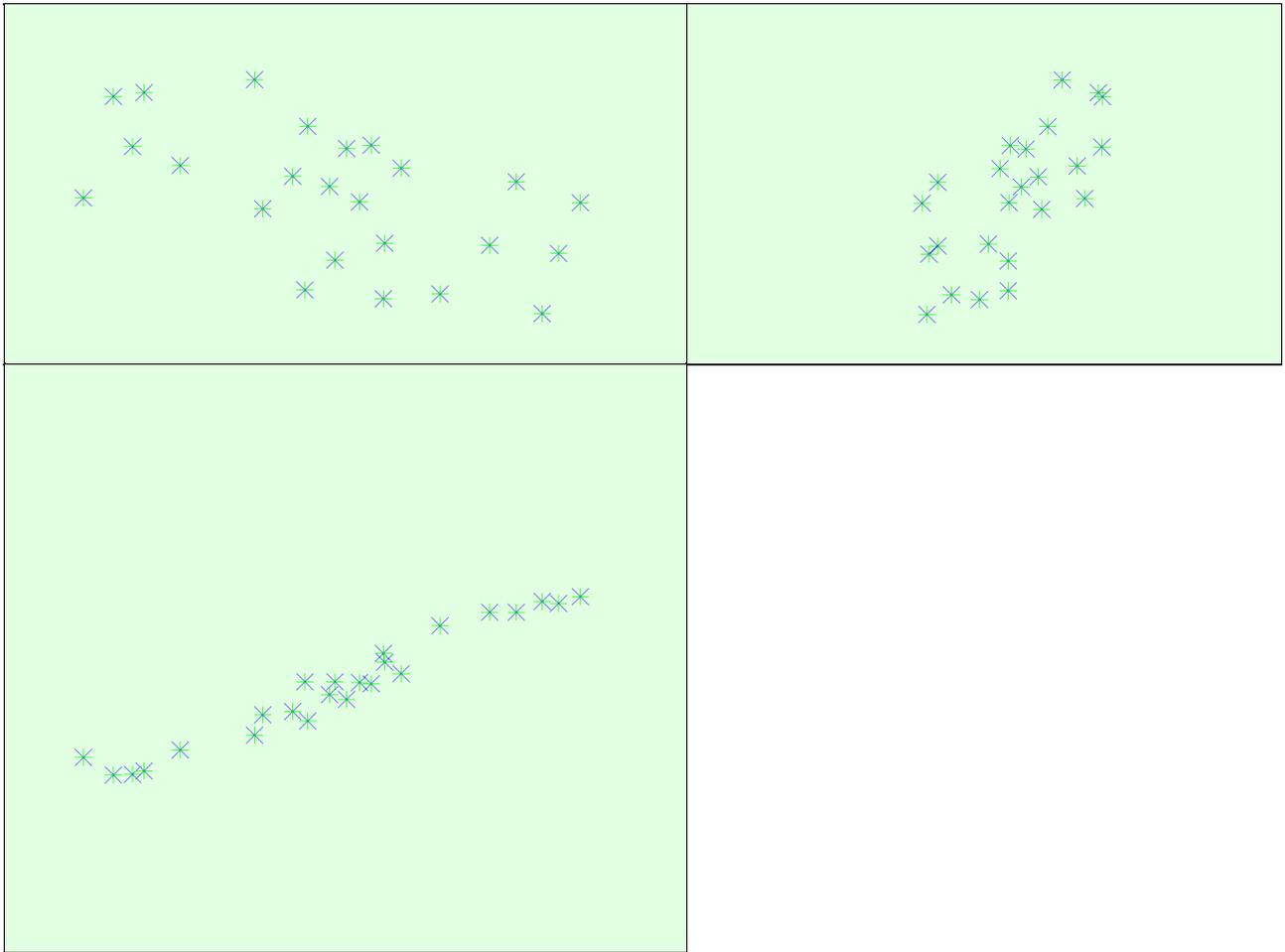
Number of Calibrated Images	90 out of 90
Number of Geolocated Images	0 out of 90

? Initial Image Positions



The preview is not generated for images without geolocation.

? Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



Uncertainty ellipses 500x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

? Absolute camera position and orientation uncertainties



	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.015	0.015	0.042	0.011	0.014	0.005
Sigma	0.004	0.003	0.013	0.003	0.003	0.002

? Overlap



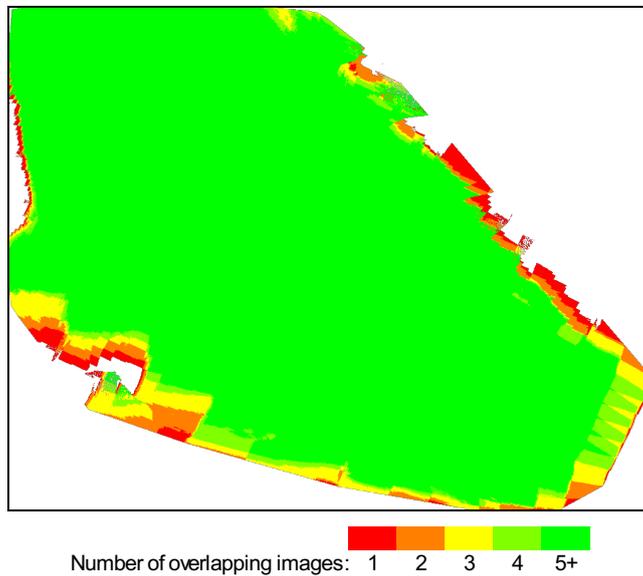


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

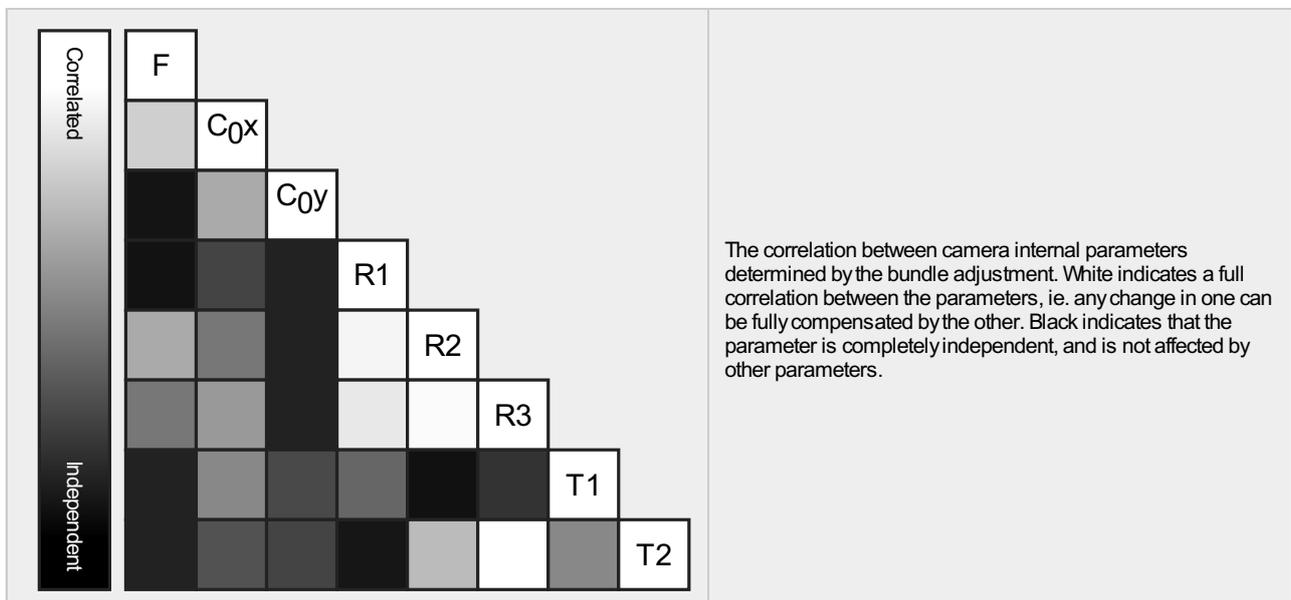
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	2943242
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	1135619
Mean Reprojection Error [pixels]	0.145

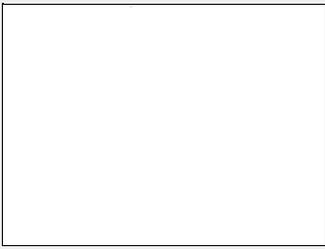
Internal Camera Parameters

FC330_3.6_4000x3000 (RGB). Sensor Dimensions: 6.317 [mm] x 4.738 [mm]

EXIF ID: FC330_3.6_4000x3000

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	2285.722 [pixel] 3.610 [mm]	2000.006 [pixel] 3.159 [mm]	1500.003 [pixel] 2.369 [mm]	-0.001	-0.002	0.000	-0.001	-0.001
Optimized Values	2335.289 [pixel] 3.688 [mm]	2004.698 [pixel] 3.166 [mm]	1510.608 [pixel] 2.386 [mm]	-0.001	-0.007	0.003	-0.000	-0.000
Uncertainties (Sigma)	1.207 [pixel] 0.002 [mm]	0.586 [pixel] 0.001 [mm]	0.267 [pixel] 0.000 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000





The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the camera model, is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel location. Click on the image to see the average direction and magnitude of the re-projection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization. The scale bar indicates the magnitude of 1 pixel error.

? 2D Keypoints Table



	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	63137	34272
Min	46779	5696
Max	69403	48936
Mean	61296	32703

? 3D Points from 2D Keypoint Matches



	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	776981
In 3 Images	210484
In 4 Images	77708
In 5 Images	33900
In 6 Images	15812
In 7 Images	7792
In 8 Images	4641
In 9 Images	2837
In 10 Images	1850
In 11 Images	1225
In 12 Images	820
In 13 Images	503
In 14 Images	361
In 15 Images	249
In 16 Images	126
In 17 Images	93
In 18 Images	78
In 19 Images	60
In 20 Images	34
In 21 Images	26
In 22 Images	13
In 23 Images	12
In 24 Images	9
In 25 Images	1
In 26 Images	2
In 27 Images	2

? 2D Keypoint Matches



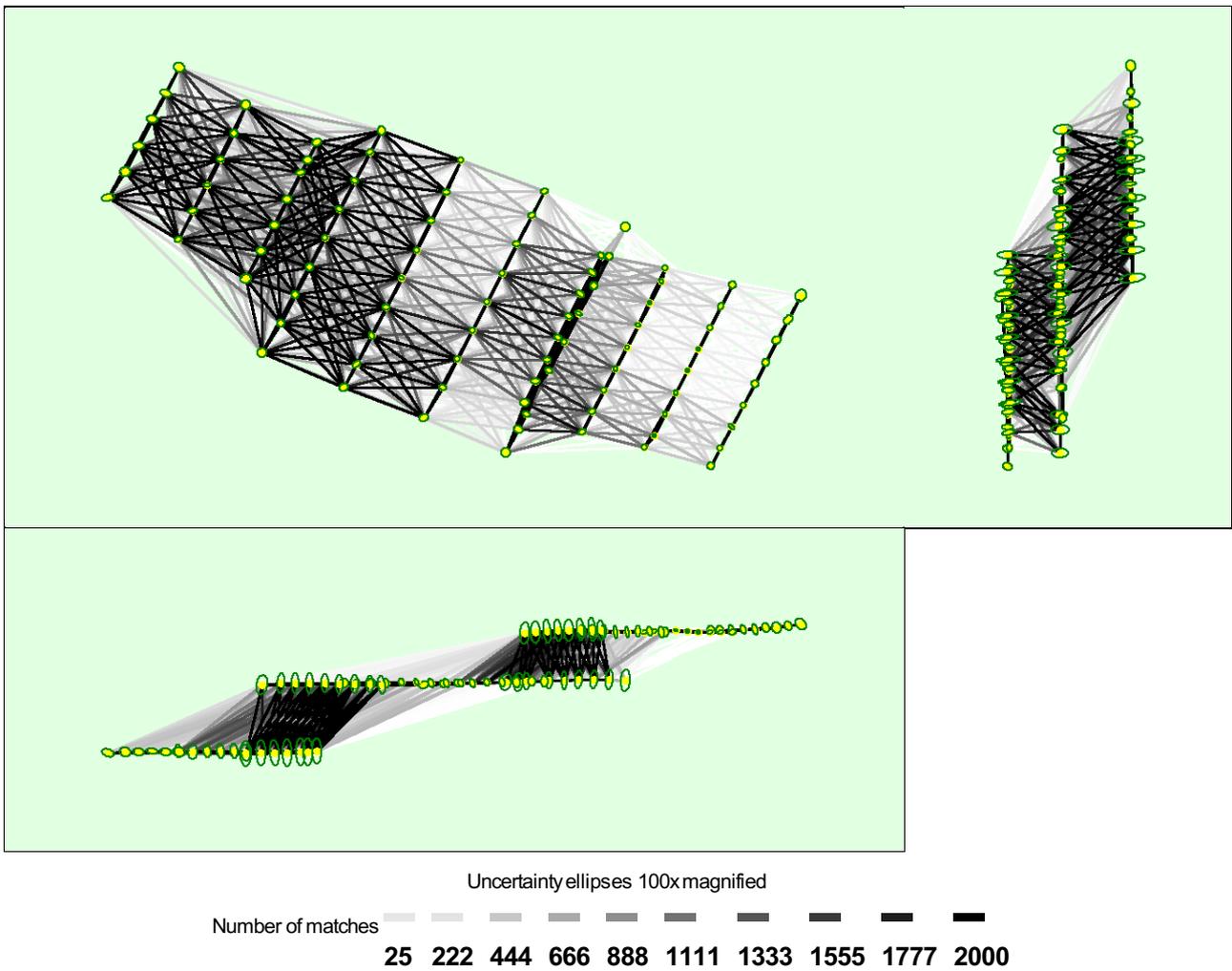


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.022	0.020	0.040	0.026	0.039	0.013
Sigma	0.005	0.005	0.019	0.004	0.004	0.003

Geolocation Details

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
216 (3D)	0.010/0.040	0.003	0.025	0.002	0.496	10 / 10
206 (3D)	0.010/0.020	0.015	-0.008	-0.021	0.380	17 / 17
207 (3D)	0.010/0.030	0.006	0.009	0.050	0.331	12 / 12
217 (3D)	0.020/0.030	-0.003	0.006	0.002	0.431	10 / 10
218 (3D)	0.030/0.010	-0.015	0.000	-0.006	0.276	17 / 17
219 (3D)	0.020/0.040	0.003	0.001	0.002	0.182	7 / 7
220 (3D)	0.020/0.050	0.013	0.003	-0.001	0.414	9 / 9
221 (3D)	0.010/0.020	0.004	-0.004	0.003	0.313	5 / 5
222 (3D)	0.010/0.020	-0.018	-0.000	0.001	0.499	10 / 10
210 (3D)	0.010/0.010	0.010	-0.003	-0.044	0.456	24 / 24

211 (3D)	0.050/0.010	0.008	0.012	0.023	0.465	22 / 22
212 (3D)	0.020/0.010	0.007	-0.006	0.015	0.428	26 / 26
213 (3D)	0.020/0.020	0.014	-0.006	-0.005	0.341	24 / 24
214 (3D)	0.040/0.070	-0.026	0.005	0.029	0.553	23 / 23
223 (3D)	0.010/0.040	-0.006	-0.000	0.017	0.406	28 / 28
224 (3D)	0.020/0.030	-0.018	0.006	0.020	0.436	22 / 22
225 (3D)	0.010/0.060	0.013	0.002	-0.004	0.368	19 / 19
226 (3D)	0.030/0.010	-0.006	-0.014	0.013	0.372	24 / 24
205 (3D)	0.020/0.020	-0.000	-0.006	-0.029	0.386	20 / 20
204 (3D)	0.010/0.010	0.000	-0.003	-0.004	0.354	19 / 19
215 (3D)	0.030/0.030	-0.027	0.050	-0.006	0.067	2 / 2
203 (3D)	0.030/0.010	0.006	0.012	-0.013	0.363	17 / 17
201 (3D)	0.030/0.030	-0.030	0.013	-0.031	0.294	12 / 12
202 (3D)	0.030/0.010	-0.023	-0.006	-0.017	0.363	20 / 20
Mean [m]		-0.002909	0.003711	-0.000259		
Sigma [m]		0.013941	0.012663	0.020131		
RMS Error [m]		0.014241	0.013196	0.020132		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-3630QM CPU @ 2.40GHz RAM: 8GB GPU: NVIDIA GeForce GT 650M (Driver: 22.21.13.8205), NVIDIA GeForce GT 650M (Driver: 22.21.13.8205)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

Coordinate Systems

Ground Control Point (GCP) Coordinate System	MGI (Ferro) / Austria GK Central Zone
Output Coordinate System	MGI (Ferro) / Austria GK Central Zone

Processing Options

Detected Template	 3D-Karte
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Lever-Arm Parameters Optimization: None Rematch: Auto, yes Bundle Adjustment: Classic

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
-------------	---

Point Density	High (Slow)
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: High Resolution Color Balancing: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	no
Time for Point Cloud Densification	02h:40m:
Time for 3D Textured Mesh Generation	1d:03h:30m:13s

Results



Number of Processed Clusters	6
Number of Generated Tiles	8
Number of 3D Densified Points	130113226
Average Density (per m ³)	606.17

DSM, Orthomosaic and Index Details



Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	10 [cm/pixel]
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	16m:39s
Time for Orthomosaic Generation	05m:46s

A.2. Pix4D Bericht 2016 Flug 2

Quality Report



Generated with Pix4Dmapper Pro version 3.2.23



Important: Click on the different icons for:



Help to analyze the results in the Quality Report



Additional information about the sections



Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	16_2
Processed	2017-12-20 07:34:40
Camera Model Name(s)	GXRA12_GRENSA1228mmF2.5_18.3_4288x2848 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	4.39 cm / 1.72 in
Area Covered	0.042 km ² / 4.2022 ha / 0.0162 sq. mi. / 10.3892 acres
Time for Initial Processing (without report)	46s

Quality Check



Images	median of 71224 keypoints per image	
Dataset	10 out of 10 images calibrated (100%), all images enabled	
Camera Optimization	8.3% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 31855.4 matches per calibrated image	
Georeferencing	yes, 13 GCPs (13 3D), mean RMS error = 0.032 m	

Preview

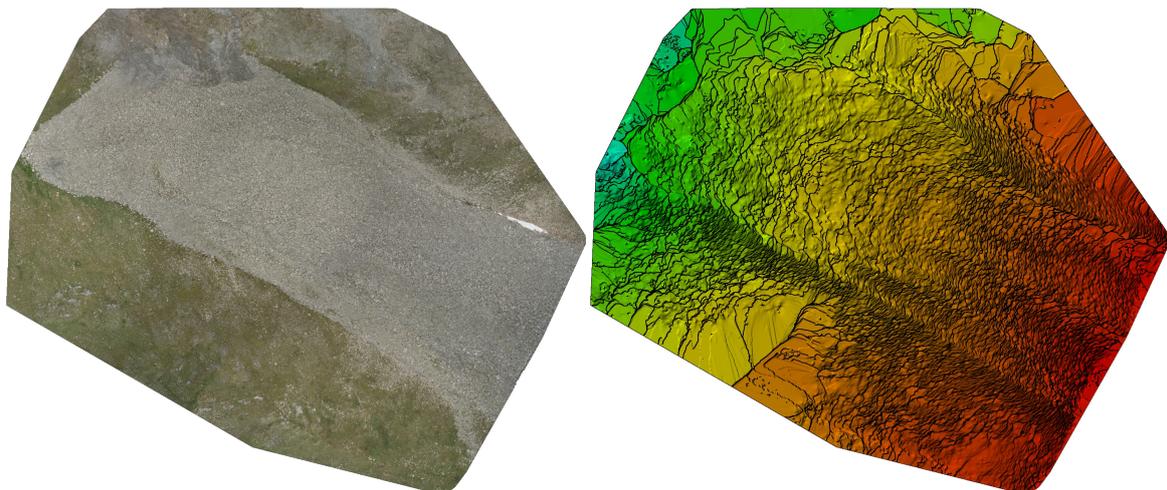


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

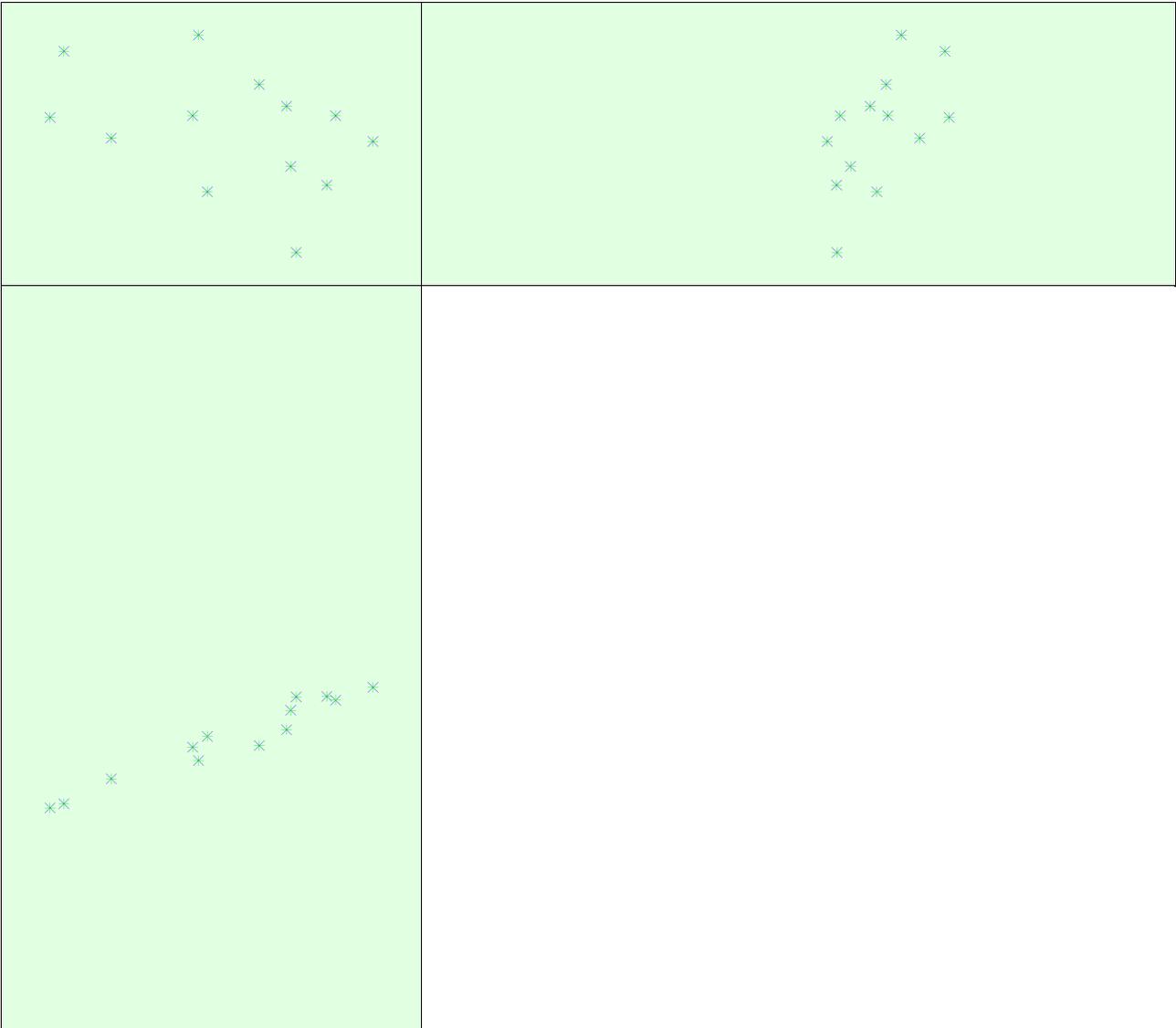


Number of Calibrated Images	10 out of 10
Number of Geolocated Images	0 out of 10

? Initial Image Positions i

The preview is not generated for images without geolocation.

? Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions i



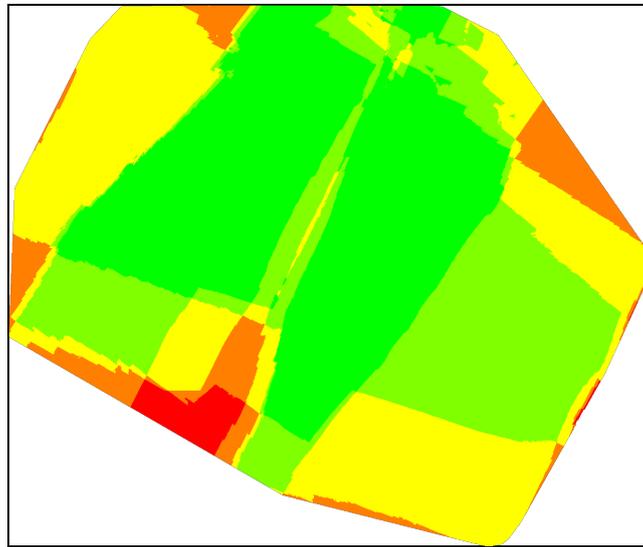
Uncertainty ellipses 100x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

? Absolute camera position and orientation uncertainties i

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.072	0.072	0.182	0.042	0.035	0.010
Sigma	0.008	0.008	0.008	0.003	0.002	0.001

? Overlap i



Number of overlapping images: 1 2 3 4 5+

Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details



Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	288344
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	126687
Mean Reprojection Error [pixels]	0.105

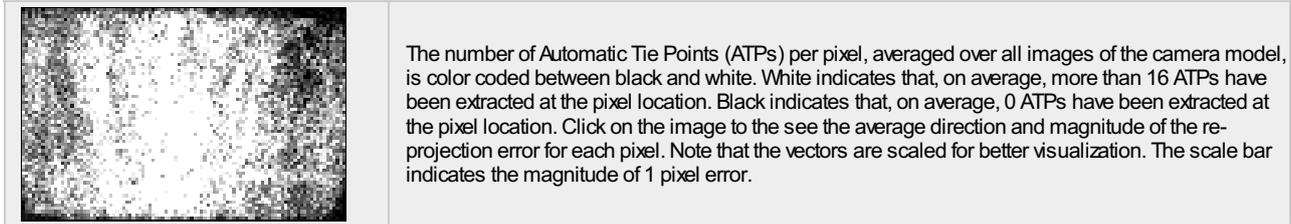
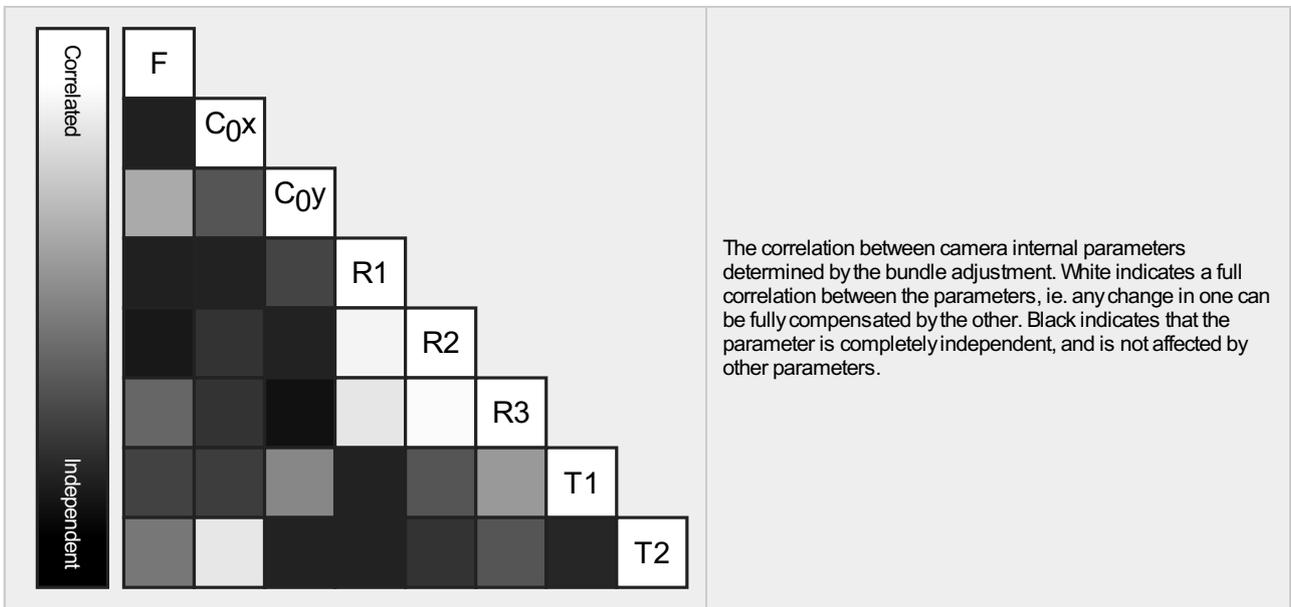
Internal Camera Parameters

GXRA12_GRENSA1228mmF2.5_18.3_4288x2848 (RGB). Sensor Dimensions: 25.400 [mm] x 16.870 [mm]



EXIF ID: GXRA12_GRENSA1228mmF2.5_18.3_4288x2848

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3089.386 [pixel] 18.300 [mm]	2144.000 [pixel] 12.700 [mm]	1424.000 [pixel] 8.435 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	3345.844 [pixel] 19.819 [mm]	2100.534 [pixel] 12.443 [mm]	1412.735 [pixel] 8.368 [mm]	-0.065	0.048	0.018	0.000	0.001
Uncertainties (Sigma)	4.410 [pixel] 0.026 [mm]	2.176 [pixel] 0.013 [mm]	1.363 [pixel] 0.008 [mm]	0.002	0.007	0.009	0.000	0.000



? 2D Keypoints Table



	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	71224	31855
Min	60086	13413
Max	77181	48511
Mean	70467	28834

? 3D Points from 2D Keypoint Matches



	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	98688
In 3 Images	22888
In 4 Images	3801
In 5 Images	874
In 6 Images	322
In 7 Images	114

? 2D Keypoint Matches



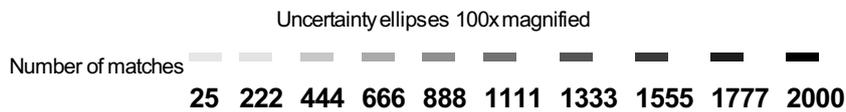
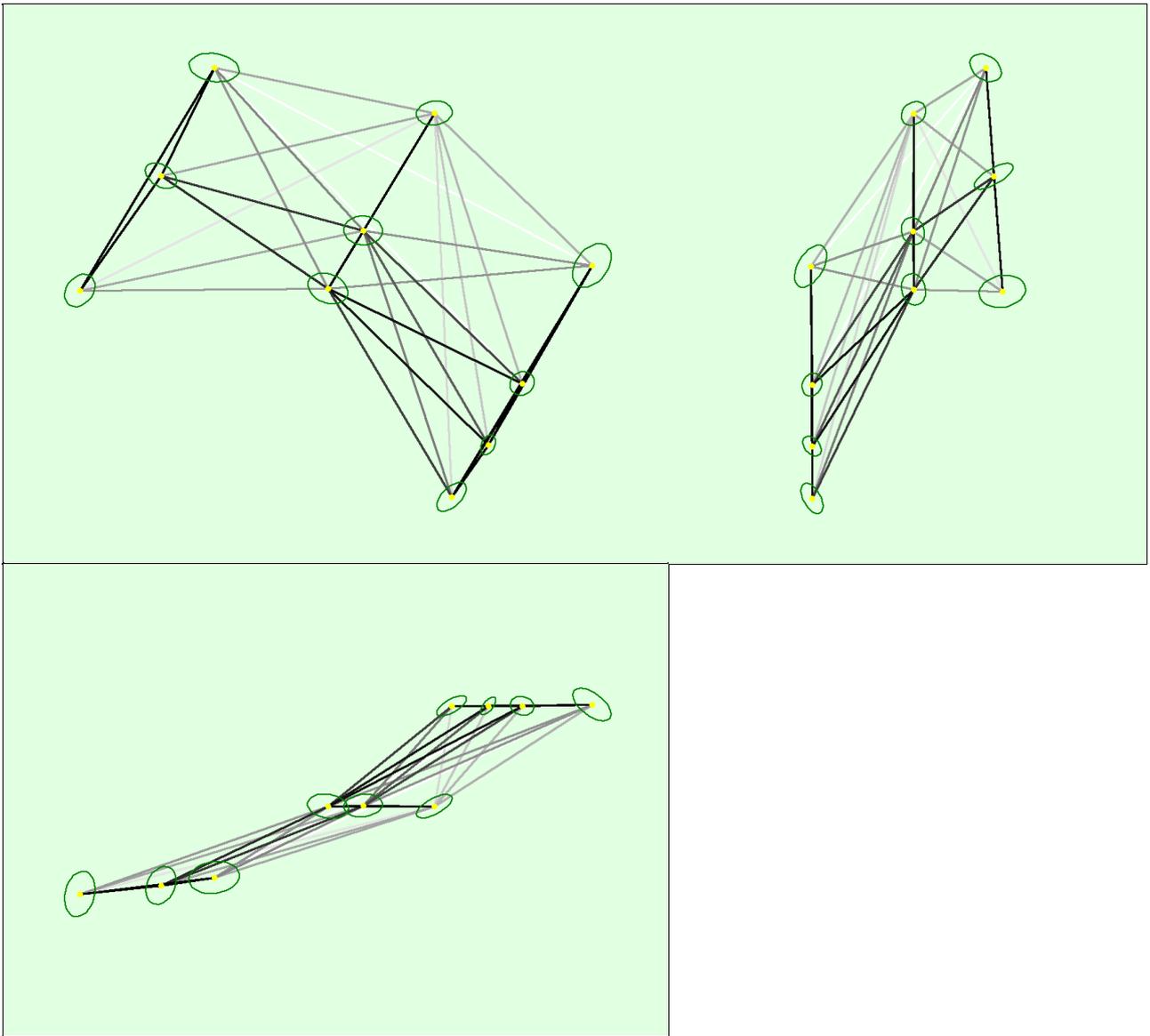


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

? Relative camera position and orientation uncertainties i

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.058	0.050	0.048	0.065	0.069	0.028
Sigma	0.015	0.010	0.015	0.012	0.015	0.003

Geolocation Details i

? Ground Control Points i

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
102 (3D)	0.010/0.020	-0.004	0.017	-0.015	0.215	3 / 3
103 (3D)	0.020/0.040	0.017	0.001	0.016	0.483	3 / 3

104 (3D)	0.005/0.001	-0.007	-0.013	0.010	0.730	6 / 6
105 (3D)	0.003/0.001	0.005	-0.021	-0.035	0.557	7 / 7
106 (3D)	0.002/0.002	0.017	-0.025	-0.110	0.131	3 / 3
108 (3D)	0.001/0.003	-0.005	-0.008	-0.012	0.205	4 / 4
109 (3D)	0.003/0.002	-0.009	0.016	0.073	0.133	4 / 4
110 (3D)	0.002/0.001	0.026	0.001	-0.032	0.214	3 / 3
111 (3D)	0.004/0.010	0.024	0.030	-0.126	0.194	3 / 3
112 (3D)	0.003/0.003	-0.020	0.009	0.048	0.382	7 / 7
113 (3D)	0.002/0.026	0.000	-0.013	-0.099	0.414	7 / 7
114 (3D)	0.001/0.001	0.003	0.014	0.008	0.421	2 / 2
115 (3D)	0.001/0.001	-0.058	-0.034	-0.080	0.124	2 / 2
Mean [m]		-0.000892	-0.002068	-0.027274		
Sigma [m]		0.021108	0.018165	0.059034		
RMS Error [m]		0.021127	0.018283	0.065030		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Initial Processing Details



System Information



Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-3630QM CPU @ 2.40GHz RAM: 8GB GPU: NVIDIA GeForce GT 650M(Driver: 22.21.13.8205), NVIDIA GeForce GT 650M(Driver: 22.21.13.8205)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

Coordinate Systems



Ground Control Point (GCP) Coordinate System	MGI (Ferro) / Austria GK Central Zone (2D)
Output Coordinate System	MGI (Ferro) / Austria GK Central Zone (2D)

Processing Options



Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Lever-Arm Parameters Optimization: None Rematch: Auto, yes Bundle Adjustment: Classic

Point Cloud Densification details



Processing Options



Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	High (Slow)
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes

3D Textured Mesh Settings:	Resolution: High Resolution Color Balancing: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	no
Time for Point Cloud Densification	15m:38s
Time for 3D Textured Mesh Generation	14m:35s

Results



Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	19135805
Average Density (per m ³)	336.54

DSM, Orthomosaic and Index Details



Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	10 [cm/pixel]
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	04m:27s
Time for Orthomosaic Generation	02m:05s

A.3. Pix4D Bericht 2016 Flug 1



Important: Click on the different icons for:



Help to analyze the results in the Quality Report



Additional information about the sections



Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	16_1
Processed	2018-01-08 14:44:13
Camera Model Name(s)	GXRA12_GRENSA1228mmF2.5_18.3_4288x2848 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	5.06 cm / 1.99 in
Area Covered	undefined
Time for Initial Processing (without report)	28s

Quality Check



Images	median of 75539 keypoints per image	
Dataset	5 out of 8 images calibrated (62%), all images enabled	
Camera Optimization	7.67% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 35420 matches per calibrated image	
Georeferencing	no, 3 GCPs (3 3D), mean RMS error = 0 m	

Preview

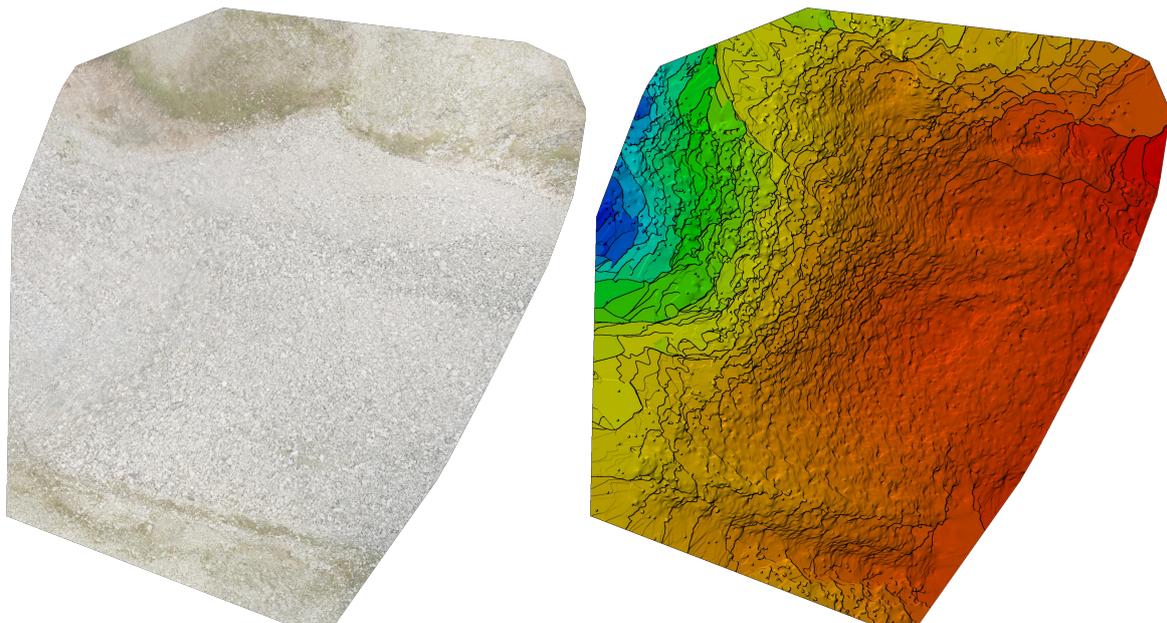


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details



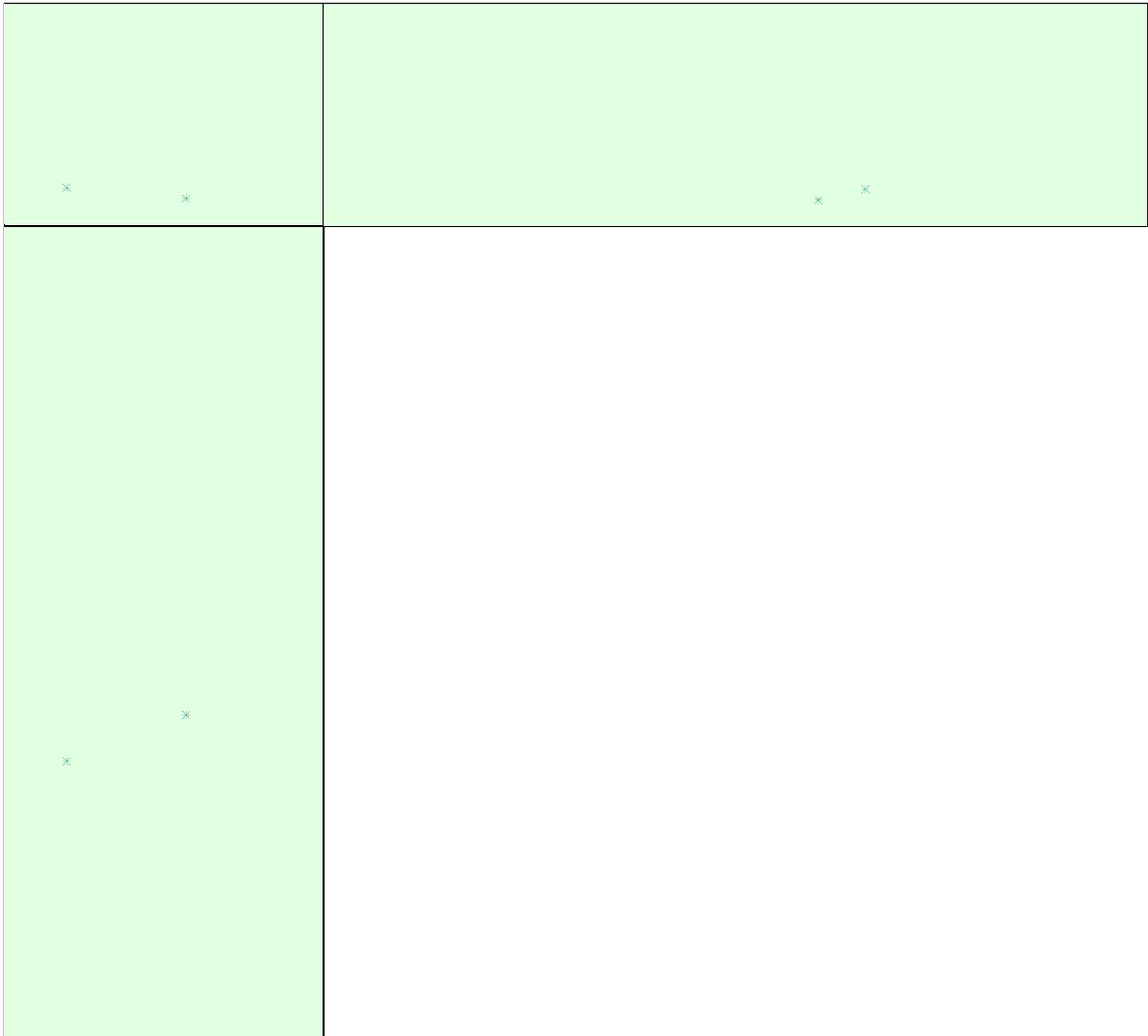
Number of Calibrated Images	5 out of 8
Number of Geolocated Images	0 out of 8

Initial Image Positions



The preview is not generated for images without geolocation.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



Uncertainty ellipses 10x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Red dots indicate disabled or uncalibrated images. Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Absolute camera position and orientation uncertainties



	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.903	0.391	1.208	0.327	0.242	0.128
Sigma	0.086	0.174	0.141	0.013	0.013	0.053

Overlap



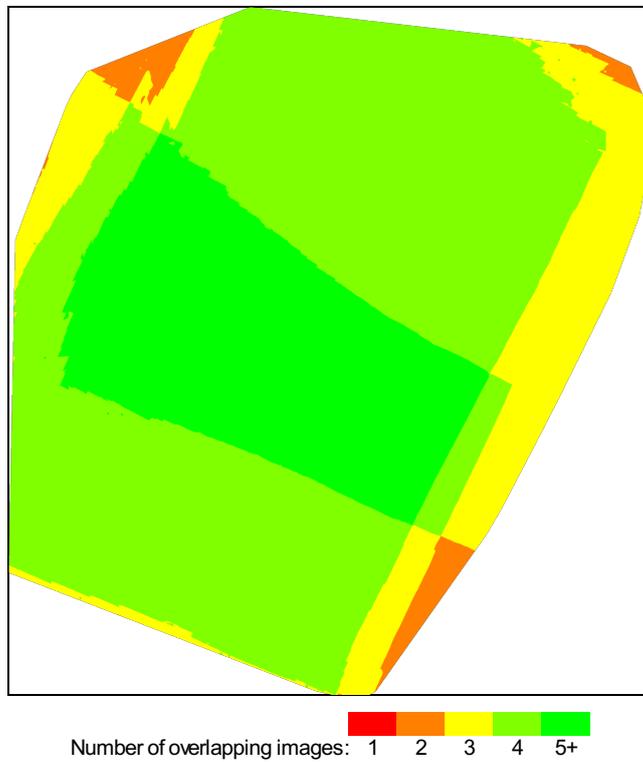


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details



Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	154224
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	70538
Mean Reprojection Error [pixels]	0.094

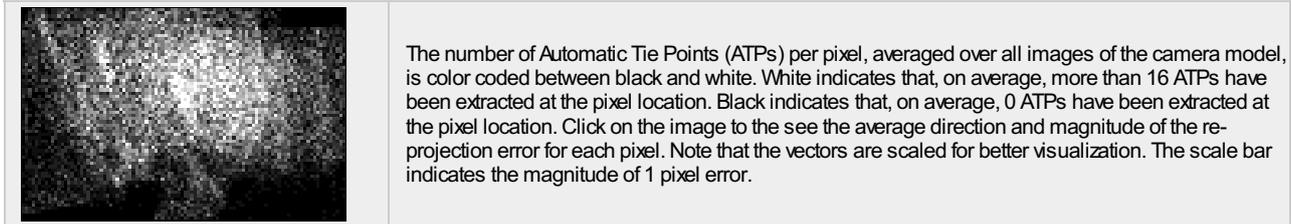
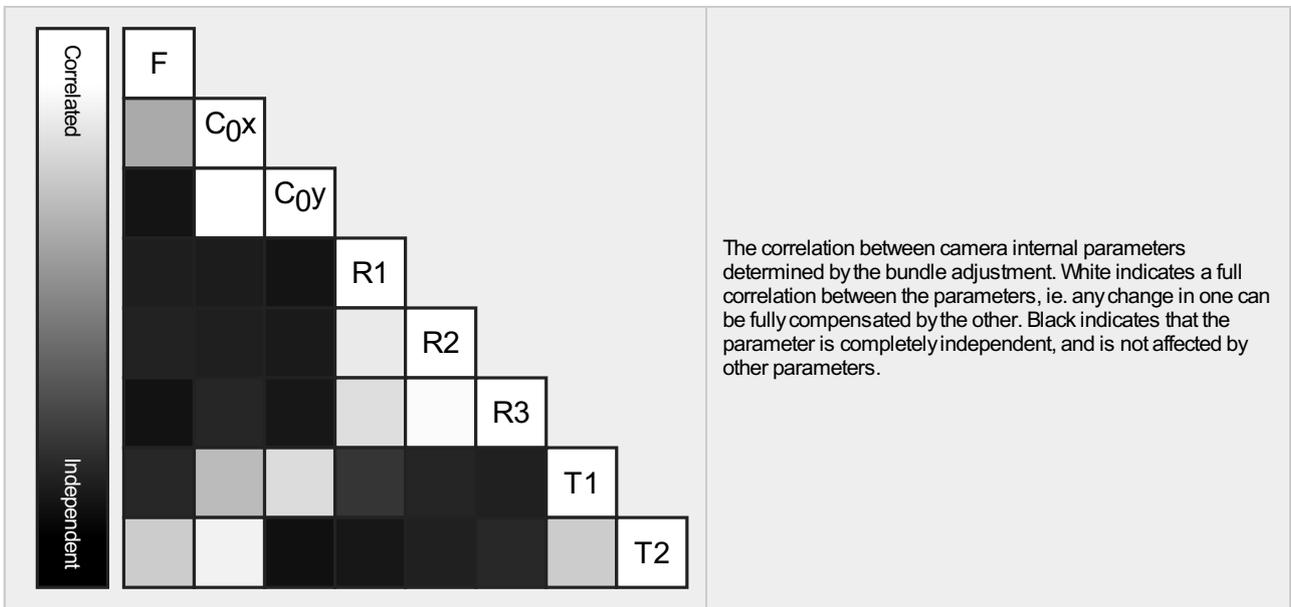
Internal Camera Parameters

GXRA12_GRENSA1228mmF2.5_18.3_4288x2848 (RGB). Sensor Dimensions: 25.400 [mm] x 16.870 [mm]



EXIF ID: GXRA12_GRENSA1228mmF2.5_18.3_4288x2848

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3089.386 [pixel] 18.300 [mm]	2144.000 [pixel] 12.700 [mm]	1424.000 [pixel] 8.435 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Optimized Values	3326.396 [pixel] 19.704 [mm]	2091.216 [pixel] 12.387 [mm]	1402.073 [pixel] 8.305 [mm]	-0.062	0.048	0.017	0.000	0.000
Uncertainties (Sigma)	8.405 [pixel] 0.050 [mm]	8.967 [pixel] 0.053 [mm]	8.845 [pixel] 0.052 [mm]	0.004	0.013	0.016	0.001	0.001



? 2D Keypoints Table



	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	75539	35420
Min	72479	21503
Max	80071	37874
Mean	75999	30845

? 3D Points from 2D Keypoint Matches



	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	60130
In 3 Images	8084
In 4 Images	1908
In 5 Images	416

? 2D Keypoint Matches





Uncertainty ellipses 100x magnified

Number of matches



Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.056	0.095	0.044	0.069	0.030	0.075
Sigma	0.023	0.037	0.011	0.015	0.006	0.007

Geolocation Details

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
107 (3D)	0.004/ 0.004	-0.000	0.000	0.000	0.502	2 / 2
108 (3D)	0.001/ 0.003	n/a	n/a	n/a	n/a	0 / 0
110 (3D)	0.002/ 0.001	n/a	n/a	n/a	n/a	1 / 1
20150905 (3D)	0.020/ 0.020	-0.000	0.000	0.000	0.191	4 / 4
Mean [m]		-0.000057	0.000015	0.000107		
Sigma [m]		0.000056	0.000013	0.000085		
RMS Error [m]		0.000080	0.000020	0.000137		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-3630QM CPU @ 2.40GHz RAM: 8GB GPU: NVIDIA GeForce GT 650M(Driver: 22.21.13.8205), NVIDIA GeForce GT 650M(Driver: 22.21.13.8205)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

Coordinate Systems

Ground Control Point (GCP) Coordinate System	MGI (Ferro) / Austria GK Central Zone (2D)
Output Coordinate System	MGI (Ferro) / Austria GK Central Zone (2D)

Processing Options

Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Lever-Arm Parameters Optimization: None Rematch: Auto, yes Bundle Adjustment: Classic

Point Cloud Densification details

Processing Options



Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	High (Slow)
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: High Resolution Color Balancing: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	no
Time for Point Cloud Densification	06m:54s
Time for 3D Textured Mesh Generation	07m:16s

Results



Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	8874793
Average Density (per m ³)	169.09

DSM, Orthomosaic and Index Details



Processing Options

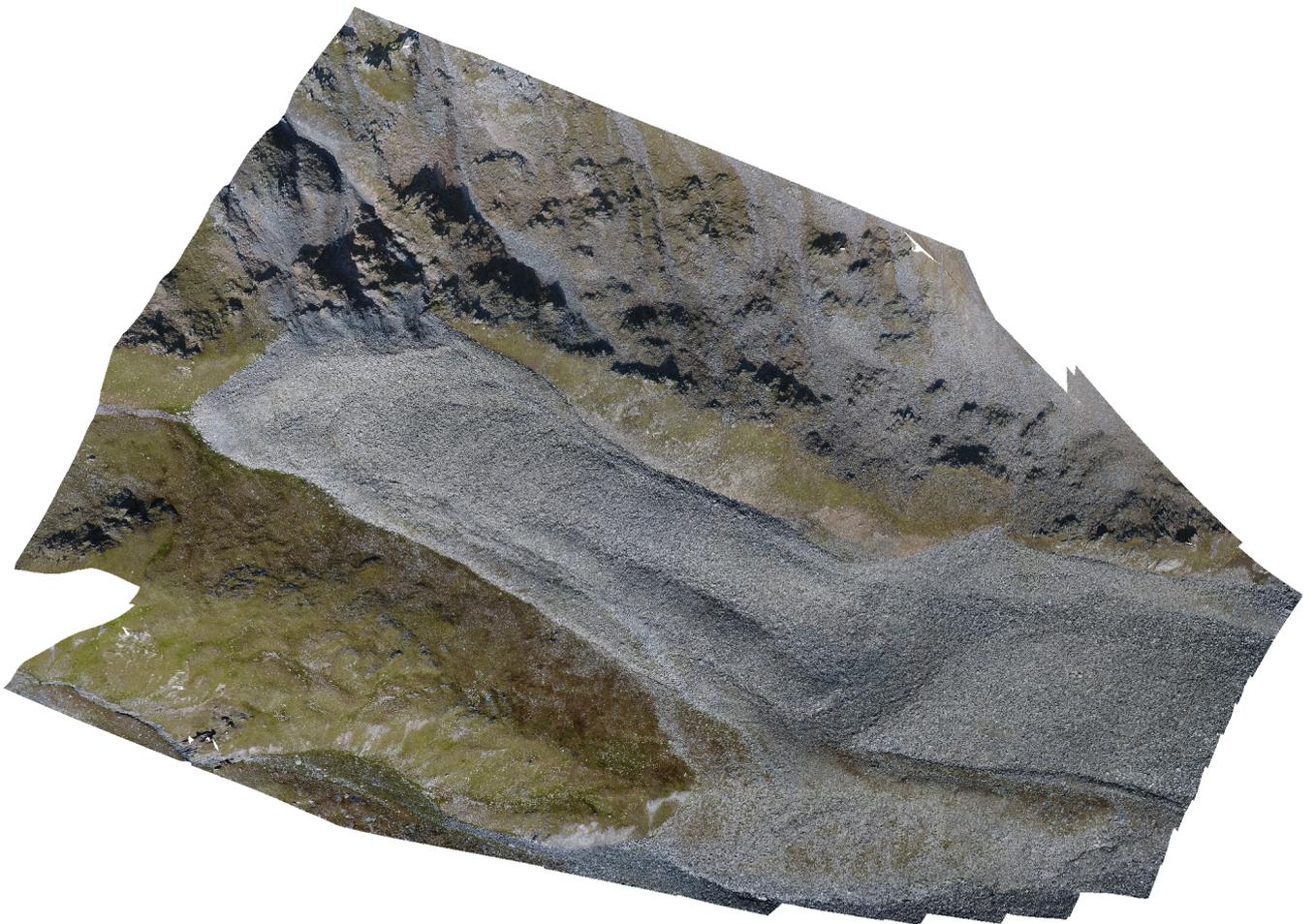


DSM and Orthomosaic Resolution	10 [cm/pixel]
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	03m:
Time for Orthomosaic Generation	01m:38s

A.4. Agisoft Bericht 2017

Agisoft PhotoScan

Processing Report
05 December 2017



Survey Data

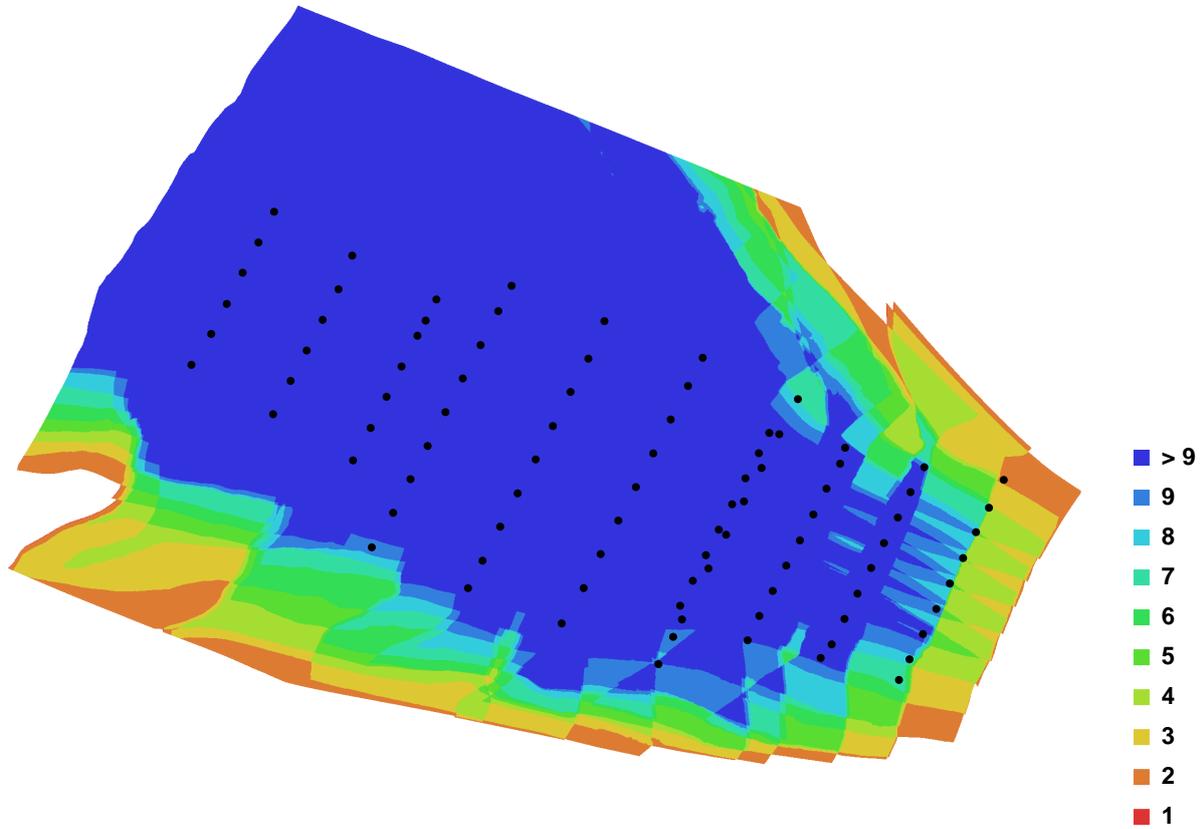


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	90	Camera stations:	90
Flying altitude:	93.819 m	Tie-points:	13445
Ground resolution:	0.0353416 m/pix	Projections:	88683
Coverage area:	0.133541 sq km	Error:	0.783216 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC330 (3.61 mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56192 x 1.56192 um	No

Table. 1. Cameras.

Camera Calibration

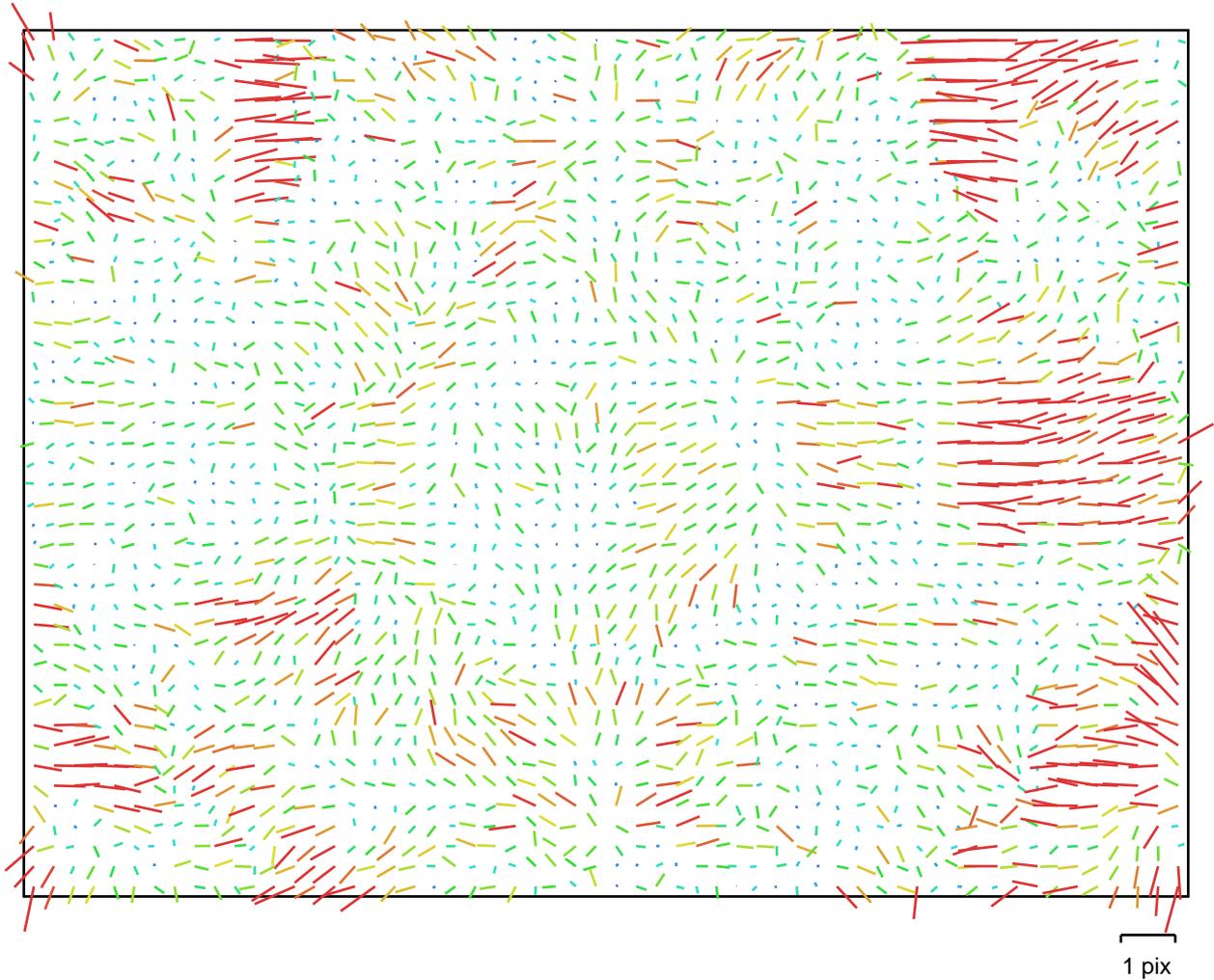


Fig. 2. Image residuals for FC330 (3.61 mm).

FC330 (3.61 mm)

Type:	Frame	K1:	0.00112912
Fx:	2341.97	K2:	-0.0124807
Fy:	2344.88	K3:	0.00606819
Cx:	1995.41	K4:	0
Cy:	1511.95	P1:	-0.000175995
Skew:	0.508525	P2:	-0.000584374

Ground Control Points

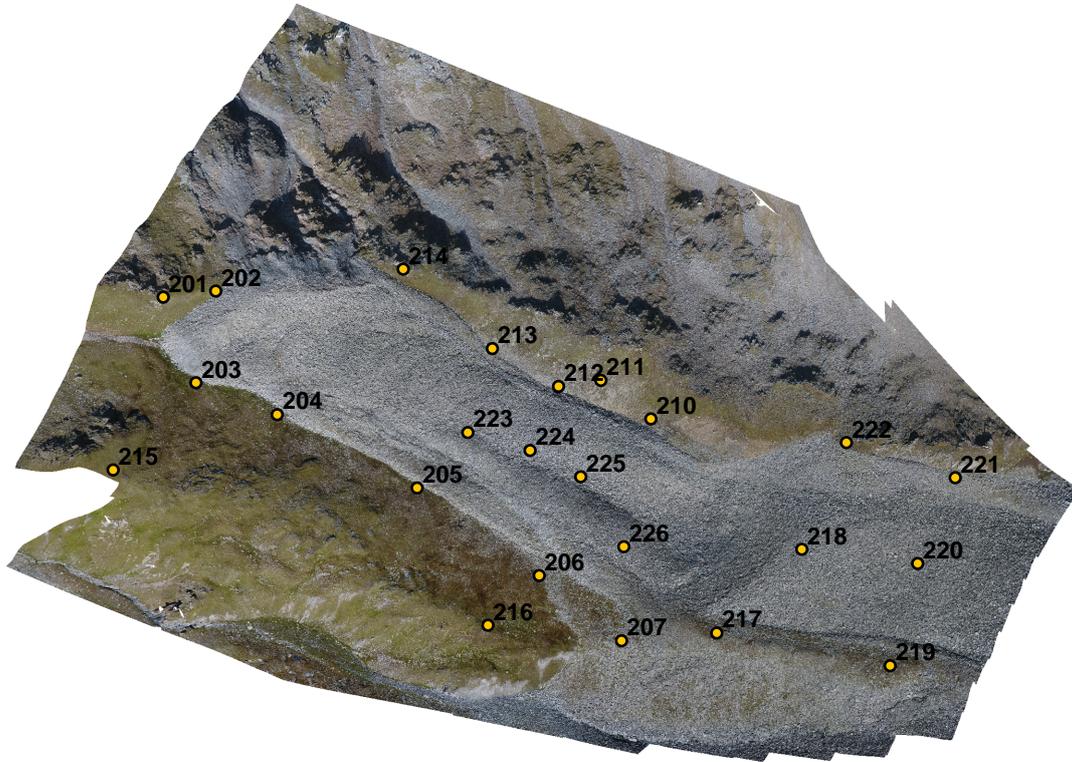


Fig. 3. GCP locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
201	-0.000661	0.002569	0.003161	0.004126	4	0.050178
202	-0.020815	0.004343	-0.017118	0.027297	8	0.178771
203	0.029343	0.003463	0.008299	0.030689	6	0.211066
204	0.005568	-0.004251	0.036576	0.037241	10	0.262170
205	-0.004560	0.007263	0.019767	0.021547	17	0.247060
206	-0.013435	0.004125	0.009175	0.016784	17	0.414196
207	0.003780	-0.005523	-0.036632	0.037238	12	0.279202
210	0.000006	-0.000522	0.045772	0.045775	24	0.478459
211	-0.008656	-0.007592	-0.008088	0.014071	19	0.387271
212	0.007653	0.001249	-0.004605	0.009019	24	0.370919

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
213	0.002908	0.003549	0.002932	0.005446	13	0.302421
214	-0.003544	-0.012374	-0.020234	0.023981	12	0.298358
215	0.000000	-0.000000	-0.000000	0.000000		
216	-0.009026	-0.012720	0.014274	0.021143	8	0.416225
217	-0.008716	-0.002624	-0.008663	0.012566	10	0.240508
218	0.003108	0.007951	0.015814	0.017971	17	0.149137
219	0.007815	0.001962	0.004599	0.009278	7	0.047846
220	-0.002070	-0.000457	-0.000205	0.002130	10	0.157024
221	-0.011865	-0.000652	-0.004978	0.012883	5	0.068808
222	0.019385	-0.007184	0.000829	0.020690	10	0.134185
223	0.002401	-0.002036	-0.019034	0.019293	23	0.340336
224	0.008484	0.002191	-0.008163	0.011975	25	0.509261
225	-0.007183	0.006732	-0.009346	0.013574	21	0.371824
226	0.008254	0.015674	-0.010581	0.020634	23	0.308877
Total	0.010493	0.006354	0.017476	0.021351	325	0.337716

Table. 2. Control points.

Digital Elevation Model

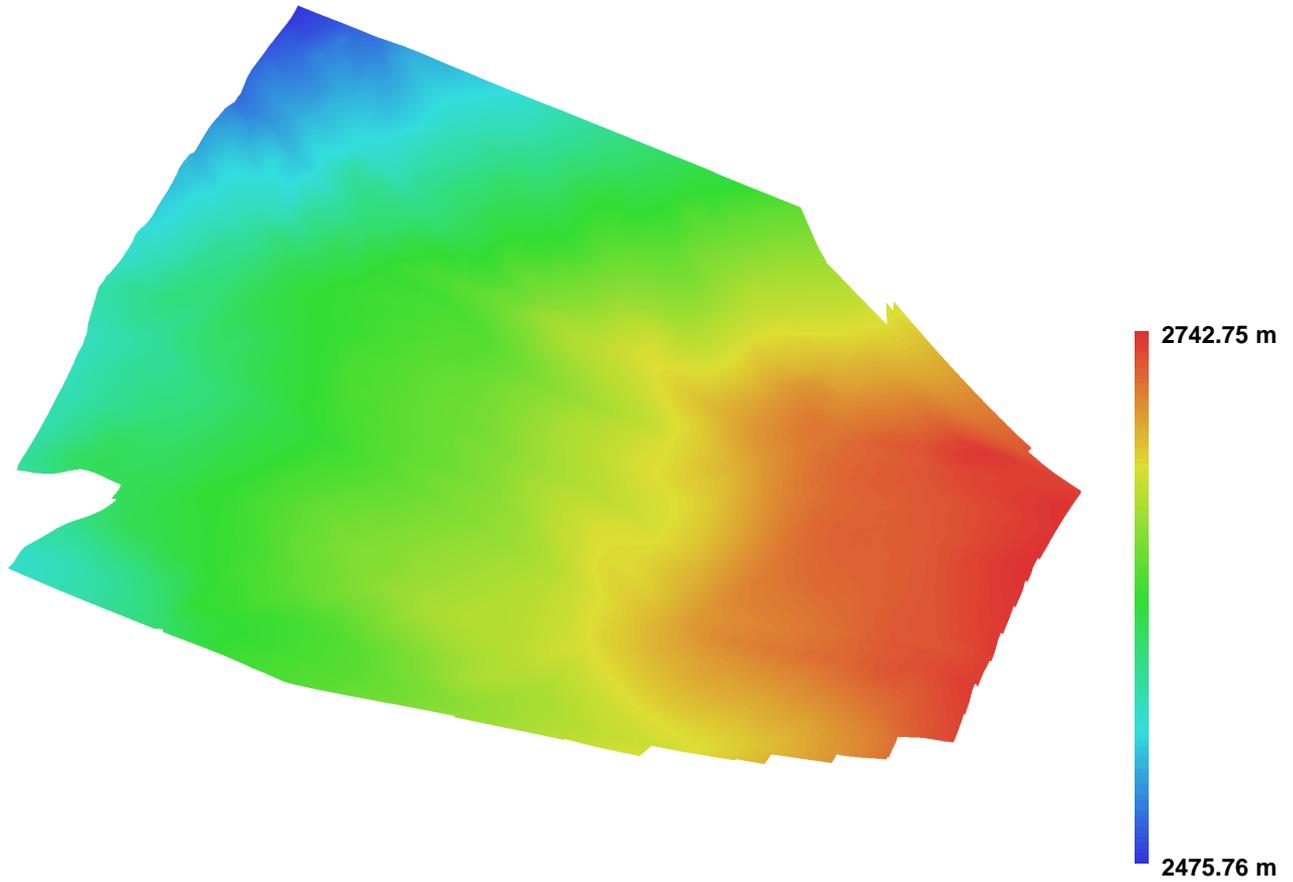


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.0706831 m/pix
Point density: 200.156 points per sq m

Anhang A. Anhang

A.5. Agisoft Bericht 2016 Flug 2

Agisoft PhotoScan

Processing Report
25 February 2018



Survey Data

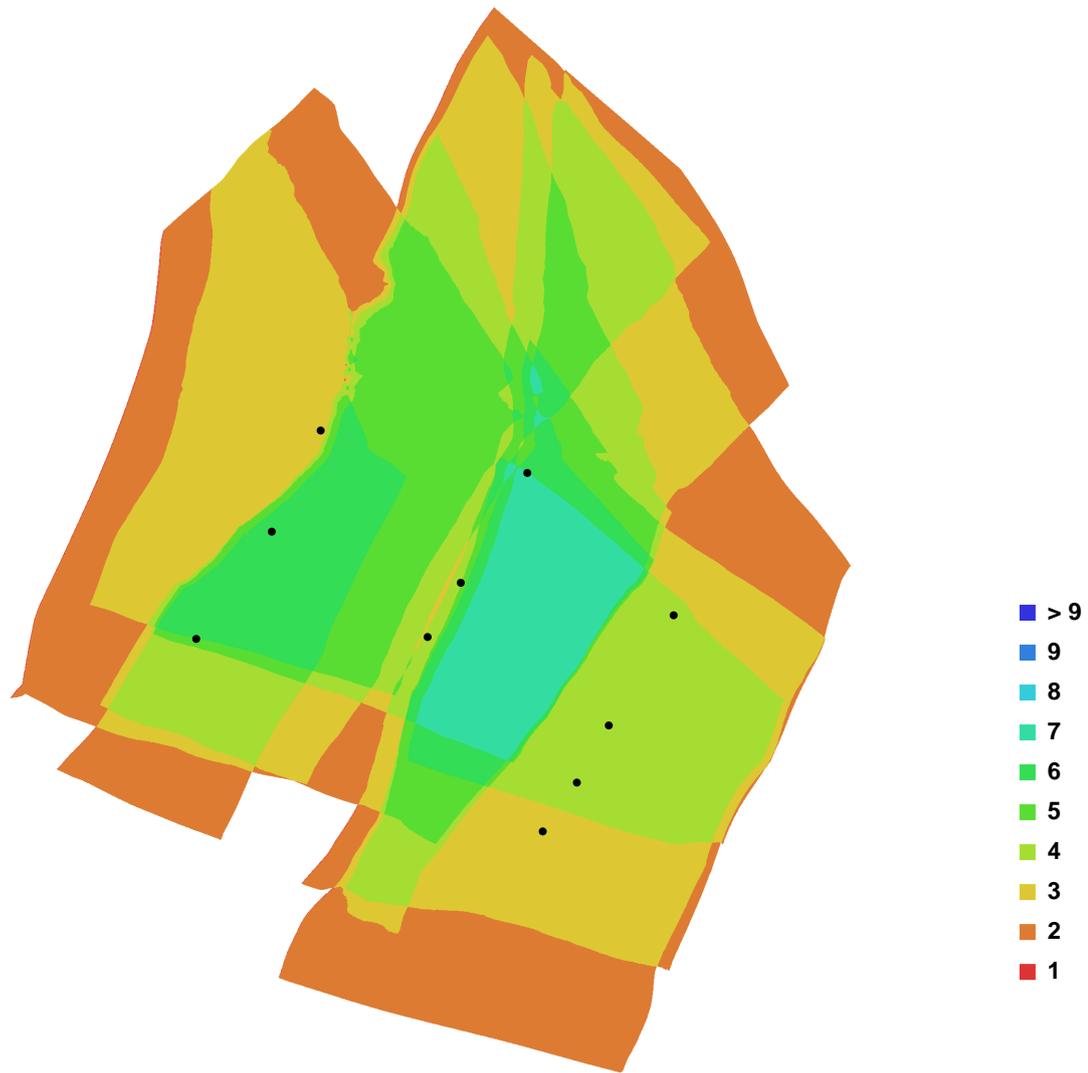


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	10	Camera stations:	10
Flying altitude:	155.88 m	Tie-points:	2559
Ground resolution:	0.0433013 m/pix	Projections:	8954
Coverage area:	0.0715615 sq km	Error:	0.647103 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
GXR A12	(18.3 mm) 4288 x 2848	18.3 mm	unknown	No

Table. 1. Cameras.

Camera Calibration

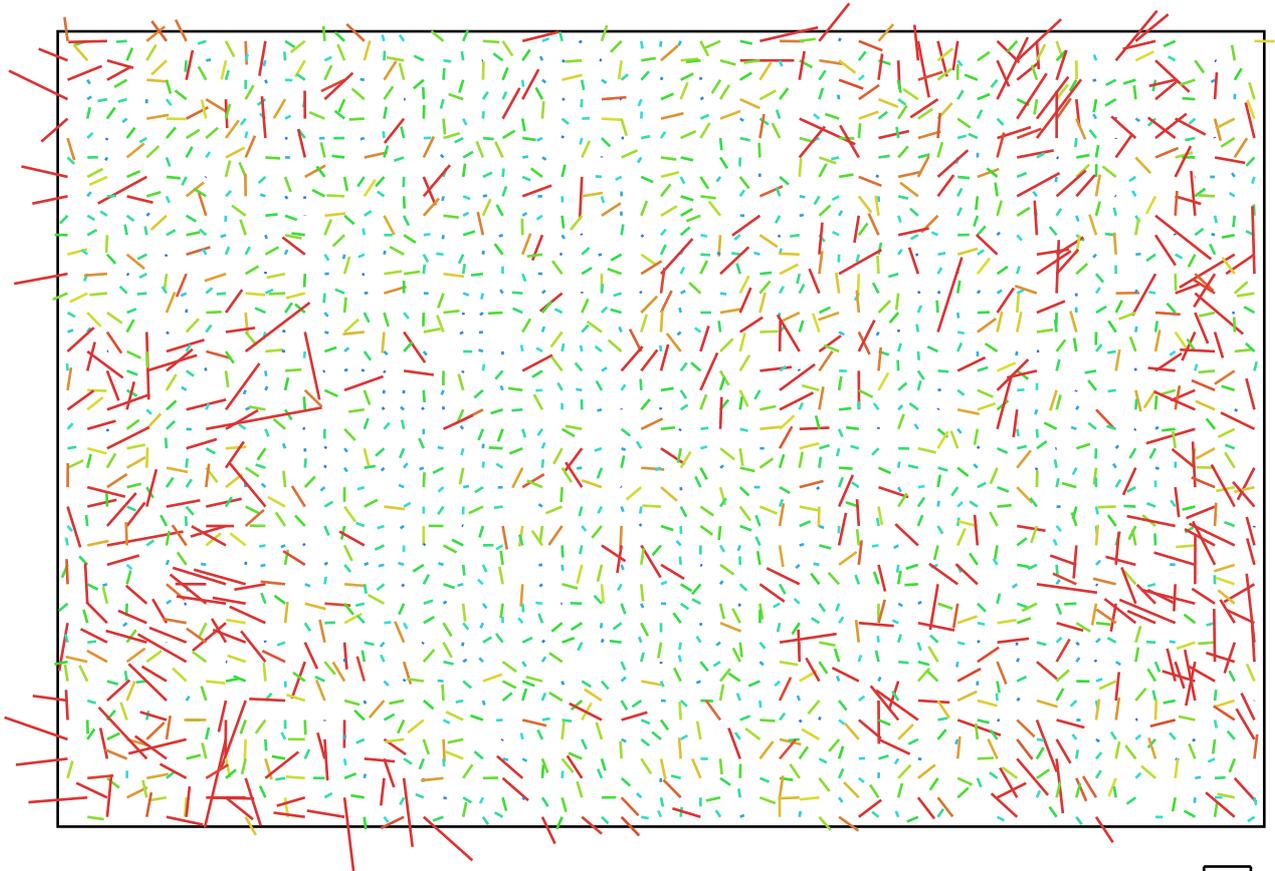


Fig. 2. Image residuals for GXR A12

1 pix
(18.3 mm).

GXR A12

(18.3 mm)

Type:	Frame	K1:	-0.0641038
Fx:	3358.27	K2:	0.0428822
Fy:	3360.26	K3:	0.0245472
Cx:	2100.61	K4:	0
Cy:	1416.4	P1:	0.000155823
Skew:	0.0276668	P2:	0.000718543

Ground Control Points

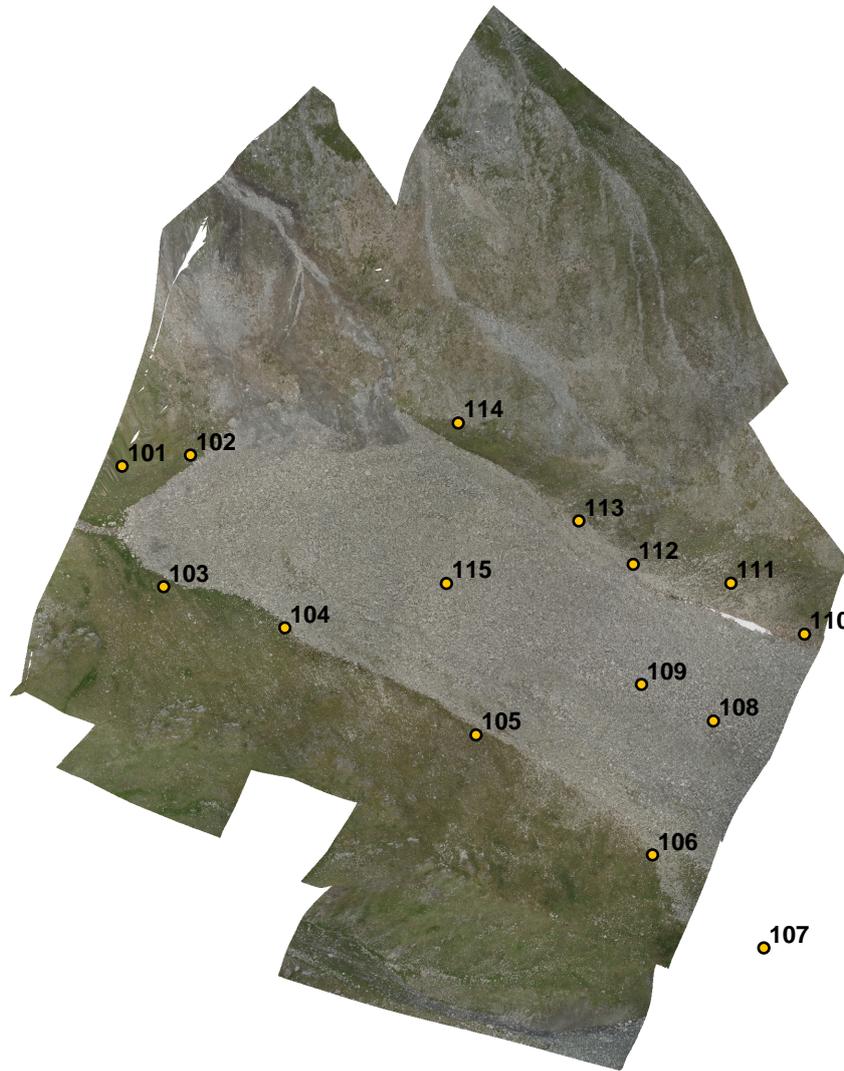


Fig. 3. GCP locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
101	0.008915	0.022800	0.037189	0.044523	1	0.000000
102	-0.003435	0.005305	-0.039362	0.039866	3	0.103983
103	0.007115	0.001157	0.045757	0.046321	3	0.219633
104	-0.004399	0.005346	-0.006212	0.009302	6	0.162491
105	-0.001427	-0.003444	-0.011529	0.012117	7	0.197376
106	-0.023578	0.020247	0.081724	0.087434	3	0.076950
107	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		
108	0.006482	0.013811	0.026858	0.030889	4	0.150107
109	0.023021	-0.022403	-0.049154	0.058719	4	0.242136
110	-0.010149	0.001342	-0.021631	0.023932	3	0.335949

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
111	0.001290	-0.005439	0.054667	0.054952	3	0.450598
112	-0.008462	-0.022097	-0.029033	0.037454	7	0.242651
113	-0.009992	0.010368	0.050581	0.052591	7	0.292867
114	-0.002252	-0.005074	-0.005768	0.008006	5	0.188150
115	0.006987	0.015605	0.008690	0.019180	3	0.084441
Total	0.010396	0.013137	0.038280	0.041785	59	0.229566

Table. 2. Control points.

Digital Elevation Model

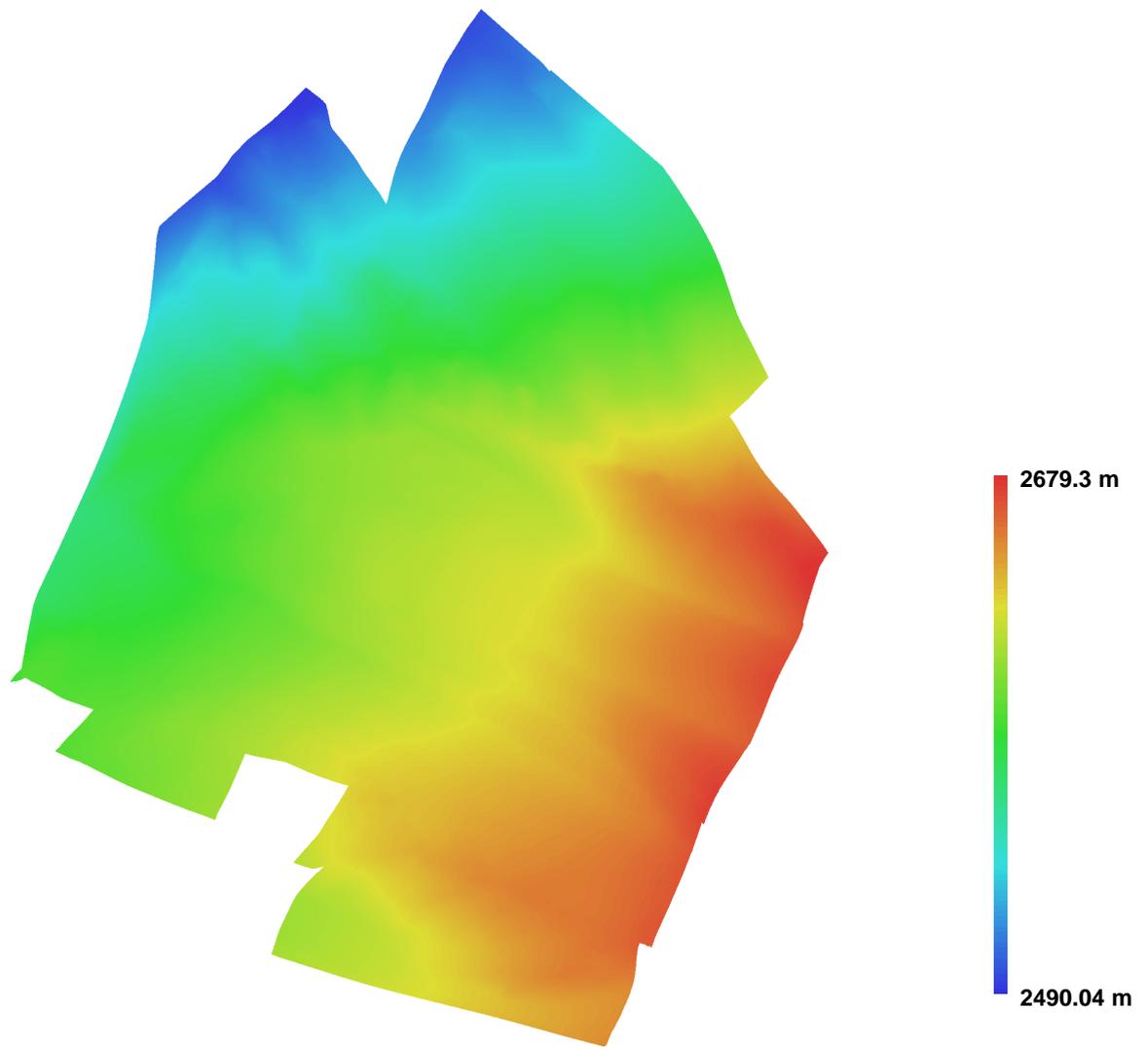


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.0866026 m/pix
Point density: 133.333 points per sq m

Literatur

- [Bar96] Dietrich Barsch. *Digitales Bild Bildgestaltung Bildbearbeitung Bildtechnik*. Springer Verlag Berlin, 1996 (siehe S. 10).
- [Bru] Ralf Bruder. *Digitale Bildverarbeitung Image/Picture processing*. URL: http://www2.in.tu-clausthal.de/~reuter/ausarbeitung/Ralf_Bruder_-_Digitale_Bildverarbeitung.pdf (siehe S. 31).
- [C Mo2] M. Eiblmaier C. Martin. *Lexikon der Geowissenschaften: Band 2*. Spektrum Akademischer Verlag, 2002. ISBN: 3827404215 (siehe S. 8).
- [con18] Wikipedia contributors. *Structure from motion* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. [Online; accessed 25-February-2018]. 2018. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Structure_from_motion&oldid=827295668 (siehe S. 12).
- [DVW17] Geoinformation und Landmanagement e. V. DVW – Gesellschaft für Geodäsie. »Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017)«. In: *Beiträge zum 156. DVW-Seminar am 9. und 10. Februar 2017 in Stuttgart (2017)* (siehe S. 3).
- [Eic] Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (BEV). *APOS - Austrian Positioning Service*. URL: http://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,1571617&_dad=portal&_schema=PORTAL (siehe S. 22).
- [Eic13] BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen. *Fernerkundung*. 2013. URL: http://www.bev.gv.at/pls/portal/docs/PAGE/BEV_PORTAL_CONTENT_ALLGEMEIN/0550_SUPPORT/0500_DOWNLOADS/PRODUKTFOLDER/Fernerkundung-Folder.pdf (siehe S. 1).

Literatur

- [Fis15] Lukas Fischer. „Structure from Motion“ in der Praxis 3D-Visualisierung mittels Digitalfotos. 2015. URL: http://www.landesarchaeologen.de/fileadmin/Dokumente/Dokumente_Kommissionen/Dokumente_Grabungstechniker/Netzpublikationen/Fischer_Structure_from_Motion_06-2015.pdf (siehe S. 14).
- [FUG+15] DAVIDE FUGAZZA u. a. »High-resolution mapping of glacier surface features. The UAV survey of the Forni Glacier (Stelvio National Park, Italy)«. In: *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 38.1 (2015), S. 25–33 (siehe S. 5).
- [Kau17] Seier Gernot Kaufmann Viktor Roth Kevin. »Tschadinhorn Blockgletscher, Schobergruppe, Hohe Tauern – ein Beitrag zur aktuellen Kinematik«. In: (2017). URL: https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann/Lienhart_Ingenieurvermessung_17_S_427-438_Web.pdf (siehe S. 1, 38).
- [LLC18] Agisoft LLC. *Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.4*. 2018. URL: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf (siehe S. 12).
- [Mes15] Messpunktplus. *Mit der Drohne auf dem höchsten Gletscher Tirols*. 2015. URL: <http://www.messpunktplus.de/projekte/projektetails/mit-der-drohne-auf-dem-hoechsten-gletscher-tirols.html> (siehe S. 3).
- [Mun15] Kliemannel Marcel Mundhenk Christina Rüdian Leo Sylvio. *Computer Vision Stereobildverarbeitung Structure-form-Motion*. 2015. URL: <https://www2.informatik.hu-berlin.de/cv/vorlesungen/WS1516/material/SfM.pdf> (siehe S. 12–14).
- [Nik15] Brigitta Erschbamer Nikolaus Schallhart. *Forschung am Blockgletscher - Methoden und Ergebnisse*. Alpine Forschungsstelle Obergurgl, 2015. ISBN: 9783902936585 (siehe S. 10–12).
- [Pro] Dipl.-Phys. Olaf Müller Prof. Dr. Oliver Vornberger. *Computergrafik SS 2000 Kapitel 9*. URL: <http://www-lehre.informatik.uni-osnabrueck.de/~cg/2000/Postscript/skript09-12.pdf> (siehe S. 31).

- [Tho] Ronny Thoms. *Ursache und Folgen der Ursache und Folgen der Bodenerosion*. URL: <http://www2.geographie.uni-halle.de/geooeko/Studium/PPPr%E4sentationen.pdf> (siehe S. 51).
- [Til14] Sulzer Wolfgang Tillia Marlene. *Der Einsatz von Fernerkundung (UAV) für die Wildbachbegehung in der Gemeinde Weng im Gesäuse*. 2014. URL: http://ovn.at/fileadmin/downloads/AHORN/AHORN2014/S2_2_Tillian_Sulzer.pdf (siehe S. 4).
- [Umw15] DAV-Ressort Natur- und Umweltschutz. *Klimawandel im Alpenraum, Auswirkungen und Herausforderungen*. 2015. URL: https://www.alpenverein.de/chameleon/public/46827c02-7c31-bc93-3f5b-8d75c331d481/Klimawandel-im-Alpenraum-Auswirkungen-und-Herausforderungen_26432.pdf (siehe S. 1).
- [Ver18] Spektrum Akademischer Verlag. *Permafrost*. 2018. URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/geographie/permafrost/5921> (siehe S. 8, 9).
- [Wes+12] MJ Westoby u. a. »Structure-from-Motion“ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications«. In: *Geomorphology* 179 (2012), S. 300–314 (siehe S. 12–14).
- [Wik17a] Wikipedia. *Kriging* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 15. Oktober 2017]. 2017. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kriging&oldid=162350088> (siehe S. 34).
- [Wik17b] Wikipedia. *Schobergruppe* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 30. Januar 2018]. 2017. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Schobergruppe&oldid=168887623> (siehe S. 7, 8).
- [Wik17c] Wikipedia. *Zentrale Ostalpen* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 30. Januar 2018]. 2017. URL: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Zentrale_Ostalpen&oldid=169362532 (siehe S. 8).
- [Wik18a] Wikipedia. *Globale Erwärmung* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 30. Januar 2018]. 2018. URL: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Globale_Erw%C3%A4rmung&oldid=173475018 (siehe S. 1).

Literatur

- [Wik18b] Wikipedia. *Tschadinhorn* — *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 30. Januar 2018]. 2018. URL: %5Curl%7Bhttps://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Tschadinhorn&oldid=172770906%7D (siehe S. 7, 8).