

Technischer Bericht

Bachelor-Thesis

Blockgletscher Macun – Dritte Folgemessung

FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz

Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik

Institut Vermessung und Geoinformation



vorgelegt von:

Dario Derungs

Tuva 269

7144 Vella

+41 79 790 89 27

darioderungs@hotmail.com

Markus Tischhauser

Via la Lutta 16

7130 Ilanz

+41 79 547 78 79

markus_tischhauser@hotmail.com

eingereicht bei:

Prof. Dr. Reinhard Gottwald

Dr. Ruedi Haller

Muttenz, 25. August 2017

Vorwort

Die vorliegende Bachelor-Thesis soll uns als Abhandlung zur Erlangung des akademischen Grades *Bachelor of Science* im Fachgebiet Geomatik an der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) in Muttenz dienen.

Im Rahmen dieser achtwöchigen Abschlussarbeit wurde die dritte Folgemessung des Blockgletschers Macun im Schweizerischen Nationalpark (SNP) durchgeführt. Das Projekt durfte komplett von der Planung über die Ausführung bis hin zur abschliessenden Beurteilung realisiert werden.

Mit Freude nahmen wir von der Zuteilung Kenntnis und waren von Beginn an motiviert, diese Bachelor-Thesis zu bearbeiten. Da wir uns beide gerne in den Bergen aufhalten und im Kanton Graubünden beheimatet sind, konnten wir uns sofort mit dem Projekt identifizieren. Es faszinierte uns, dass viele der im Studium behandelten Fachgebiete, wie Netzausgleichung, Satellitenmesstechnik, terrestrisches Laserscanning und Photogrammetrie in diesem Projekt kombiniert werden und wir das bisher angeeignete Wissen für die Verwirklichung des Projekts anwenden konnten. Zudem ermöglichte dieses Projekt uns wichtige Erfahrungen zu sammeln, welche uns in der Zukunft zu Gute kommen. Die Arbeit in den Bergen gefiel uns und trotz des garstigen, winterlichen Wetters hatten wir stets grossem Tatendrang. Die Messwoche in der Umgebung des Schweizerischen Nationalparks stellte das Highlight der Bachelor-Thesis dar. Die ganze Messkampagne im unwegsamen Gelände war auch für uns Berggänger anspruchsvoll. Die wunderschöne Umgebung, das Zusammentreffen mit Leuten aus ähnlichen Fachgebieten und das Leben in der Berghütte liessen jedoch alle Strapazen schnell vergessen.

Bei dieser Gelegenheit möchten wir uns bei allen Personen bedanken, welche uns in irgendeiner Art und Weise unterstützt und beraten haben, damit die Arbeit erfolgreich durchgeführt werden konnte.

Die Bachelor-Thesis Nr. 1 wurde durch Prof. Dr. Reinhard Gottwald als Examinator betreut. Für die Wiederaufnahme und Zuteilung dieser spannenden Abschlussarbeit möchten wir uns bedanken. Als Experte und Auftraggeber fungierte Dr. Ruedi Haller, der Leiter des Bereichs Forschung und Geoinformation vom Schweizerischen Nationalpark. Ihm gebührt an dieser Stelle ein spezieller Dank für die Ermöglichung dieses Projektes und die Unterstützung. Darüber hinaus möchten wir Nando Docci und Philipp Meyer für die Betreuung während der Testflüge mit der eBee, sowie Reto Stibler für das Bereitstellen des Materials danken.

Ein besonderes Dankeschön auch an Ephraim Friedli vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich für die Schulung und die Ausleihe des funktionsfähigen RIEGL-Scanners. Die gute Beratung, die Organisation eines Ersatzgerätes von RIEGL und die angenehme Zusammenarbeit waren für uns sehr hilfreich. Weiter ist dem Institut für Schnee- und Lawinenforschung in Davos für die zur Verfügung gestellten Meteo-daten zu danken.

Zusammenfassung

Blockgletscher verändern und bewegen sich, Ursachen dafür gibt es verschiedene. Einige davon legt diese Arbeit dar. Ein Blockgletscher, welcher auch Veränderungen aufweist, ist der Blockgletscher Macun. Er befindet sich im Schweizerischen Nationalpark auf der Seenplatte Macun zwischen Zernez und Lavin. Bereits seit 1965 gibt es Aufzeichnungen von Beobachtungsmessungen. Im Jahre 2010 wurden die Aufnahmetechniken modernisiert indem erstmals ein terrestrischer Laserscanner zum Einsatz kam. Die ersten beiden Folgemessungen fanden in den Jahren 2012 und 2015 statt. Die vorliegende Bachelor-Thesis behandelt die dritte Folgemessung.

Das Grundlagenetz wurde durch kurzstatische GNSS-Messungen neu bestimmt und ausgeglichen. Dabei konnte die mittlere Genauigkeit in der Lage auf 4.8 mm und in der Höhe auf 10.6 mm gesteigert werden. Aus den Messungen mittels terrestrischem long-range Laserscanning sowie aus den Drohnenaufnahmen sind dreidimensionale Oberflächenmodellen hervorgegangen. Werden die Resultate der Oberflächenmodellierung einander gegenübergestellt, wird deutlich, dass der Mehraufwand für die TLS-Aufnahmen sowie die Berechnung des TLS-Modells nicht gerechtfertigt ist. Die dichte und genaue Punktwolke des Laserscanning kann mit den vorhandenen Ressourcen nicht mit der vollen Auflösung in das 3D-Modell einfließen. Zudem enthält es viele Lücken, welche durch die Form des Blockgletschers unvermeidbar sind.

Anhand der resultierenden 3D-Modelle war es möglich, die dritte Folgemessung mit den Messungen aus dem Jahre 2015 zu vergleichen. Dazu wurden verschiedene Analysen wie beispielsweise ein 3D-Vergleich, ein Vergleich durch Profile und Begrenzungslinien sowie eine Kubaturberechnung durchgeführt. Daraus konnten Aussagen über das Verhalten des Blockgletschers Macun gemacht werden. Dieser hat sich in den letzten zwei Jahren in vielen Bereichen signifikant deformiert. Durch die GNSS-Messungen der Fest- und Kontrollpunkte wurde eine leichte Absenkung des ganzen Gebiets Macun festgestellt. Alle Lagekoordinaten der Fest- und Kontrollpunkte haben sich im Vergleich zu 2015 signifikant geändert. Die Verschiebungen auf dem Blockgletscher sind bis zu 1.2 m (Lage) und 0.3 m (Höhe) gross.

Es stellte sich heraus, dass eine Folgemessung nach zwei Jahren zu früh ist. Es sind nur punktuelle und eher kleinräumige Verschiebungen sichtbar. Dieser Blockgletscher stellt schliesslich keine Gefahr für Menschen dar. Auf der anderen Seite kann er bestens als Forschungsobjekt dienen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1	Fragestellung und Ziel der Arbeit	2
2.	Blockgletscher und Permafrost	3
2.1	Definition eines Blockgletschers.....	3
2.1.1	Aufbau und Entstehung eines Blockgletschers.....	3
2.1.2	Wurzel- und Fusszone.....	5
2.1.3	Blockgletscher Macun	5
2.1.4	Schweizerischer Nationalpark (SNP).....	6
2.2	Klima und Permafrost	6
2.2.1	Klimawandel	6
2.2.2	Permafrost.....	6
2.2.3	Permafrost im Blockgletscher.....	7
2.2.4	Auswirkungen von Klimaänderung und Permafrost.....	7
3.	Eingesetzte Messverfahren und Technologien.....	8
3.1	Satellitenmesstechnik – GNSS.....	8
3.2	Terrestrisches Laserscanning – TLS.....	8
3.3	Photogrammetrie – UAV	9
3.4	Grundlagedaten	10
3.5	Meteodaten vom Institut für Schnee- und Lawinenforschung	10
4.	Vorbereitungsarbeiten.....	11
4.1	Testmessungen Leica GS14	11
4.2	Testmessungen RIEGL VZ-4000.....	11
4.3	Testflug senseFly eBee.....	11
5.	Messkampagne Macun	12
5.1	Vorbereitungen für die Messkampagne.....	12
5.1.1	Rekognoszierung.....	12
5.1.2	Grundlagenetz 2017.....	12
5.1.3	Messkonzept und Messplanung.....	14
5.1.4	Provisorischer Messablaufplan.....	14
5.2	Messwoche Macun	15
5.2.1	Messablauf 2017	15
5.2.2	Aufnahmen GNSS.....	15
5.2.3	Aufnahmen Scanner	16
5.2.4	Aufnahmen Drohne	16
6.	Auswertung GNSS-Aufnahmen	18
6.1	Mathematisches Modell.....	19
6.2	Basislinienberechnung.....	19

6.3	Netzausgleichung GNSS.....	22
6.4	Resultate.....	27
6.5	Fazit.....	29
7.	Auswertung Scanner-Aufnahmen.....	30
7.1	Aufbereitung der Daten.....	31
7.2	Registrierung und Georeferenzierung.....	31
7.3	Berechnung des Oberflächenmodells.....	32
7.4	Fazit.....	33
8.	Auswertung Drohnen-Aufnahmen.....	35
8.1	Prozessierung der Daten.....	36
8.2	Modellierung in 3DReshaper.....	37
8.3	Fazit.....	39
9.	Vergleich mit zweiter Folgemessung.....	40
9.1	Verschiebungsvektoren der Fix- und Kontrollpunkte.....	40
9.2	3D-Oberflächenmodelle.....	41
9.2.1	TLS.....	41
9.2.2	UAV.....	41
9.2.3	3D-Vergleich TLS und UAV 2017.....	42
9.2.4	Fokus auf den Wurzel- und Fussbereich des Blockgletschers.....	42
9.3	Profile.....	42
9.3.1	Fussbereich.....	43
9.3.2	Wurzelbereich.....	45
9.3.3	Probleme.....	46
9.4	Begrenzungslinien des Fussbereiches.....	47
9.5	Kubaturberechnung und Massenbilanz.....	48
9.6	Fazit.....	48
10.	Auswertung Meteodaten.....	50
11.	Diskussion.....	52
12.	Empfehlungen.....	55
12.1	Empfehlungen für Folgemessungen.....	55
12.2	Empfehlungen für Deformationsmessungen von Blockgletschern.....	56
	Abbildungsverzeichnis.....	57
	Tabellenverzeichnis.....	58
	Literaturverzeichnis.....	59
	Anhang.....	61

Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional
AG	Aktiengesellschaft
arcsec	Bogensekunden
BTh	Bachelor-Thesis (hier: meist angegeben mit Nr. / Jahr)
CS16	Leica Viva GNSS Controller
CSV	Comma-separated values – Dateiformat (kommagetrennte Werte)
DSM	Digital Surface Model (Digitales Oberflächenmodell)
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
FHNW	Fachhochschule Nordwestschweiz
GB	Gigabyte (Vielfaches einer Masseinheit für Datenmengen)
GCP	Ground Control Points (Bodenpasspunkte)
GDOP	Geometric Dilution Of Precision (geometrische Verringerung der Genauigkeit bei GNSS)
GNSS	Global Navigation Satellite System (Globales Navigations satellitensystem)
GS14	Leica Viva GNSS Empfänger
GSD	Ground Sample Distance (Bodenpixelauflösung)
IVGI	Institut Vermessung und Geoinformation
LTOP	Netzausgleichungssoftware von Swisstopo
LUBIS	Luftbild-Informationssystem von Swisstopo
m ü. M.	Meter über Meer (Meereshöhe)
PDF	Portable Document Format (portables Dokumentenformat) von Adobe Systems
RGB	Kanäle Rot, Grün und Blau im additiven Farbraum
ppm	parts per million (Teile von einer Million)
RSTS	Rapid-Static (kurzstatische Messung mit GNSS)
RTK	Real Time Kinematic (Echtzeitkinematik mit GNSS)
SLF	Institut für Schnee- und Lawinenforschung
SNP	Schweizerischer Nationalpark
TLS	Terrestrisches Laserscanning
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (Unbemanntes Luftfahrzeug oder Drohne)
VRS	Virtuelle Referenz Station (GNSS)
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

1. Einleitung

Der Blockgletscher Macun im Schweizerischen Nationalpark (SNP) wird bereits seit 1965 von der Universität Karlsruhe durch ein Messnetz für Bewegungsmessungen überwacht. Dadurch lassen sich jährliche Verschiebungen von 7 bis 25 cm detektieren. Diese Messdaten werden jedoch nur diskret, also punktuell mit Tachymeter oder GPS, erhoben. Um die komplexen Bewegungen an Blockgletschern flächendeckend erfassen zu können, müssen andere Messtechniken eingesetzt werden. Aus diesem Grund wird seit 2010 alle zwei bis drei Jahre eine Folgemessung mit terrestrischem Laserscanning (TLS) und seit 2015 auch mit Unmanned Aerial Vehicle (UAV) im Rahmen von Bachelor-Thesen am IVGI getätigt.

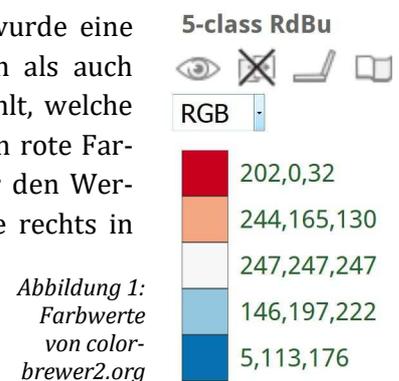
Bei der Nullmessung im Jahre 2010 wurde der Blockgletscher erstmals komplett mit TLS erfasst. Die erste Folgemessung wurde im Jahre 2012 durchgeführt, die zweite im Jahre 2015, wobei zusätzlich der ganze Blockgletscher mittels UAV erfasst wurde. Dabei konnte im Vergleich mit älteren Luftaufnahmen (LUBIS bis 1939) festgestellt werden, dass der Gletscher im Bereich der Wurzelzone grössere Einbrüche zu verzeichnen hat.

Aufbau des Berichtes

Die Arbeit gliedert sich gesamthaft in zwölf Kapitel. Im Kapitel 2 wird der Begriff Blockgletscher definiert, dessen Aufbau kurz erläutert und auf das Messgebiet Macun im SNP eingegangen. Mit dem Aufgreifen der Thematik des Klimawandels und Permafrosts ebenfalls im Kapitel 2, soll die Frage, weshalb der Blockgletscher überhaupt vermessen oder überwacht wird, geklärt werden. Anschliessend werden im Kapitel 3 die eingesetzten Messverfahren und Technologien aufgezeigt und deren Spezifikationen aufgeführt. Kapitel 4 beschreibt die Vorbereitungsarbeiten, die getätigten Testmessungen und Testflüge. Im Anschluss an das Kapitel 5, welches die Messkampagne Macun mit der Rekognoszierung, dem Grundlagennetz, dem Messkonzept und den Aufnahmen der Messwoche darlegt, folgt die gesamte Datenauswertung der GNSS-, TLS- und UAV-Aufnahmen in den Kapiteln 6 bis 8. Die verschiedenen Analysen folgen in Kapitel 10. Das letzte Kapitel der Auswertung ist jenes der Meteodaten. Die erzielten Resultate 2017 werden in Kapitel 11 diskutiert und gewertet. Im abschliessenden Kapitel 12 werden Empfehlungen für die Vermessung von Blockgletschern gegeben und ein Ausblick auf Folgemessungen gemacht.

Darstellungstechnische Hinweise

Für den Vergleich der Oberflächenmodelle sowie der Profile wurde eine spezielle Farbwahl getroffen. Diese ist sowohl druckfreundlich als auch sehbehindertengerecht. Es wurden fünf Farbwertklassen gewählt, welche divergieren und einen fließenden Übergang haben. Dabei stehen rote Farben für positive Werte, während blaue Werte negativ sind. Für den Wertebereich um null wurde eine weissliche Farbe verwendet. Die rechts in Abbildung 1 dargestellten RGB-Farbwerte wurden von Color-



1.1 Fragestellung und Ziel der Arbeit

Im Zentrum der vorliegenden Arbeit stand die Durchführung der dritten Folgemessung des Blockgletschers Macun. Dabei war ein Szenario zu wählen und umzusetzen, bei welchem der Gletscherkörper mit terrestrischem long-range Laserscanning und photogrammetrischer Erfassung durch UAV vermessen werden konnte. Das Setup der zweiten Folgemessung sollte wiederholt und die Resultate der dritten Folgemessung mit der zweiten verglichen werden. Ein besonderes Augenmerk galt der Analyse des Wurzel- und Fussbereichs des Blockgletschers. Die Arbeit sollte zeigen, wie sich der Blockgletscher in diesen Bereichen sowie gesamthaft während der letzten zwei Jahre verändert hat.

Des Weiteren sollten Meteodaten beigezogen werden, um einen allfälligen Einfluss auf die Veränderungen am Blockgletscher während der letzten Jahrzehnte zu prüfen. Das Wetter wirkt sich zudem auf das Klima und den Untergrund der Erde aus. Die Folge dieser Thematik wird mit Erläuterungen zum Klimawandel und Permafrost erläutert.

Abschliessend waren zusammen mit dem SNP Bereich Forschung und Geoinformation die entsprechenden Schlussfolgerungen zu ziehen und Empfehlungen zum Vorgehen für weitere Folgemessungen und generell die Überwachung von Blockgletschern zu erarbeiten. Die konkrete Aufgabenstellung ist im *Anhang A1 Aufgabenstellung Blockgletscher Macun – Dritte Folgemessung* abgelegt.

2. Blockgletscher und Permafrost

Der nachfolgende Abschnitt behandelt die Eigenschaften von Blockgletschern sowie den Blockgletscher Macun im Schweizerischen Nationalpark. Des Weiteren wird die Thematik des Klimas und Permafrosts aufgegriffen.

2.1 Definition eines Blockgletschers

Die Bezeichnung «Blockgletscher» mag an eine klassische aus Schnee hervorgegangene Eismasse erinnern, was jedoch falsch ist. Nach Mautz et al. (2010) ist ein Blockgletscher in Wirklichkeit eine eisdurchdrungene Schutt- und Geröllmasse. Ein Blockgletscher kann mehrere hundert Meter lang und einige zehn Meter breit sein. Szönyi (2007: 41) sagt, dass Blockgletscher sich vorwiegend im Bereich von Schutthalden hoher Berge befinden.

Solche dauernd gefrorene, eisreiche Schutthalden und Moränen sind kurzfristig erosionsresistent. Hingegen auf längere Zeit gesehen verformen sie sich gemäss (Haeberli, 1995) mit konstanter Geschwindigkeit bei gleichbleibender Last, also ähnlich wie Gletscher.

Blockgletscher sind Ausdruck von Kriechbewegungen im eisreichen Permafrost. Sie bewegen sich aufgrund der Hangneigung talwärts und bilden dabei häufig lavastromartige Strukturen aus. Der grösste Teil des Eises im Blockgletscher ist Segregationseis (gefrorenes Wasser aus dem Untergrund). Hinzu kommt sedimentäres Eis aus begrabenem Lawinenschnee und Reste von Gletschereis. Gemäss Literatur gibt es zwei Gründe für Blockgletscherbewegungen. Zum einen übersteigt der Eisgehalt das Porenvolumen, was zu Deformationen des Schutt-Eis-Gemisches führt und zum anderen herrscht an der Permafrostbasis ein Gleitprozess. Ist ein Blockgletscher aktiv, deutet dies auf einen diskontinuierlichen Permafrost hin. Bei einem inaktiven Blockgletscher sind keine Kriechbewegungen sichtbar, jedoch enthält er noch Eis (Roland Baumhauer, 2006: 85).

2.1.1 Aufbau und Entstehung eines Blockgletschers

Im Wurzel- und Fussbereich des Blockgletschers Macun herrscht aktuell die grösste Aktivität. Diese zwei Zonen und der Aufbau eines Blockgletschers werden im folgenden Abschnitt näher betrachtet und beschrieben.

Voraussetzungen für die Entstehung eines Blockgletschers sind einige geologische Voraussetzungen wie Permafrost, Lockergestein und eine gewisse Hangneigung. Zudem müssen über mehrere tausend Jahren bestimmte klimatische Bedingungen herrschen: Es sollte mehrheitlich so kalt sein, dass das Eis im Blockgletscher erhalten bleibt, aber trotzdem trocken genug, dass sich keine gewöhnlichen Gletscher bilden können (Frauenfelder, Roer, 2007).

Wie Lozza et al. (2012) gezeigt haben, brauchen diese Blockgletscher Nahrung in Form von Steinen Lawinenschnee und Eis, damit sie sich bilden können, wobei die Mischung von zentraler Bedeutung ist. In Gebieten, in welchen viel Niederschlag fällt, entstehen in vergleichbaren Höhenlagen Gletscher. Falls jedoch der Schutteintrag dominant ist, entsteht eine Mischung von Schutt und Eis.

Hat sich ein Blockgletscher einmal entwickelt, hebt er sich morphologisch von der Umgebung ab (vgl. Abbildung 2). An den Rändern und im Stirnbereich ist er scharf begrenzt und meist 15-

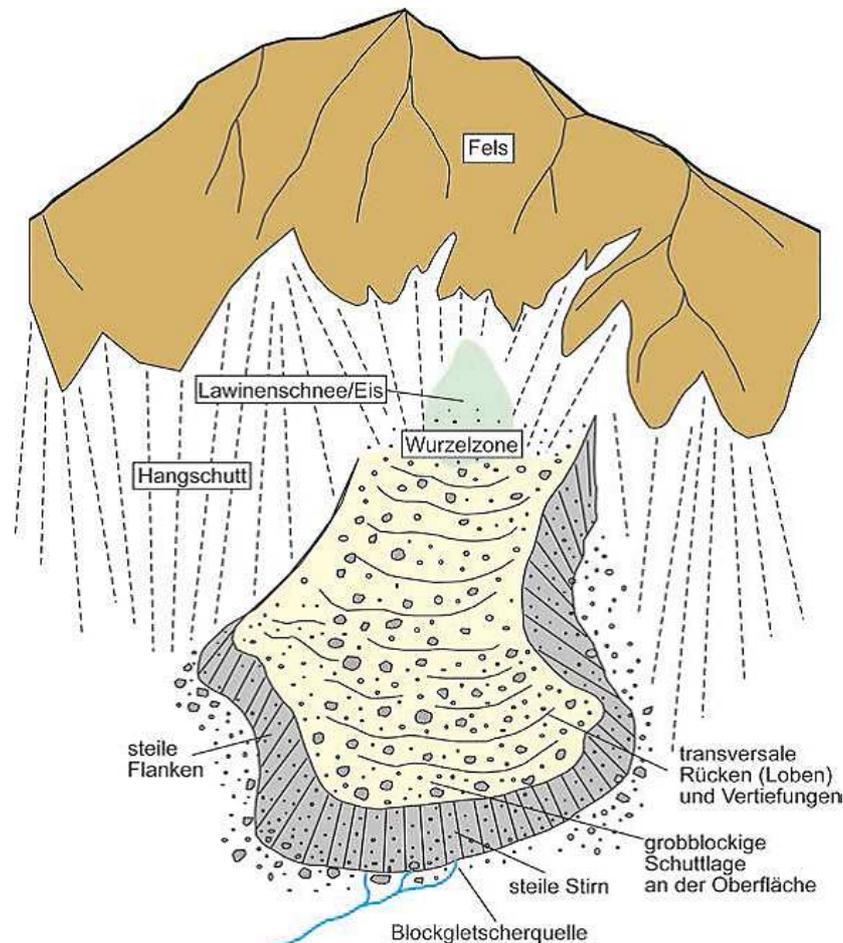


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Blockgletschers (Krainer, 2015)

30 m, selten bis über 50 m mächtig. An der Front im Bereich der Stirn liegt der Böschungswinkel zwischen 40° und 45° . Dieser Wert liegt deutlich über den natürlichen Böschungswinkel von rund 33° , wie es bei lockerem Feinsand üblich ist. Das Material der Stirn ist bei aktiven Blockgletschern aufgelockert und dynamisch. Der Schutt enthält neben den Blöcken auch viel Feinmaterial. Bewuchs gibt es jedoch keinen. An der Oberfläche von Blockgletschern gibt es eine Auftauschicht (active layer), welche im Sommer nicht gefroren ist. Sie kann bis zu mehreren Metern mächtig sein und besteht grösstenteils aus einer grobblockigen Schuttlage. Diese kann das Permafrosteis des gefrorenen Körpers in den Sommermonaten von verstärktem Abschmelzen schützen, indem sie diesen Körper ummantelt. Oftmals ist an der Oberfläche eine auffällig markante Morphologie in Form von transversalen und longitudinalen Rücken und Vertiefungen mit variierenden Höhenunterschieden zu erkennen. Diese Verformungen entstehen durch die Fließbewegungen. Im Bereich der Wurzelzone ist oft eine Depression ausgebildet. Das ist ein Bereich, wo eine grössere Vertiefung zu sehen ist. In dieser kann sich während der Sommermonate Schmelzwasser sammeln, was zur Bildung von kleinen Seen führen kann (Krainer, 2015b).

2.1.2 Wurzel- und Fusszone

Wie oben kurz beschrieben und in Abbildung 2 sichtbar, bestehen Blockgletscher aus zwei wesentlichen Zonen, der Wurzelzone und der Fusszone.

Gemäss Krainer (2015: 89) ist die Wurzelzone bei allen Blockgletschern die wichtigste. Sie ist die Quelle des Blockmaterials und befindet sich am Ausgangspunkt des Blockgletschers. In dieser Zone gelangt oft alles Lockermaterial infolge von Steinschlägen und Lawinenabgängen. Die Blockgletscher werden in diesem Bereich mit Material «genährt», deshalb wird oft auch von der sogenannten Nährzone gesprochen. Je nach Witterung und Lage-Konstellation verlagert sich dieses Geröll unterschiedlich schnell in Richtung der Fusszone.

Im Gegensatz zur Wurzelzone befindet sich die Fusszone, oder auch Stirn genannt, am Ende der Blockgletscherzunge. Die Ausdehnung dieser Zone sowie die Rate der Sedimentlieferung hängen einerseits von der Massenübertragungsrate des Materials ab, welches durch den Blockgletscher kriecht. Andererseits werden sie vom Volumen des Eises und den Hohlräumen im bewegten Abschnitt beeinflusst. Des Weiteren ist die Materialmenge, welche gelegentlich durch den Abbau von Permafrost-Eis-Linsen entsteht, entscheidend. Diese Linsen befinden sich an der Oberfläche des Blockgletschers und sind meist zur Sonne ausgerichtet. Diese Erkenntnisse wurden von Lugon, Stoffel (2010) gewonnen.

Dieser Bereich des Blockgletschers staut sich stark auf. Folglich entstehen mächtige und steile Flanken, welche kaum begehbar sind. Wenn eine gewisse Menge an Material und Kraft vorhanden ist, weitet sich der Blockgletscher aus. Dies kann Steinschläge oder Felsstürze auslösen.

2.1.3 Blockgletscher Macun

Der Blockgletscher Macun befindet sich im Schweizerischen Nationalpark zwischen Zernez und Lavin auf einer mittleren Höhe von 2700 m ü. M (vgl. Abbildung 4). Die Ausdehnung in Nord-Süd Richtung beträgt etwa 600 m und 300 m in Ost-West Richtung. Die Höhendifferenz vom Fuss zum Wurzelbereich beträgt rund 125 m. Er verläuft leicht I-förmig von Ost- in Nordrichtung, hat steile Ränder und eine steil abfallende Stirn und ist im Sommer beinahe schneefrei, wie in Abbildung 3 sichtbar. Ob es sich um einen aktiven oder inaktiven Blockgletscher handelt, wird sich im Verlaufe dieser Arbeit zeigen.



Abbildung 3: gesamte Ausdehnung des Blockgletschers Macun (eigene Aufnahme)

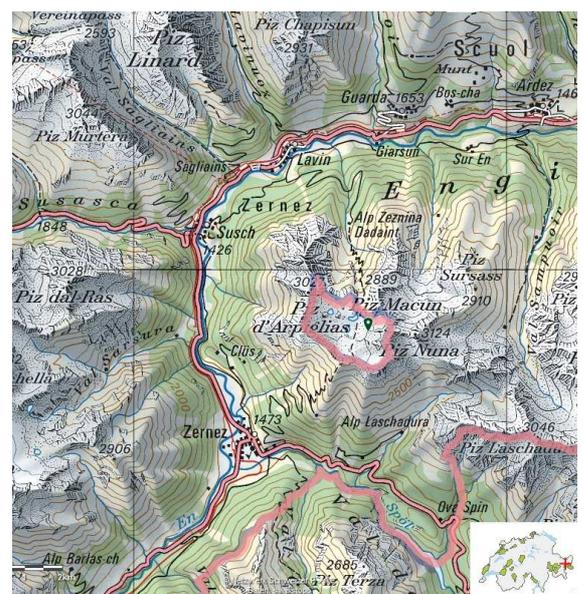


Abbildung 4: Standort Blockgletscher Macun (www.angebote.paerke.ch)

2.1.4 Schweizerischer Nationalpark (SNP)

Der SNP ist das grösste Wildnisgebiet der Schweiz und der älteste Nationalpark in den Alpen und in Mitteleuropa. Er ist ein Reservat der höchsten Schutzklasse (Kategorie Ia). Im Schweizerischen Nationalpark können sämtliche natürliche Prozesse uneingeschränkt wirken. Die Natur kann einfach Natur sein, ohne dass der Mensch Einfluss nehmen kann. Der Mensch steht im Hintergrund und kann die dynamischen und natürlichen Prozesse dieser alpinen Landschaft beobachten und durch wissenschaftliche Forschung zu verstehen versuchen. So wie das bei der Beobachtung des Blockgletschers Macun der Fall ist (SNP, 2017).

Kalte und trockene Gebirgsgegenden mit viel losem Gestein beherbergen nach Lozza et al. (2012) typischerweise das Phänomen von Gebilden aus Stein und Eis. Diese Voraussetzungen werden vom Nationalpark bestens erfüllt. Dass sich im Parkgebiet gleich zehn grössere Blockgletscher befinden, erstaunt deshalb nicht.

2.2 Klima und Permafrost

500 v. Chr. erkannte bereits der griechische Philosoph Heraklit von Ephesus, dass nichts so beständig ist wie der Wandel. Dieser Wandel ist im Gebirge und in den Alpen gut erkennbar. Laut Koch, Erschbamer (2013) ist diese Veränderung an fast keinem anderen Gebilde als einem Gletscher oder Blockgletscher so offenkundig.

In der vorliegenden Arbeit soll der Einfluss des Klimawandels sowie des Permafrosts auf die Veränderung der Blockgletscher aufgegriffen und beleuchtet werden. Der Klimawandel wirkt sich auf den Permafrost aus und dieser wiederum ist Bestandteil eines Blockgletschers.

2.2.1 Klimawandel

Der Klimawandel ist ein globales Problem und wurde auf dieser Stufe bereits erkannt und verstanden. Der Treibhauseffekt sorgt dafür, dass sich die Energie im Erdsystem akkumuliert und sich sehr unregelmässig auf die Komponenten des Erdsystems verteilt. Werden diese Auswirkungen lokal oder schweizweit betrachtet, kommen verschiedenste Fragen auf. Um die Problematik darzulegen und allenfalls zu klären, sind die Alpen ein gutes Beispiel. Dort zeigt sich ein langfristiger Trend zu wärmeren Temperaturen. Die Temperaturzunahme ist grösser, wenn der Trend über die letzten 30 Jahre anstatt über die letzten 50 oder 100 Jahre bestimmt wird. Jahrweise betrachtet ist vor allem in den Monaten Mai und Juni eine starke Erwärmung ersichtlich. Im Frühsommer hat die solare Einstrahlung ihr Maximum. Dies führt zu einer kürzeren Dauer der Schneebedeckung im Gebirge und kann für die Erwärmung mitverantwortlich sein. Folglich wird weniger Sonnenstrahlung reflektiert und mehr absorbiert, was zu einer Erwärmung, dem sogenannten Albedo-Feedback, führt (Marzeion, 2012).

Nicht nur Naegeli (2010) sagt, dass es für die Zukunft Szenarien gibt, die prognostizieren, dass der Ausstoss von Treibhausgasen weitergeht und zunehmen wird. Demzufolge würden auch die globalen Lufttemperaturen weiter steigen und somit eine fortschreitende Erwärmung des Permafrosts bewirken. Im Hochgebirge könnte das zu einer Veränderung der Lage und des Verlaufs der Permafrostgrenze sowie der Blockgletscher führen.

2.2.2 Permafrost

Der Begriff Permafrost versteht Roland Baumhauer (2006) wie folgt: Permafrost wird über die Zeit und Temperatur definiert. Er ist die Bezeichnung für Lithosphärenmaterial (Material mit steinerner Hülle), welches während der Dauer von mindestens einem Jahr eine Temperatur von unter 0° C aufweist. Beim gefrorenen Material handelt es sich im Normalfall nie um Boden im eigentlichen, bodenkundlichen Sinn. Bodeneis ist eine mögliche Konsequenz, jedoch nicht die

Ursache von Permafrost. Im Gegensatz zu Permafrost, welches überwiegend magmatisches Eis enthält und durch Gefrieren von Wasser im Untergrund entsteht, entwickelt sich Gletschereis durch die Transformation von Schnee über Firn zu Eis. Es wird zwischen eisreichem (ice-rich), trockenem (dry), untersättigtem (undersaturated), gesättigtem (saturated) und übersättigtem Permafrost (supersaturated permafrost) unterschieden. Der Unterschied liegt, wie Haerberli (1995) festgestellt hat, im Eis- und Wassergehalt der Poren. Dauernd gefrorene Schutthalden im Hochgebirge können mehr Eis als Schutt enthalten.

Obwohl die Temperaturen in der Atmosphäre gestiegen sind, konnte bei Bohrlochtemperaturmessungen in den Alpen bisher keine klare Erwärmung festgestellt werden. Grund dafür ist, dass die Temperaturen im Untergrund von diversen Einflüssen, wie Vorhandensein von isolierenden Blöcken oder jährlicher Variabilität der Schneedecke modifiziert werden. Zudem ist der Zeitbereich, den die Messreihe abdeckt, zu kurz. Trotzdem gibt es auch andere Hinweise, die auf eine Veränderung des Permafrosts in den Alpen deuten (Naegeli, 2010).

2.2.3 Permafrost im Blockgletscher

Blockgletscher befinden sich vor allem im Permafrostbereich. Eine Eigenschaft des Blockgletschers ist, dass er sich mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit hangabwärts bewegt. Ist der Bereich des Permafrosts mit Eis gesättigt, kann sich der Blockgletscher duktil verformen und aufgrund der Gravitation hangabwärts fließen. Diese Geschwindigkeiten liegen im Bereich von mehreren Dezimetern pro Jahr. Hier kommt dem Permafrost eine wichtige Bedeutung zu. Der gefrorene Schutt sorgt dafür, dass der Blockgletscher zusammengehalten wird. Ist dies nicht mehr der Fall und der Permafrostbereich taut auf, werden nach und nach neue Bereiche des Gebirgsschuttes instabil und drohen abzustürzen. Murgänge, Gletscherabbrüche oder vermehrte Steinschläge deuten auf eine zunehmende Dynamik am Berg hin, welche die Landwirtschaft oder die Wohnbevölkerung in Berggemeinden bedroht. Schweizweit gibt es laufende Projekte, welche diese Dynamik eingehend vermessen und überwachen sollen, so auch die Überwachungsmessungen im SNP auf dem Blockgletscher Macun.

2.2.4 Auswirkungen von Klimaänderung und Permafrost

Gemäss Haerberli (1995) kann das Abschmelzen von Eis im Lockerschutt zu massiven Setzungen, grossräumigem Verlust des mechanischen Zusammenhalts und einer Zunahme der Erodierbarkeit führen. Diese Prozesse treten oft bei Gefällen auf, welche naturgemäss trockene Schüttungen bilden. Darunter leidet die Hangstabilität, was wiederum Murgänge, Steinschlag und Felsstürze bewirken kann.

Ein aktuelles Beispiel hierfür ist das Abrutschen des Hanges der Moosfluh oberhalb des Aletschgletschers. Wie Kos et al. (2016) gezeigt haben, ist der angrenzende Hang rasant in Bewegung gekommen, da sich das Eis so rasch zurückgezogen hatte. Geowissenschaftler können nun belegen, dass die Hanginstabilität direkt mit dem Klimawandel zusammenhängt. Es gibt eine kritische Schwelle des Gletscherschwundes, welche im Aletschgebiet Mitte der 1990er-Jahre auftrat und die Hangbewegung mit einer Zeitverzögerung von neun Jahren beschleunigte.

Durch das Auftauen von Eis im Kluftsystem zerrütteter Felsflanken ändern sich nach Haerberli (1995) neben den mechanischen auch die hydraulischen Eigenschaften des Gesteins. Die Stabilität steiler Bergflanken im Hochgebirge wird deshalb vom Permafrost und vielen weiteren Faktoren beeinflusst. Zu erkennen ist, dass die grobblockigen Oberflächen der Blockgletscher durch Gesteinskomponenten entstanden sind, welche nicht nur durch tageszeitliche Frostwechsel der obersten Zentimeter, sondern auch durch jahreszeitliche Gefrier- und Tautvorgänge bis hinunter zum Permafrostspiegel herabgestürzt sind.

3. Eingesetzte Messverfahren und Technologien

Für die Erfassung der Blockgletscherform und des -volumens sind diverse Sensoren eingesetzt worden. Der gesamte Blockgletscher wurde mit einem terrestrischen Laserscanner VZ-4000 von RIEGL gescannt und mit der autonomen eBee Drohne von senseFly mit dem Bildsensor Sony WX RGB befliegen. Für die Messungen des Fixpunktnetzes kamen zwei GNSS Leica Viva GS14 Empfänger von Leica Geosystems zum Einsatz.

Die Scan-Daten wurden in RiSCAN, die Drohnenaufnahmen in Postflight Terra 3D (Version 4.0.104) und die GNSS Messungen in Leica Infinity weiterverarbeitet. Alle weiteren Analysen und Auswertungen wurden in 3DReshaper gemacht.

3.1 Satellitenmesstechnik – GNSS

Das Grundlagenetz mit Fix-, Kontroll- und Verknüpfungspunkten wurde mit dem GNSS System von Leica Geosystems gemessen. Es wurde die GS14 Antenne und der CS15-Kontroller eingesetzt (vgl. Abbildung 5 und Abbildung 6). Die beiden Datenblätter mit den technischen Angaben sind in den Anhängen *A2 Datenblatt Leica Viva GS14* und *A3 Datenblatt Leica Viva Controller CS15* zu finden.



Abbildung 5: GNSS-Empfänger Leica Viva GS14 (Leica Geosystems, 2017)

Genauigkeit statisch und schnell statisch:
3 mm + 0.5 ppm (horizontal)
5 mm + 0.5 ppm (vertikal)

Serien Nr. GS14:
2870188 (intern Nr. GNSS2)
2870189 (intern Nr. GNSS3)

Serien Nr. CS15:
2906326 (GNSS2)
2906333 (GNSS3)



Abbildung 6:
Leica Viva
Controller
CS15 (Leica
Geosystems,
2017)

3.2 Terrestrisches Laserscanning – TLS

Als terrestrischer Laserscanner stand der RIEGL VZ-4000 Scanner (vgl. Abbildung 7) von der ETH Zürich zur Verfügung. Im Voraus fand seitens der ETH eine Einführung statt, bei welcher der Arbeitsablauf und die Handhabung erklärt wurde. Folgend sind einige technische Daten aufgeführt. Das gesamte Datenblatt ist im *Anhang A4 Datenblatt RIEGL VZ-4000* zu finden.



Abbildung 7: TLS
RIEGL VZ-4000
(RIEGL, 2017)

Genauigkeit:	15 mm
Präzision:	10 mm
Reichweite:	bis 4 km
Mindestreichweite:	5 m
Laser Wellenlänge:	nahes Infrarot
Sichtfeld:	vertikal +30°/-30° horizontal max. 360°
Scangeschwindigkeit:	vertikal 100°/sec - 14'400°/sec horizontal 0°/sec - 60°/sec
Winkelmessauflösung:	besser als 0.0005° (1.8 arcsec)
Seriennummer	S9999020
(RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2017a)	

Staiger (2014) sagt, dass TLS überall dort eingesetzt wird, wo die georeferenzierte Geometrie grosser Objekte detailreich, schnell und mit hoher Genauigkeit berührungslos zu erfassen ist. Um einen Blockgletscher beobachten zu können, braucht es diese Eigenschaften eines TLS. Wie detailliert sich die Gesteinsblöcke darstellen lassen, wird sich erst zeigen. Ebenfalls sollte das Scannen auf eine Distanz von einem Kilometer möglich sein.

Die Long Range Technologie des RIEGL VZ-4000 ermöglicht eine Langstreckenmessung von bis zu 4 km. Dies geschieht mit einem permanent augensicheren Betrieb und den Einsatz eines Lasers der Klasse 1. Um solche Fernmessungen zu ermöglichen, wird die sogenannte V-Line-Technologie eingesetzt, welche auf Echo-Digitalisierung und Online-Wellenformverarbeitung basiert und Mehrfachreflexionen auswerten kann (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2017b).

3.3 Photogrammetrie – UAV

Für die Luftaufnahmen des Blockgletschers wurde die voll autonome eBee-Drohne von senseFly eingesetzt (vgl. Abbildung 8). Dadurch konnten hochauflösende Luftbilder aufgenommen und danach Orthophotos und 3D-Modelle generiert werden. Als Bildsensor diente die 18.2 Megapixel Sony WX RGB Kamera. Nachstehend einige technische Angaben.



Gewicht:	ca. 0.69 kg
Flügelspanne:	96 cm
Batterie:	11.1 V, 2150 mAh
Max. Flugzeit:	30 min
Fluggeschwindigkeit:	40-90 km/h
Funkreichweite	bis zu 3 km
Max. Abdeckung Einzelflug:	12 km ²
Luftwiderstand:	bis zu 45 km/h
Lineare Landegenauigkeit:	ca. 5 m

Die gesamten technischen Daten können dem *Anhang A5 eBee Broschüre* entnommen werden.

Nebst der Drohne kamen die Softwareprodukte eMotion2 (Version 2.4.11) und Postflight Terra 3D zum Einsatz, welche für die Flugplanung sowie Auswertung eingesetzt wurden.

Abbildung 8: eBee (senseFly, 2017)

Vorgängig zur Messkampagne wurden einige Testflüge gemacht. Dadurch konnte der Ablauf und die Handhabung sowie die Flugplanung geübt werden. Im Anschluss wurde eine Checkliste erstellt.

3.4 Grundlagedaten

Die wichtigsten Grundlagedaten stellten die der Folgemessung zwei aus dem Jahre 2015 dar. Sie konnten beim Examinator bezogen werden und sind dementsprechend hochwertig. Es waren dies Koordinaten der Fixpunkte sowie die TLS- und UAV-Aufnahmen, woraus Oberflächenmodelle abgeleitet wurden. Die Daten bei der Folgemessung drei sind auf die gleiche Art und Weise erzeugt worden, was eine gute Analyse ermöglichte.

3.5 Meteodaten vom Institut für Schnee- und Lawinenforschung

Zur Überprüfung des Zusammenhangs zwischen Klimawandel und Schwinden des Permafrosts wurden Meteodaten vom WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF, 2017) bestellt. Da sich das Messgebiet im Dreieck zwischen den SLF-Stationen Ofenpass-Murtaröl (2359 m ü. M. 818'233 / 168'460), Zernez-Pülschezza (2677 m ü. M. 797'312 / 175'078) und Naluns-Schlivera (2350 m ü. M. 814'920 / 188'734) befindet, wurden dessen Messdaten bezogen. Die Daten konnten für Forschungszwecke kostenlos bezogen werden, nur der Aufwand für die Datenaufbereitung musste bezahlt werden.

4. Vorbereitungsarbeiten

Um während der Messwoche einen reibungslosen Messablauf zu gewährleisten, wurden vorgängig zur Messkampagne auf Macun diverse Abläufe durchgespielt.

4.1 Testmessungen Leica GS14

Die Funktionsfähigkeit der GNSS-Systeme wurde vorgängig mit einer kurzen Testmessung überprüft. Dabei wurde ein neues Arbeitsprofil mit den gewünschten Einstellungen bezüglich Rohdatenaufzeichnung (RSTS) erstellt. Die Speicherung der Messdaten wurde kontrolliert und diese konnten in Leica Infinity importiert werden.

Aus der BTh03/2015 ist bekannt, dass die Messung mit Strebenstativen ausreicht. Dadurch kann Gewicht und Zeit gespart werden. Die Lotstöcke wurden vor dem Materialtransport sorgfältig verpackt und die Dosenlibellen kontrolliert.

4.2 Testmessungen RIEGL VZ-4000

Die Handhabung des Laserscanners VZ-4000 von RIEGL wurde im Rahmen einer Schulung an der ETH in Zürich demonstriert. Zum einen wurde der Workflow bei der Durchführung der Messungen angeschaut und zum anderen gab es eine Einführung in die Betriebs- und Verarbeitungssoftware RiSCAN Pro. Des Weiteren konnte eine Lizenz für die Software mittels Dongle bezogen werden. Um die Benutzeroberfläche anzusehen, konnte die Testversion von RiSCAN Pro bereits im Voraus installiert werden. Die Auswertung mit 3DReshaper durfte während den Blockprojekten «TLS mit P20 und 3DReshaper» und «3D-Rekonstruktion Campus Dreispitz» erprobt werden.

4.3 Testflug senseFly eBee

Das Ziel der Testflüge war, die Handhabung der eBee kennenzulernen und den Workflow der Flugplanung und Auswertung zu verinnerlichen. Dabei waren keine Genauigkeitsuntersuchungen vorgenommen worden. Die UAV-Befliegungen dienten lediglich dazu, dass während der Messkampagne keine Probleme oder Unklarheiten auftreten. Aus diesem Grund wurden zwei Testflüge gemacht, welche in Wohlen und Kaiseraugst stattfanden und durch Mitarbeitende des IVGI betreut wurden. Im Rahmen der Befliegung wurde mit der Software eMotion2 eine Flugplanung durchgeführt und der Datenexport getätigt. Hierfür wurde zusammen mit Hütter & Greutmann (BTh08/2017) ein Ablaufplan erarbeitet, welcher von N. Docci mit einer Checkliste ergänzt wurde.

Die Bildaufnahmen und Logfiles wurden gemäss Checkliste exportiert. Im Postflight Terra 3D konnten diese importiert und ausgewertet werden. Nach der Bildorientierung/Bündelblockausgleichung und dem Dense Matching wurden ein digitales Oberflächenmodell und ein Orthophotomosaik generiert.

5. Messkampagne Macun

In diesem Kapitel wird auf die Vorarbeiten für die Messwoche eingegangen und die Durchführung der Messkampagne erläutert. Neben dem Grundlagenetz 2017 werden auch das Messkonzept und die Messplanung aufgeführt.

5.1 Vorbereitungen für die Messkampagne

5.1.1 Rekognoszierung

Die Rekognoszierung des Messgebiets Macun fand am Samstag, dem 8. Juli 2017 statt. Dabei wurden während des Übergangs von Zernez nach Lavin alle Fest- und Kontrollpunkte aufgesucht und dessen Zustand begutachtet. Wie auf der Abbildung 9 ersichtlich ist, hatte es dieses Jahr bedeutend weniger Schnee als während der vorhergegangenen Folgemessungen. Dank des GNSS auf dem Mobiltelefon konnten alle Punkte problemlos gefunden werden.



Abbildung 9: Schneesituation während der Rekognoszierung

Für die Sichtbarkeitsanalyse wurde auf jedem Punkt ein Panoramafoto aufgenommen und mögliche Anschlusspunkte notiert. Falls nötig wurde die Markierung mit einer wetterfesten gelben Farbe erneuert. Ausser Punkt K8, welcher zerstört aufgefunden wurde, waren alle Punkte in einem guten Zustand. Punkt K7 wurde durch herabfallende Blöcke des Blockgletschers überdeckt und musste freigelegt werden. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die Versicherungsart von Punkt K12 fraglich ist, weil der Punkt versteckt und nicht sehr stabil ist. Eine vollständige Liste ist im *Anhang A7 Rekognoszierung Punktezustand* abgelegt.

Um einen besseren Einblick auf die Gletscherwurzel und in die Senke unterhalb der TLS-Station 5001 aus der BTh03/2015 zu erhalten, wurde auf dem Grat, welcher zu P. 2843 führt, ein neuer Festpunkt FP1014 markiert. Dieser ist über eine kleine aber stabile Geröllhalde von rechts her erreichbar und bietet, abgesehen von etwas Abdeckung im Osten (Grat), eine gute GNSS-Sichtbarkeit.

Für eine optimale Messplanung und dessen Umsetzung ist eine gründliche Rekognoszierung essenziell. Diese bildet die Basis zur Definition des Grundlagenetzes 2017.

5.1.2 Grundlagenetz 2017

Das Grundlagenetz wurde im Rahmen der Bachelor-Thesis 01/2010 eingerichtet und von Arpagaus, Joss (2012) erweitert. Für die zweite Folgemessung durch Fehr, Reich (2015) wurden einige Festpunkte nicht mehr verwendet, dafür aber zusätzliche TLS-Stationen gemessen.

Anhand der Rekognoszierung wurde beschlossen, dass auf das Grundlagenetz 2015 zurückgegriffen werden kann. Dieses wurde lediglich mit dem neuen Festpunkt FP1014 ergänzt (vgl. Kapitel 5.1.1 Rekognoszierung). In Abbildung 10 ist das Grundlagenetz 2017 zusammen mit den Routen der GNSS-Sessions abgebildet.

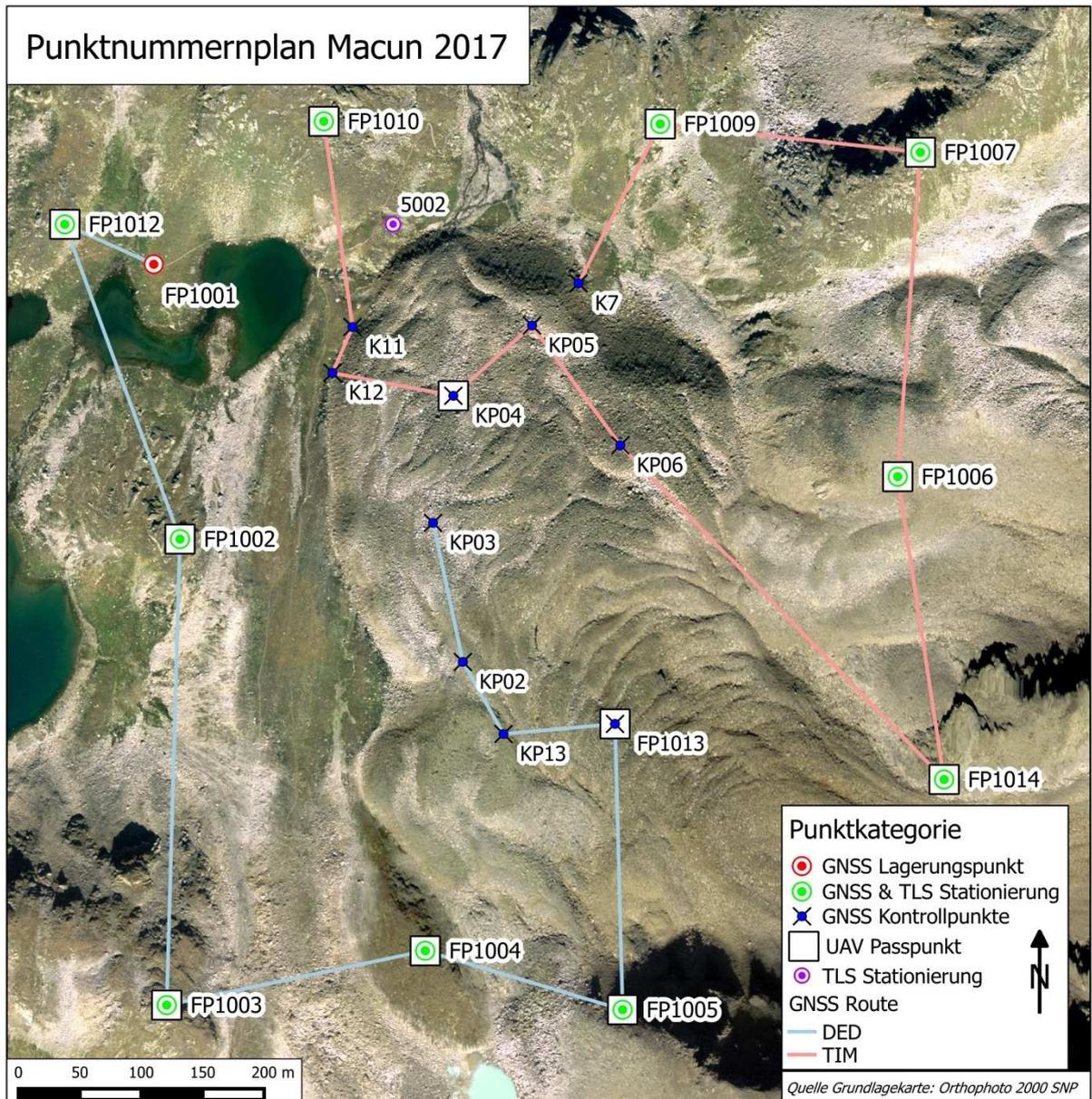


Abbildung 10: Punktnummernplan Macun 2017

In der folgenden Tabelle 1 sind alle Messpunkte mit ihrem Verwendungszweck aufgeführt.

Punkt Nr.	Verwendungszweck 2017
FP1001	GNSS Lagerungspunkt & UAV Passpunkt
FP1002	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1003	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1004	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1005	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1006	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1007	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1008	Nicht verwendet

FP1009	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1010	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1011	Nicht verwendet
FP1012	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1013	Kontrollpunkt & UAV Passpunkt
FP1014	TLS Stationierung & UAV Passpunkt (neu 2017)
KP02	Kontrollpunkt
KP03	Kontrollpunkt
KP04	Kontrollpunkt & UAV Passpunkt
KP05	Kontrollpunkt
KP06	Kontrollpunkt (neu 2015)
K7	Kontrollpunkt
K8	zerstört
K11	Kontrollpunkt
K12	Kontrollpunkt, schlecht versichert
KP13	Kontrollpunkt

Tabelle 1: Übersicht Verwendungszweck der Fixpunkte 2017

5.1.3 Messkonzept und Messplanung

Grundsätzlich wurde bei der dritten Folgemessung dasselbe Konzept wie bei der zweiten Folgemessung angestrebt, um vergleichbare Resultate zu erreichen und aussagekräftige Schlüsse ziehen zu können.

Aufgrund der Rekognoszierung wurde ein provisorischer Messablauf ausgearbeitet, um die Laufzeiten zwischen den Punkten während der Messkampagne möglichst kurz zu halten und dadurch Energie zu sparen.

Die tageszeitliche Erwärmung kann im Bereich der Gletscherwurzel zu Steinschlag führen. Die Messungen auf den Punkten, welche davon betroffen sind, fanden deshalb am Morgen statt.

5.1.4 Provisorischer Messablaufplan

Mithilfe des Messkonzepts wurde folgender provisorischer Messablaufplan entwickelt (vgl. Tabelle 2):

Zeitpunkt	Auszuführende Arbeit
Mo, 24.7. Morgen	Anreise, Aufstieg, Hütte beziehen, Material richten
Mo, 24.7. Nachmittag	GNSS Session 1, Passpunkte signalisieren
Mo, 24.7. Abend	TLS Stationen FP1010, FP1012
Di, 25.7. Morgen	UAV Befliegung
Di, 25.7. Nachmittag	TLS Stationen FP1005, FP1004, FP1003, FP1002
Mi, 26.7. Morgen	GNSS Session 2
Mi, 26.7. Nachmittag	TLS Stationen FP1014, FP1006, FP1007, FP1009
Do, 27.7. Morgen	GNSS Session 3, Signalisation abräumen
Do, 27.7. Nachmittag	Reserve: TLS Stationen 9, 10
Fr, 28.7. Morgen	Reserve: TLS Stationen 2, 12
Fr, 28.7. Nachmittag	Hütte räumen, Abstieg

Tabelle 2: Provisorischer Messablauf

5.2 Messwoche Macun

Die Messkampagne wurde während der Woche vom 24. – 28. Juli 2017 durchgeführt. Da in dieser Zeit die Forschertage auf Macun stattfanden, wurde seitens des SNP für Verpflegung gesorgt. Als Unterkunft stand eine alte Militärhütte zur Verfügung. Der Grossteil des Materials konnte mit dem Helikopter der Schweizer Armee zur Unterkunft hochgeflogen werden. Aufgrund der späten Übergabe des RIEGL-Scanners musste dieser jedoch hochgetragen werden. Die gesamte Materialliste befindet sich im *Anhang A6 Materialliste*.

5.2.1 Messablauf 2017

Die Messungen konnten aufgrund der schlechten Wetterbedingungen (Schnee, Regen und Wind) nicht wie geplant ausgeführt werden. Es galt immer die Wettersituation abzuwarten und spontane Entscheidungen aufgrund der aktuellen Wetterlage zu treffen. Fast alle Messungen konnten nicht nach Planung ausgeführt werden (vgl. Tabelle 3).

Zeitpunkt	Ausgeführte Arbeit
Mo, 24.7. Morgen	Anreise, Aufstieg, Hütte beziehen, Material richten
Mo, 24.7. Nachmittag	GNSS Session 1
Di, 25.7. Morgen	TLS Testmessungen
Di, 25.7. Nachmittag	TLS Stationen FP1002, FP1003, FP1004
Mi, 26.7. Morgen	GNSS Session 2, Signalisation UAV-Passpunkte
Mi, 26.7. Nachmittag	GNSS Session 2, Signalisation UAV-Passpunkte
Do, 27.7. Morgen	Flugversuch UAV, TLS Stationen FP1005, FP1012, 5002
Do, 27.7. Nachmittag	TLS Stationen FP1010, FP1009, FP1007
Fr, 28.7. Morgen	UAV Befliegung, TLS Stationen FP1006, FP1014
Fr, 28.7. Nachmittag	GNSS Session 3, Signalisation UAV-Passpunkte abräumen
Sa, 29.7. Morgen	Material zusammenräumen, Abstieg, Heimreise

Tabelle 3: Messablauf 2017

5.2.2 Aufnahmen GNSS

Es wurden drei Sessionen an drei Tagen mit zwei verschiedenen Empfängern (vgl. Kapitel 3.1) gemessen. Da im Gebiet Macun kein Mobilfunkempfang vorhanden ist, konnte nicht mit Real Time Kinematic (RTK) gearbeitet werden. Deshalb musste der Messmodus Rapid-Static (RSTS), das heisst eine sogenannte kurzstatische Messung, angewendet werden. Dabei wird so lange gemessen, bis der Stop & Go-Indikator 100 Prozent erreicht. Dieser Indikator ist verfügbar, wenn eine Rohdatenaufzeichnung konfiguriert ist. Die Messdauer basiert dadurch auf die Basislinienlänge, der Anzahl der Satelliten und dem GDOP (Leica Geosystems AG, 2012). Sie dauert etwas länger (ca. 5-7 min) als bei RTK üblich, dafür ist die Genauigkeit besser. Die Epochenzeit, also die Aufzeichnungsrate wurde mit 5 Sekunden angesetzt. Als Referenzstation diente eine VRS, die anhand der umliegenden Permanentstationen berechnet wurde. Die Berechnung der Koordinaten beziehungsweise die Basislinienberechnung erfolgt im Nachhinein mittels Post Processing (vgl. Kapitel 6.2).

Die Aufteilung der Sessionen und der Ablauf der Punkte ist in Tabelle 2 bzw. in Abbildung 10 ersichtlich. Die Messungen konnten gemäss diesem Ablauf ausgeführt werden. Es wurden in etwa die gleichen Punkte vom selben Operateur gemessen, wie sie bei der Rekognoszierung bereits begangen wurden. Dies steigerte die Schnelligkeit beim Aufsuchen. Während den Sessionen eins und zwei herrschte meistens starker Wind und Regen oder Schnee. Dies hatte zur Folge, dass die Laufwege mühsam waren und dementsprechend viel mehr Zeit aufgewendet werden musste. Die Session drei konnte dann bei trockenem Wetter durchgeführt werden. Schlussendlich

konnten alle drei Sessionen erfolgreich durchgeführt werden. Es wurde auf eine Ausrichtung der Antenne in Richtung Norden geachtet. Die Messungen wurden mit einer Antennenhöhe von zwei Meter ausgeführt. Die Feldprotokolle der GNSS-Messungen befinden sich im *Anhang A8* Feldprotokolle GNSS-Messungen Rapid-Static.

5.2.3 Aufnahmen Scanner

Für die TLS-Aufnahmen wurde der RIEGL VZ-4000 Scanner (vgl. Kapitel 3.2) eingesetzt. Dies ist ein Ersatzgerät der Firma RIEGL. Die Scanner Aufnahmen konnten aufgrund des Wetters nur während trockenen Abschnitten getätigt werden. Auf den TLS Stationen wurden dieselben Scan Einstellungen verwendet, wie sie im Jahre 2015 definiert worden sind (vgl. Tabelle 4). Werte für Temperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchtigkeit wurden mit dem Meteogerät GFTB 200 (Seriennr. 34902596) gemessen und eingetragen. Die Scanprotokolle sind im *Anhang A9 Feldprotokoll Scanstationen* zu finden. Gesamthaft wurden von elf Stationen aus Scan Aufnahmen getätigt. Um den Fussbereich kompletter und etwas genauer zu erfassen, wurde zusätzlich von der freien Station 5002 aus ein Scann durchgeführt. Dieser sollte über die Punktwolke registriert werden. Die restlichen Stationen befanden sich auf bekannten Fixpunkten. Es wurde jeweils die Höhe des Scanners gemessen. Bekannte Verknüpfungspunkte wurden keine gescannt. Dank den zwei Akkus konnten an einem Tag von bis zu sechs Stationen aus Aufnahmen gemacht werden.

Stationsnummer	line resolution [°]	frame-resolution [°]
FP1002	0.0060	0.010
FP1003	0.0090	0.010
FP1004	0.0090	0.020
FP1005	0.0088	0.020
FP1006	0.0088	0.015
FP1007	0.0088	0.010
FP1009	0.0088	0.010
FP1010	0.0088	0.010
FP1012	0.0081	0.010
FP1014	0.0088	0.015
5002	0.0260	0.030

Tabelle 4: Scan Einstellungen 2017

5.2.4 Aufnahmen Drohne

Aus den Empfehlungen der BTh03/2015 ging hervor, dass die Signalisation der Passpunkte zusammen mit einer GNSS-Session erfolgen sollte. Dadurch konnte Zeit eingespart werden. Total wurden zwölf Fixpunkte mit einer weissen Passpunkttafel von 25 x 25 cm versehen (vgl. Abbildung 10). Im Gegensatz zur Planung fand die Befliegung jedoch erst am letzten Messtag statt.

Anhand der Informationen aus der ersten Zwischenbesprechung mit R. Gottwald und R. Haller wurde beschlossen, die UAV Befliegung am Morgen durchzuführen. Dadurch sind die Windprobleme am Nachmittag und die Gefahr einer Adlerattacke auf die eBee am geringsten. Durch diesen Entscheid konnten jedoch die Empfehlungen (BTh03/2015) bezüglich des optimalen Sonnenstandes (11 Uhr) nicht ganz realisiert werden.

Die Landezone östlich des FP1002 konnte der zweiten Folgemessung entnommen werden. Die Wiese ist beinahe frei von Steinen und weist eine geringe Steigung auf. Die erforderliche Dimensionierung des Landeplatzes von 20 x 80 m bzw. einer 350 m langen Anflugschneise wurden eingehalten. Es bestand zudem die Möglichkeit durchzustarten. Jedoch musste eine Landung in den nahegelegenen See verhindert werden (Docci, 2017).

Als Backup für allfällige unvorhersehbare Probleme mit der eBee der FHNW konnte die Falcon 8 (inkl. Pilot) des SNP reserviert werden. Schlussendlich musste von dieser jedoch kein Gebrauch gemacht werden.

Die Flugplanung konnte bereits vor der Messkampagne mit der Software eMotion2 durchgeführt werden. Auch wurden die Hintergrundkarte und das Höhenmodell vorgängig in den Cache geladen. Die geplante Bodenauflösung betrug 6 cm. Die Überlappung in Quer- und Längsrichtung wurde auf 80 % festgelegt. Die Fluglinien verlaufen parallel zu den Höhenkurven. Der Flug wurde in zwei Teilflüge unterteilt. Der erste deckte den nördlichen, der zweite den südlichen Teil ab (vgl. Abbildung 11). Es sollte am entferntesten Punkt mit den Aufnahmen gestartet werden, um die Rückkehr bei niedrigem Akkustand möglichst kurz zu halten. (Docci, 2017) Der Akkustand war aufgrund der Flugunterteilung jedoch nie kritisch und die Flüge wurden problemlos durchgeführt. Wichtig war noch, dass die maximal zulässige Flughöhe von 300 auf 500 m angepasst wurde. Somit konnten die Teilflüge auf die eBee geladen werden und je mit einem Akku problemlos durchgeführt werden.

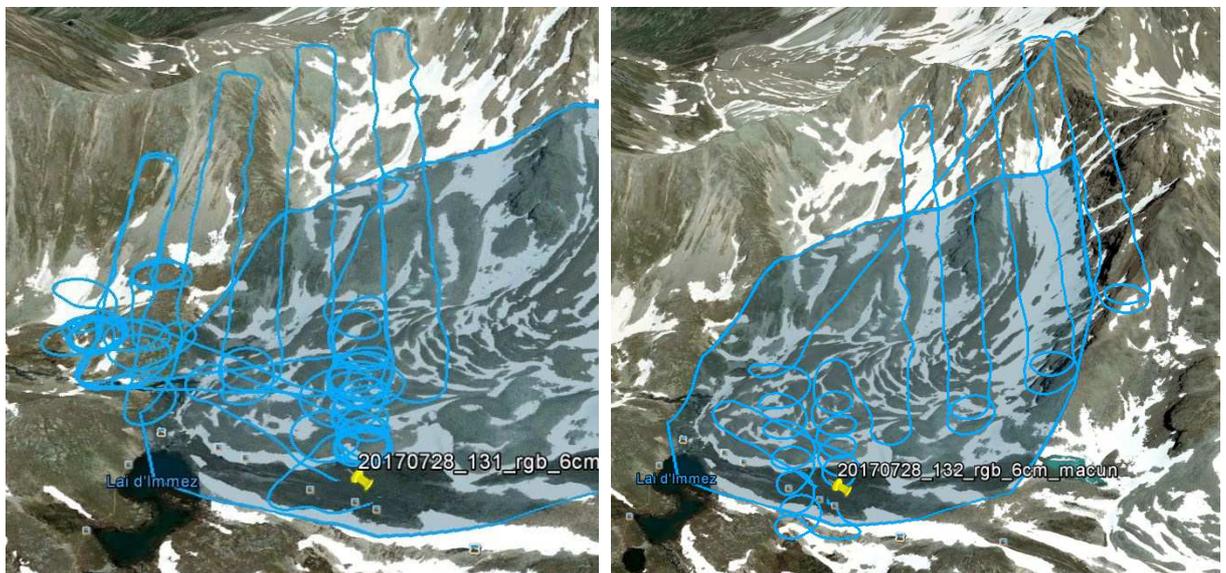


Abbildung 11: Fluglinien der zwei Teilflüge

Ein kurzer Blick auf die Fotos zeigte, dass es zum Teil windig gewesen ist und so einige Fotos verwackelt wurden. Die Wetterlage sowie der Zeitdruck liessen jedoch keine weitere Befliegung zu. Die meisten Fotos schienen in Ordnung zu sein.

6. Auswertung GNSS-Aufnahmen

Die Auswertung der GNSS Aufnahmedaten erfolgte gemäss nachfolgendem Schema (vgl. Abbildung 12). Darin sind die einzelnen Arbeitsschritte aufgeführt und erläutert.

Auswertekonzept GNSS		
	Phase	Detailbeschreibung
Rohdaten		Die Rohdaten werden in Leica Infinity importiert. Die Nummerierung, Antennentypen und die erfasste Höhenablesung werden mit der geführten Checkliste verglichen. Herunterladen der virtuellen Referenzstation (VRS) vom swipos-Dienst und Import ins Leica Infinity Projekt.
Leica Infinity		Vor der Basislinienberechnung wird das Koordinatensystem für die Transformation des globalen Bezugsrahmens WGS84 in den lokalen Bezugsrahmen LV95/LHN95 definiert. Die Auswertung wird mit GPS und GLONASS Satelliten durchgeführt. Die Auswerteparameter werden bestimmt und die Referenz und die Rover werden definiert.
Veratop / ITOP		Aufgrund der grossen Höhendifferenzen zwischen den Punkten werden die einzelnen GNSS Sessions auf einen allfälligen Höhenmassstab mittels Höhentransformation geprüft. Als Startsystem dienen die Höhen 2017 und als Zielsystem die Referenzmessung 2015.
		Die Messdaten werden auf ihre Vollständigkeit und auf formale Fehler geprüft.
		In einer robusten Ausgleichung wird geprüft, ob Massstabsunterschiede und Verdrehungen zwischen den Sessions vorhanden sind. Für alle 3 Sessions wird die Translation in E, N und Z freigegeben (bleibt auch bei der definitiven freien Netzlagerung). Zusätzlich wird in Session 2 und 3 ein unbekannter Parameter für den Massstab und die Rotation freigegeben.
		Fehlverdächtige Beobachtungen werden aufgedeckt. <ul style="list-style-type: none"> $w_i > 4.1$ à Beobachtung wird gelöscht $2.5 < w_i < 4.1$ à Beobachtung wird abgeschwächt Bei der Lage wird die E und N Komponente immer zusammen behandelt.
		Nach dem Bereinigen der Messdaten wird ein frei gelagertes Netz berechnet. Es wird der globale Modelltest durchgeführt, um das mathematische Modell zu prüfen.
		Die Festpunkte werden in der Lage mittels Helmerttransformation und in der Höhe mittels Höhentransformation überprüft. Als Startsystem gelten die Koordinaten 2017 und als Zielsystem die Koordinaten 2015.
		Wenn der Punkt FP1001 keine signifikante Verschiebung in Lage und Höhe aufweist, wird er als Lagerungspunkt der freien Netzlagerung gewählt.
Resultat		Aus dem definitiv frei gelagerten Netz werden die Koordinaten 2017 extrahiert. Es wird die Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten beurteilt. Die Koordinatendifferenzen zwischen 2015 und 2017 werden berechnet.

Abbildung 12: Auswertekonzept GNSS angepasst aus Fehr, Reich (2015)

Das Post Processing der GNSS Navigationsdaten erfolgte mit der Software Leica Infinity. Die Resultate der Basislinienberechnung wurden mit LTOP in eine Netzausgleichung eingeführt und das Netz auf den Fixpunkt FP1001 gelagert. Die ausgeglichenen Passpunktkoordinaten bilden das Grundlagenetz 2017.

6.1 Mathematisches Modell

Das mathematische Modell besteht aus einem funktionalen Teil, in welchem die Beziehung zwischen den Beobachtungen und den unbekanntem Parametern beschrieben werden, und aus einem stochastischen Teil, welcher das statistische Verhalten der Beobachtungen beurteilt.

Die theoretischen Standardabweichungen für das Verfahren RSTS wurden von den Herstellerangaben übernommen und beinhalten zudem Anteile der Zentrierungs- und Höhenablesenauigkeit. Sie wurden wie folgt angenommen und entsprechen etwa den Erfahrungswerten:

- GNSS-Lage: $\sigma_E = \sigma_N = 6 \text{ mm}$
- GNSS-Höhe: $\sigma_H = 12 \text{ mm}$

Das vollständige mathematische Modell ist in *Anhang A10 Mathematisches Modell GNSS* einsehbar.

6.2 Basislinienberechnung

Die Berechnung der Basislinien erfolgte mit der Software Leica Infinity (Version 2.2). Die verwendeten Parameter und Einstellungen sind in Tabelle 5, Tabelle 6 sowie Tabelle 7 aufgeführt.

Koordinatensystem

Das Koordinatensystem in Leica Infinity wurde folgendermassen definiert:

Koordinatensystem Name:	WGS84-LV95
Transformations Name:	LV95 Parameter
Transformations Typ:	Klassisch 3D
Höhenmodus:	Ellipsoidisch
Residuen:	Keine Verteilung
Lokales Ellipsoid:	Bessel
Projektion:	Swiss95
Geoidmodell:	CHGeo2004_LV95
LSKS Modell	-

Tabelle 5: Basislinienberechnung Koordinatensystem

Transformationsparameter

Folgende Einstellungen wurden für die Transformation von WGS84 in CH1903+ in Leica Infinity vorgenommen:

Name:	LV95 Parameter
Typ:	Klassisch 3D
Höhenmodus:	Ellipsoidisch
Ellipsoid A:	WGS 1984
Ellipsoid B:	Bessel
Modell:	Molodensky Badekas
dx:	-674.374 m
dy:	-15.056 m

dz:	-405.346 m
Rx:	0.0 “
Ry:	0.0 “
Rz:	0.0 “
MF:	0.0 ppm

Tabelle 6: Basislinienberechnung Transformationsparameter

Berechnungsparameter

Für die Parameterwahl wurde das Dokument «Richtlinie für Basislinienberechnungen mit LEICA Geo Office Version 8.4 am Institut Vermessung und Geoinformation der HABG, FHNW» herbeigezogen. Dort wurde die Parameterwahl für die Basislinienauswertung am IVGI von Sievers (2015) erläutert. Diese Einstellungen sind auf Leica Infinity direkt übertragbar:

Elevationswinkel:	10°
Ephemeriden:	Broadcast
Lösungsart:	Automatisch
GNSS Typ:	Automatisch
Frequenz:	Automatisch
Fixierung Ambiguities bis zu:	80 km
Troposphärenmodell:	Saastamonien
Ionosphärenmodell:	Automatisch
Ausgabe DOP Werte Azimut/Elevation:	Ja
Ausgabe Residuen:	Ja

Tabelle 7: Basislinienberechnung Berechnungsparameter

Die gesamten Parameter können aus dem «Protokoll GNSS-Auswertung» herausgelesen werden. Da dieses mehrere hundert Seiten lang ist, wurde es nicht in den Anhang genommen, sondern unter folgendem Dateipfad abgelegt:

08_Auswertung\1_Leica_Infinity\BTh01 Blockgletscher Macun Session X\Reports

Virtuelle Referenzstation

Da aufgrund des fehlenden Mobilfunkempfangs alle Punkte mit RSTS gemessen werden mussten, wurde eine Berechnung der Basislinien per Post Processing durchgeführt. Ermöglicht wurde dies durch das gezielte Absetzen einer virtuellen Referenzstation (VRS). Dafür musste auf swi-pos.ch eingeloggt und eine neue Bestellung der virtuellen Referenzstation (N 46.72577, E 10.13738, H 2700) getätigt werden. Diese Referenz liegt in der Mitte des Blockgletschers und somit etwa im Schwerpunkt der Messpunkte. Die Rohdaten wurden im RINEX-Format 3.02 bezogen.

Alle Punkte wurden in drei Sessions gemessen, daher galt es die Basislinien drei Mal einzeln zu lösen. Die Messzeit betrug bei den Rapid-Static Messungen immer zwischen sechs und sieben Minuten.

Beurteilung der Resultate

Die folgende Tabelle 8 zeigt die empirischen Standardabweichungen der Basislinienauswertung. Die Werte wurden aus dem *Anhang A17 Protokoll GNSS-Auswertung* entnommen.

Basislinie	Session	mE [mm]	mN [mm]	mH [mm]	KQ 3D
V045 – FP1001	1	0.7	0.2	0.7	1.0
V047 –	2	0.9	0.3	0.8	1.2
V043 –	3	0.9	0.4	0.9	1.3
V045 – FP1002	1	0.5	0.4	1.0	1.3
V047 –	2	0.9	0.3	1.2	1.5

V043 –	3	0.6	0.3	0.6	0.8
V045 – FP1003	1	0.9	0.4	0.9	1.3
V047 –	2	0.9	0.4	0.7	1.2
V043 –	3	0.8	0.3	0.8	1.2
V045 – FP1004	1	0.9	0.4	0.9	1.3
V047 –	2	0.6	0.3	0.7	0.9
V043 –	3	0.9	0.3	0.9	1.3
V045 – FP1005	1	0.7	0.3	0.9	1.2
V047 –	2	1.7	0.6	1.9	2.6
V043 –	3	2.0	0.6	1.9	2.8
V045 – FP1006	1	1.1	0.5	1.1	1.7
V047 –	2	0.9	0.5	0.9	1.4
V043 –	3	0.9	0.3	0.9	1.3
V045 – FP1007	1	0.7	0.3	0.8	1.1
V047 –	2	0.8	0.4	1.1	1.4
V043 –	3	0.6	0.3	0.7	0.9
V045 – FP1009	1	0.6	0.2	0.6	0.8
V047 –	2	1.2	0.3	1.1	1.7
V043 –	3	0.9	0.4	0.8	1.3
V045 – FP1010	1	0.6	0.3	0.6	0.9
V047 –	2	0.9	0.3	0.9	1.3
V043 –	3	0.7	0.4	0.6	1.0
V045 – FP1012	1	0.5	0.2	0.5	0.8
V047 –	2	0.9	0.3	0.9	1.3
V043 –	3	0.7	0.3	0.6	1.0
V045 – FP1013	1	0.6	0.3	0.7	1.0
V047 –	2	0.7	0.4	0.7	1.1
V043 –	3	0.7	0.3	0.9	1.2
V045 – FP1014	1	1.0	0.5	1.0	1.5
V047 –	2	1.4	0.5	1.7	2.3
V043 –	3	1.6	0.4	1.5	2.3
V045 – KP02	1	0.5	0.2	0.5	0.8
V047 –	2	0.6	0.3	0.6	0.9
V043 –	3	0.6	0.3	0.6	0.9
V045 – KP03	1	0.7	0.4	0.6	1.0
V047 –	2	0.8	0.3	0.8	1.2
V043 –	3	0.7	0.4	0.7	1.1
V045 – KP04	1	1.2	0.4	1.1	1.6
V047 –	2	0.6	0.3	0.7	1.0
V043 –	3	0.6	0.3	0.6	0.9
V045 – KP05	1	1.8	0.5	1.7	2.5
V047 –	2	0.7	0.3	0.6	1.0
V043 –	3	0.7	0.3	0.8	1.1
V045 – KP06	1	1.1	0.3	1.1	1.6
V047 –	2	1.0	0.4	0.8	1.3
V043 –	3	0.8	0.4	0.9	1.2
V045 – K7	1	1.4	0.4	1.3	1.9
V047 –	2	1.4	0.3	1.2	1.9
V043 –	3	0.9	0.3	0.8	1.2
V045 – K11	1	0.6	0.3	0.7	1.0
V047 –	2	1.0	0.4	1.1	1.6
V043 –	3	0.7	0.4	0.7	1.1
V045 – K12	1	0.9	0.4	0.9	1.3
V047 –	2	0.8	0.4	0.9	1.3
V043 –	3	0.7	0.3	0.7	1.0
V045 – KP13	1	0.7	0.3	0.7	1.1
V047 –	2	1.0	0.5	0.9	1.5
V043 –	3	0.7	0.3	0.7	1.1

Tabelle 8: Empirische Standardabweichungen der Basislinienberechnung

Die Resultate scheinen plausibel, da die meisten maximal zwei Millimeter gross sind und damit genauer als die Werte aus der Praxiserfahrung. Normalerweise ist die Höhengenaugigkeit schlechter (Faktor 1.5-3) als die Lagegenauigkeit. Hier sind die Werte der m_H meist gleich gross wie die m_E . Ebenfalls entgegen den Erwartungen wurde festgestellt, dass die E-Komponente weniger genau als die N-Komponente bestimmt wurde. In der Regel ist es genau umgekehrt. Es ist noch zu erwähnen, dass es sich hierbei um die innere Genauigkeit handelt und die effektive Koordinatengenaugigkeit schlechter zu erwarten ist.

6.3 Netzausgleichung GNSS

Die Auswertung wurde mit dem Programm LTOP (Version 2011.1.3) von Swisstopo durchgeführt. Die Verwaltung erfolgte mit Hilfe der Benutzeroberfläche VERATOP (V2013 Build 003) für Netzausgleichungen. Diese Verwaltung beinhaltet unter anderem die Eingabe- und Ausgabedateien für LTOP, die geodätischen Netzdefinitionen sowie die Berechnungsvarianten. VERATOP diente ferner für den Koordinatenvergleich mittels Transformationen. Die LTOP-Protokolle sind im *Anhang A12 Berechnungsprotokoll definitives freies Netz* einzusehen.

Beurteilung Höhenmassstab

Die Beurteilung eines allfälligen Höhenmassstabs erfolgte sessionsweise durch eine Höhentransformation der neu gemessenen Festpunkte in die Koordinaten von 2015.

Der Höhenmassstab wurde als Unbekannte mitgeschätzt. Wenn der Massstab berechnet wurde, fielen die Restklaffungen kleiner aus, denn sie wurden durch den Massstab verteilt. Der geschätzte Massstab sollte nicht grösser sein als dessen doppelte Standardabweichung m_M . Ansonsten muss der Höhenmassstab berücksichtigt werden. Er ist signifikant, wenn er die Signifikanzgrenze überschreitet.

$$\text{Signifikanzgrenze} = [\text{Höhenmassstab}] < 1.96 * [\text{emp. St. Abw. Massstab}]$$

Session	Massstab	empirische Standardabweichung	signifikant
1	231.9 ppm	117.4 ppm	Nein
2	160.9 ppm	145.7 ppm	Nein
3	208.8 ppm	97.0 ppm	Ja

Tabelle 9: Überprüfung der Höhenmassstäbe

Der Festpunkt FP1006 hatte sich zu 2015 um etwa 80 cm gesenkt und wurde bei der Transformation ausgeschlossen. FP1013 wurde bereits 2015 als Kontrollpunkt deklassiert.

Die dritte Session weist einen signifikanten Höhenmassstab auf (vgl. Tabelle 9). Die Signifikanzüberschreitung ist jedoch nur gering. Es wurde entschieden, keine Berechnung des Höhenmassstabs zu machen. Somit konnte mit den Originalmessungen weitergearbeitet werden und die drei Sessions passen besser zueinander, als wenn nur bei einer ein Massstab berechnet würde. Die maximale Höhendifferenz beträgt nur etwa 160 m.

Bei Verwendung des Massstabsparameters war kein Höhenversatz signifikant. Ohne diese Unbekannte ist jedoch ein signifikanter Offset von 24 bis 26 cm erkennbar. Dieser kommt von der Lagerung auf FP1001 der Referenzmessung aus dem Jahre 2010.

Provisorischer Abriss

Zu Beginn wurden die gemessenen Koordinaten der Sessions mit den Näherungskordinaten anhand des provisorischen Abrisses verglichen. Als Näherungskordinaten wurden die definitiven Koordinaten 2015 verwendet. Beim neuen Punkt FP1014 fand die Koordinate aus Session 1 Verwendung.

Der provisorische Abriss diente der Detektion von grossen groben oder formalen Fehlern. Die Messungen enthielten weder grobe noch formale Fehler.

Beurteilung Dreh- und Masstabsparameter

Bei der provisorischen freien Netzberechnung wurden die Sessionen untereinander auf signifikante Dreh- und Masstabsparameter verglichen. Zusätzlich zu den Unbekannten der Koordinaten wurden die Parameter Masstab in der Lage und Rotation um die Höhe der Sessionen 1 und 2 bezüglich der festen Session 3 mitgeschätzt. Alle Sessionen wurden auf dem Festpunkt FP1001 in Lage und Höhe frei gelagert. Dementsprechend wurden die drei zur Lagerung notwendigen Translationsparameter bei allen Sessionen zwingend eingeführt. Der Masstab oder die Rotation ist signifikant, falls die Signifikanzgrenze überschritten wird.

$$\text{Signifikanzgrenze} = [\text{Masstab oder Rotation}] < 1.96 * [\text{emp. St. Abw.}]$$

Die mitgeschätzten Masstabs- und Rotationsparameter mit ihren Standardabweichungen sind in Tabelle 10 aufgeführt:

Session 1			
Transformationsparameter	Wert	empirische Standardabweichung	signifikant
Rotation	-1.346 cc	-4.128 cc	Nein
Masstabs	-14.782 ppm	-6.490 ppm	Ja

Session 2			
Transformationsparameter	Wert	empirische Standardabweichung	signifikant
Rotation	-0.494 cc	-4.127 cc	Nein
Masstabs	-1.346 ppm	-6.482 ppm	Nein

Tabelle 10: Überprüfung Dreh- und Masstabsparameter

Die Prüfung zeigt, dass ausser beim Masstab der ersten Session die Werte kleiner sind als ihre doppelte Standardabweichung. Somit musste nur dieser eine Parameter zur Berechnung freigegeben werden.

Der Masstab beträgt nach festhalten der anderen Parameter noch -13.218 ± 5.177 ppm und macht auf eine Netzausdehnung von 1 km nur 13 mm aus. Es ist erkennbar, dass die Sessionen 2 und 3 besser zueinander passen als zur Session 1, weshalb diese auch nicht als fest gewählt wurde.

Test der normierten Verbesserungen

Die Aufdeckung von fehlerbehafteten Beobachtungen wurde mit dem Test der normierten Verbesserungen (w_i) erreicht. Bei der robusten Ausgleichung mussten vier Beobachtungen einzeln in einem iterativen Vorgang abgeschwächt werden, da ihr w_i -Wert zwischen 2.5 und 4.1 lag. Betroffen waren die Punkte FP1005 (Höhe) und K7 (Lage + Höhe), welcher mit 3.3 den grössten Wert hatte. Falls nur eine Lagekoordinate einen zu hohen Wert hatte, wurden beide abgeschwächt. Ihr Gewicht wurde reduziert, indem sie mit der doppelten Standardabweichung modelliert wurden. Die Werte sind im *Anhang A11 Berechnungs-Journal* einsehbar.

Differenz der Schwerpunktkoordinaten

Bereits im Rahmen der BTh01/2012 (Kapitel 9.5.3) konnte die genaue Bestimmungs- und Auswertemethode, welche sich auf die Referenzkoordinate des Lagerungspunktes auswirkte, nicht nachvollzogen werden. Seither bewirkt dieser Umstand infolge der Lagerung eine Lageverschiebung von etwa 13 cm und einen Höhenversatz von etwa 26 cm.

Globaler Modelltest

Mit dem Quotienten aus der theoretischen und der empirischen Standardabweichung kann geprüft werden, ob die Modellannahmen mit den erzielten Resultaten nach der Fehlerbereinigung übereinstimmen. Da der Lagequotient kleiner als eins ist, konnte das Modell angenommen werden (vgl. Tabelle 11). In der Höhe wurde eine leicht schlechtere Genauigkeit erreicht als erwartet. Mit Signifikanzniveau 95 % wurde auch der Test der Höhe akzeptiert. Die Quotienten entsprechen zufälligerweise denjenigen aus der BTh03/2015.

Globaler Modelltest	Lage	Höhe
Q [^]	0.96	1.07
Q ²	0.92	1.14
f	90	46
Quantil 95 % (Chi-Quadrat-Verteilung)	101.9	62.7
q = X ² /f _{95%} (q)	1.13	1.36
Q ² ≤ q	erfüllt	erfüllt

Tabelle 11: Globaler Modelltest

Test der Festpunkte

Die Festpunkte mussten auf signifikante Verschiebungen zu 2015 überprüft werden. Insbesondere der Lagerungspunkt FP1001 sollte eine minimale Änderung der Koordinate verzeichnen. Hierzu wurden eine Helmerttransformation für die Lage und eine Höhentransformation berechnet. Dabei wurden Punkte mit signifikanter Restklaffung iterativ aus der Transformation ausgeschlossen. Die Signifikanzgrenzen (95 %) für noch tolerierbare Klaffungen sind in Tabelle 12 sowie in Tabelle 13 ersichtlich und wurden aus den erzielten Genauigkeiten wie folgt berechnet:

$$\sqrt{m_{2015}^2 + m_{2017}^2} * 1.96$$

Signifikanzgrenze Lage	m _E [mm]	m _N [mm]
empirische Standardabweichung 2015 (Mittelwert)	5.7	5.7
empirische Standardabweichung 2017 (Mittelwert)	4.8	4.7
Signifikanzgrenze einer Restklaffung d _E , d _N (1σ)	$\sqrt{5.7^2 + 4.8^2} = 7.5 \text{ mm}$	
Signifikanzgrenze einer Restklaffung d _E , d _N (2σ = 95%)	7.5 mm * 1.96 = 14.6 mm	

Tabelle 12: Signifikanzgrenze Lage für die Helmerttransformation

Signifikanzgrenze Höhe	m _H [mm]
empirische Standardabweichung 2015 (Mittelwert)	13.3
empirische Standardabweichung 2017 (Mittelwert)	10.6
Signifikanzgrenze einer Restklaffung d _H (1σ)	$\sqrt{13.3^2 + 10.6^2} = 17.0 \text{ mm}$
Signifikanzgrenze einer Restklaffung d _H (2σ = 95%)	17.0 mm * 1.96 = 33.3 mm

Tabelle 13: Signifikanzgrenze Höhe für die Höhentransformation

Bei der Helmerttransformation zur Kontrolle der Lage haben sechs Punkte die Fixpunktprüfung bestanden (vgl. Abbildung 13). Der Festpunkt FP1006 hatte sich zu 2015 um über einen Meter verschoben und wurde aus der Transformation ausgeschlossen. FP1013 wurde bereits 2015 als Kontrollpunkt deklassiert. Die Restklaffungen von FP1002, FP1005 und FP1012 lagen über der Signifikanzgrenze und diese Punkte wurden ebenfalls weggelassen. FP1001 stimmt mit einem f_s von nur 11 mm gut.

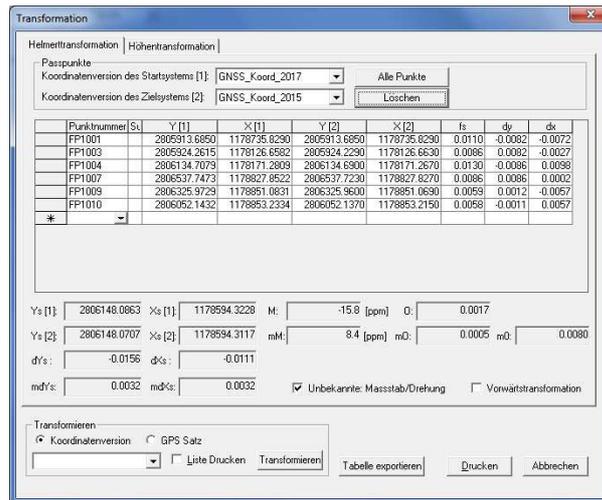


Abbildung 13: Helmerttransformation

Bei der Höhentransformation (vgl. Abbildung 14) haben acht Punkte die Fixpunktprüfung bestanden. Der Festpunkt FP1006 hatte sich zu 2015 um 83 cm gesenkt und wurde aus der Transformation ausgeschlossen. FP1013 wurde bereits 2015 als Kontrollpunkt deklassiert. Die Restklaffung von FP1005 lag mit -36 mm über der Signifikanzgrenze und dieser Punkt wurde ebenfalls weggelassen. FP1001 stimmt mit einem d_h von 7 mm gut. Der Höhenmassstabsparameter musste nicht mitgeschätzt werden, da die Sessions bereits vorgängig bezüglich den Koordinaten 2015 auf einen Höhenmassstab überprüft wurden.

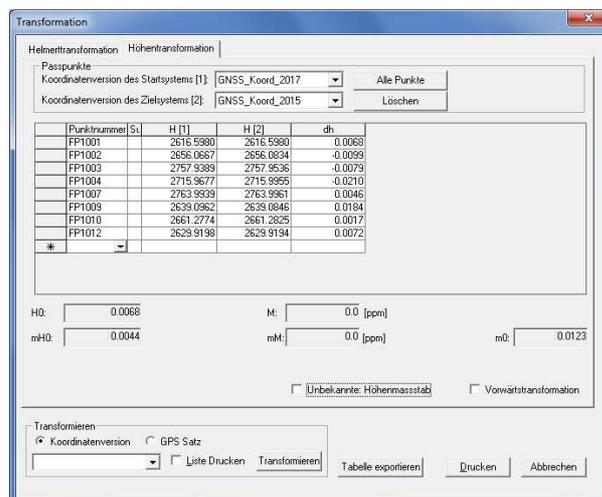


Abbildung 14: Höhentransformation

Definitiv frei gelagertes Netz

Der Lagerungspunkt FP1001 wies somit weder in der Lage noch in der Höhe signifikante Koordinatendifferenzen auf und kann als Lagerungspunkt wiederverwendet werden. Demzufolge sind die definitiven Koordinaten 2017 dieselben wie die bereits berechneten und wurden im Kapitel 6.4 aufgelistet. Das LTOP-Protokoll der Netzausgleichung ist im *Anhang A12 Berechnungsprotokoll definitives freies Netz* abgelegt.

Beurteilung Genauigkeit und Zuverlässigkeit

Die grosse Halbachse der Konfidenzellipse (MFA) «a posteriori» liegt bei allen Punkten zwischen 4.7 mm und 4.9 mm, mit Ausnahme von Punkt K7, bei welchem Beobachtungen abgeschwächt wurden. Die mittlere Genauigkeit konnte demzufolge im Vergleich zur zweiten Folgemessung um 0.9 mm gesteigert werden.

Auffallend ist, dass die Konfidenzellipsen überall nur annähernd kreisrund sind und eine Orientierung haben. Es wurde bereits bei der Basislinienberechnung festgestellt, dass die Genauigkeit der Koordinatenpaare nicht 100% homogen ist. Dieses Phänomen konnte aber nicht mit Gewissheit geklärt werden. Aufgrund der minimalen Unterschiede von maximal 2 mm konnte dieser Umstand vernachlässigt werden.

Die Höhengenaugigkeit (MFH) beträgt für alle Punkte 10.5 mm, ausser der beiden Punkten (K7 und FP1005), bei welchen Beobachtungen abgeschwächt wurden. Die mittlere Höhengenaugigkeit konnte bezüglich 2015 sogar um 2.7 mm verbessert werden.

Die erreichten Genauigkeiten sind in der Tabelle 14 aufgeführt und unterschreiten überall die a priori definierten Standardabweichungen ($\sigma_E = \sigma_N = 6 \text{ mm}$, $\sigma_H = 12 \text{ mm}$). Der sogenannte dreidimensionale Helmert'sche Punktfehler liegt bei etwa 12.5 mm.

Festpunkte					Kontrollpunkte				
Punkt	m_E [mm]	m_N [mm]	m_H [mm]	3D Helmert'scher Punktfehler	Punkt	m_E [mm]	m_N [mm]	m_H [mm]	3D Helmert'scher Punktfehler
FP1001	<i>Lagerungspunkt</i>								
FP1002	4.7	4.7	10.5	12.4	K7	5.1	5.1	11.4	13.5
FP1003	4.8	4.7	10.5	12.5	K11	4.7	4.7	10.5	12.4
FP1004	4.8	4.7	10.5	12.5	K12	4.7	4.7	10.5	12.4
FP1005	4.9	4.7	11.4	13.3	KP02	4.8	4.7	10.5	12.5
FP1006	4.8	4.7	10.5	12.5	KP03	4.7	4.7	10.5	12.4
FP1007	4.8	4.7	10.5	12.5	KP04	4.7	4.7	10.5	12.4
FP1009	4.8	4.7	10.5	12.5	KP05	4.7	4.7	10.5	12.4
FP1010	4.7	4.7	10.5	12.4	KP06	4.8	4.7	10.5	12.5
FP1012	4.7	4.7	10.5	12.4	KP13	4.8	4.7	10.5	12.5
FP1014	4.9	4.7	10.5	12.5	FP1013	4.8	4.7	10.5	12.5

Tabelle 14: Empirische Standardabweichungen 2017

Die durchschnittliche Zuverlässigkeitszahl ($z_\phi = f/n$) liegt im Netz bei 0.63. Die Redundanz im Netz ist somit gut.

Die lokalen Zuverlässigkeitszahlen (z_i) liegen im Bereich zwischen 0.57 und 0.63. Das heisst, dass die Beobachtungen im geodätischen Netz ziemlich gut kontrolliert sind. Bei abgeschwächten Beobachtungen treten höhere Werte auf, da sie besser durch die genaueren Beobachtungen (mit tieferen Werten) kontrolliert werden.

Der kleinste noch entdeckbare grobe Fehler (Nabla) liegt um 3.1 cm (Lage) bzw. 6.2 cm (Höhe) und zeugt von der inneren Zuverlässigkeit.

Die äussere Zuverlässigkeit beschreibt den Einfluss unentdeckter Grenzfehler (Nabla) auf die Neupunktkoordinaten der vermittelnden Ausgleichung. Zur Beurteilung der äusseren Zuverlässigkeit gilt die Faustregel: $NA \leq 3 * MFA$

Die grossen Seiten der Zuverlässigkeitsrechtecke (NA) sind bei allen Punkten kleiner als das Dreifache der MFA «a priori», die Faustregel wird somit eingehalten. Dasselbe gilt analog für die äussere Zuverlässigkeit in der Höhe.

6.4 Resultate

Resultat der GNSS-Messungen sind die Koordinaten 2017 der Fest- und Kontrollpunkte. Diese Koordinaten der Festpunkte bilden die Grundlage für die Auswertung der TLS- und UAV-Aufnahmen. Die Kontrollpunkte dienen der punktuellen Verschiebungsanalyse des Blockgletschers im Vergleich zu 2015 (vgl. Kapitel 9.1).

Definitive Koordinaten 2017

Die Koordinaten 2017 der Fest- und Kontrollpunkte sind in nachfolgender Tabelle 15 aufgelistet. Eine Übersicht der gemessenen Punkte ist im Kapitel 5.1.2 gegeben.

Festpunkte				Kontrollpunkte			
Punkt	E [m]	N [m]	H [m]	Punkt	E [m]	N [m]	H [m]
FP1001	2805913.685	1178735.829	2616.598	Lagerungspunkt (Koordinate aus 2010)			
FP1002	2805935.075	1178510.119	2656.067	K7	2806259.501	1178720.208	2613.125
FP1003	2805924.261	1178126.658	2757.939	K11	2806075.468	1178684.480	2616.720
FP1004	2806134.708	1178171.281	2715.968	K12	2806059.151	1178646.682	2622.004
FP1005	2806295.393	1178122.917	2763.685	KP02	2806165.011	1178408.845	2683.523
FP1006	2806517.873	1178561.557	2736.085	KP03	2806140.495	1178524.532	2666.552
FP1007	2806537.747	1178827.852	2763.994	KP04	2806157.439	1178628.611	2641.462
FP1009	2806325.973	1178851.083	2639.096	KP05	2806221.457	1178686.304	2631.576
FP1010	2806052.143	1178853.233	2661.277	KP06	2806293.447	1178587.353	2670.928
FP1012	2805841.315	1178768.609	2629.920	KP13	2806198.343	1178349.438	2698.662
FP1014	2806554.735	1178324.832	2774.202	FP1013	2806288.951	1178357.875	2708.274

Tabelle 15: Definitive Koordinaten 2017

Koordinatendifferenzen 2015-2017

Zur Analyse der Verschiebungen wurden die Koordinatendifferenzen zwischen der zweiten und der dritten Folgemessung in Veratop berechnet. Sie sind in Tabelle 16 ersichtlich.

Festpunkte										
Punkt	E 2015 / E 2017[m]	N 2015 / N 2017[m]	H2015 / H2017[m]	d _E [mm]	d _N [mm]	f _s [mm]	azi [gon]	d _H [mm]	signifikant in Lage	signifikant in Höhe
FP1001	2805913.685	1178735.829	2616.598	Lagerungspunkt						
	2805913.685	1178735.829	2616.598							
FP1002	2805935.043	1178510.129	2656.083	32	-10	34	118	-17	Ja	Nein
	2805935.075	1178510.119	2656.067							
FP1003	2805924.229	1178126.663	2757.954	33	-5	33	109	-15	Ja	Nein
	2805924.262	1178126.658	2757.939							
FP1004	2806134.690	1178171.267	2715.996	18	14	23	58	-28	Ja	Nein
	2806134.708	1178171.281	2715.968							
FP1005	2806295.359	1178122.879	2763.732	34	39	51	46	-47	Ja	Ja
	2806295.393	1178122.918	2763.685							
FP1006	2806519.288	1178561.357	2737.022	-1416	200	1430	309	-938	Ja	Ja
	2806517.873	1178561.557	2736.085							
FP1007	2806537.723	1178827.827	2763.996	24	25	35	49	-2	Ja	Nein
	2806537.747	1178827.852	2763.994							
FP1009	2806325.960	1178851.069	2639.085	13	14	19	47	12	Ja	Nein
	2806325.973	1178851.083	2639.096							
FP1010	2806052.137	1178853.215	2661.283	6	18	19	21	-5	Ja	Nein
	2806052.143	1178853.233	2661.277							

FP1012	2805841.284	1178768.615	2629.919	31	-6	32	113	0	Ja	Nein
	2805841.315	1178768.609	2629.920							
Kontrollpunkte										
Punkt	E2015 / E2017[m]	N2015 / N2017[m]	H2015 / H2017[m]	d _E [mm]	d _N [mm]	f _s [mm]	azi [gon]	d _H [mm]	signifikant in Lage	signifikant in Höhe
K7	2806259.469	1178720.183	2613.130	32	25	40	58	-5	Ja	Nein
	2806259.501	1178720.208	2613.125							
K11	2806075.520	1178684.326	2616.761	-52	154	162	379	-41	Ja	Ja
	2806075.468	1178684.480	2616.720							
K12	2806059.122	1178646.666	2622.016	29	16	33	69	-12	Ja	Nein
	2806059.151	1178646.682	2622.004							
KP02	2806165.308	1178408.498	2683.760	-297	347	457	355	-237	Ja	Ja
	2806165.011	1178408.845	2683.523							
KP03	2806141.092	1178523.458	2666.854	-597	1074	1228	368	-302	Ja	Ja
	2806140.495	1178524.532	2666.552							
KP04	2806157.551	1178627.834	2641.616	-112	777	785	391	-154	Ja	Ja
	2806157.439	1178628.611	2641.462							
KP05	2806221.569	1178685.569	2631.680	-112	735	744	390	-104	Ja	Ja
	2806221.457	1178686.304	2631.577							
KP06	2806293.524	1178587.139	2671.096	-77	214	227	378	-168	Ja	Ja
	2806293.447	1178587.353	2670.928							
KP13	2806198.380	1178349.319	2698.710	-37	119	125	381	-48	Ja	Ja
	2806198.343	1178349.438	2698.662							
FP1013	2806289.167	1178357.626	2708.441	-216	249	329	355	-168	Ja	Ja
	2806288.951	1178357.875	2708.274							

Tabelle 16: Koordinatendifferenzen 2015-2017

Als Grenzwerte für signifikante Verschiebungen (S = 95 %) gelten folgende:

$$\text{Lage: } \sqrt{\text{MFA}_{2015}^2 + \text{MFA}_{2017}^2} * 2.45 = \sqrt{5.7^2 + 4.8^2} * 2.45 = 18.3 \text{ mm}$$

$$\text{Höhe: } \sqrt{\text{MFH}_{2015}^2 + \text{MFH}_{2017}^2} * 1.95 = \sqrt{13.3^2 + 10.6^2} * 1.96 = 33.3 \text{ mm}$$

Alle Festpunkte weisen signifikante Verschiebungen in der Lage auf. Anscheinend ist das ganze Gebiet, welches den Blockgletscher umgibt, in Bewegung. Die Differenzen im Vergleich zu 2015 liegen im Bereich zwischen 19 cm und 51 cm, mit Ausnahme von Punkt FP1006, welcher sich um 143 cm verschoben hat. Kapitel 9.2 zeigt klar, dass sich die Geröllhalde, in welcher sich FP1006 befindet, stark bewegt.

Bezüglich der Höhe sind nur zwei Punkte signifikant gesunken, FP1005 und FP1006. Da sich FP1005 auf einem eher instabilen und lockeren Felsgrat befindet, sind die Differenzen von 5 cm bzw. 94 cm plausibel.

Auch alle Kontrollpunkte haben sich mit grossen Differenzen im Bereich von 11 cm bis 123 cm signifikant verschoben. Die kleinste Verschiebung von 3 cm wurde beim K12 gemessen.

Derselbe Punkt ist der einzige, bei welchem die Höhenverschiebung nicht signifikant ist. Alle anderen Kontrollpunkte haben sich um bis zu 30 cm (KP03) gesenkt.

6.5 Fazit

Die GNSS-Auswertung konnte reibungslos durchgeführt werden. Die resultierenden Koordinaten standen somit für die Georeferenzierung der TLS- und UAV-Daten zur Verfügung. Gegenüber der zweiten Folgemessung konnte die mittlere Genauigkeit mit 4.8 mm (Lage) und 10.6 mm (Höhe) verbessert werden. Von den Koordinatendifferenzen der Festpunkte waren in der Lage alle signifikant, während in der Höhe nur zwei Punkte sich signifikant gesenkt haben. Hingegen weisen die Kontrollpunkte teilweise grosse Verschiebungen (KP03 123 cm und 30 cm) auf.

Der Zeitaufwand für die Messung von drei Sessionen war aufgrund der schlechten Witterungsbedingungen unerwartet gross. Dafür konnten lange Wartezeiten überbrückt werden und die Resultate sind trotz allem zufriedenstellend.

7. Auswertung Scanner-Aufnahmen

Grundsätzlich wurde das gleiche Auswerteschema wie bei der zweiten Folgemessung angestrebt, um vergleichbare Resultate zu erhalten. In folgender Abbildung 15 ist dieses aufgeführt:

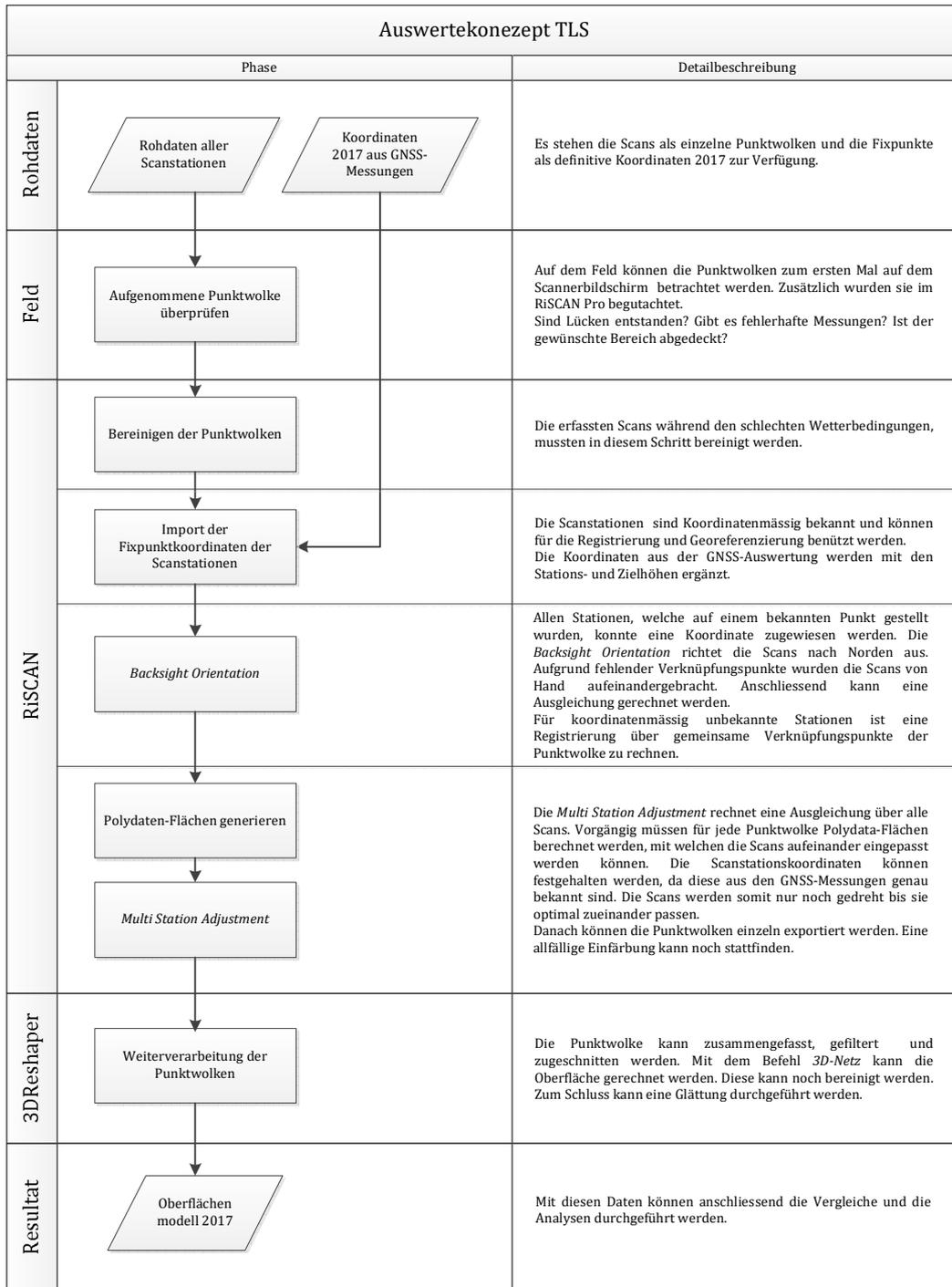


Abbildung 15: Auswertekonzept TLS angepasst aus Fehr, Reich (2015)

Aufnahmen mittels TLS haben grosse Datenmengen zur Folge. Gesamthaft sind etwa 20 Gigabyte (GB) an Daten erfasst worden. Es sind reine Punktwolken, die aus rastermässig verteilten Punkten bestehen. Um damit Analysen und Vergleiche ansetzen zu können, müssen diese weiterverarbeitet werden. Für die Registrierung der Punktwolken wurde die hauseigene Software von RIEGL, RiSCAN Pro (Version 2.5), verwendet. Mittels der Software 3DReshaper (Version

11.0.5.22755, Library Version 13.0.22755.0) von Hexagon konnte das 3D-Modell und die verschiedenen Analysen gemacht und ausgewertet werden. Freundlicherweise wurde die Software RiSCAN Pro von der ETH Zürich zur Verfügung gestellt.

7.1 Aufbereitung der Daten

Bevor die Messdaten in RiSCAN Pro importiert werden konnten, wurden sie im Felde auf dem Scanner betrachtet, um zu beurteilen, ob der Scanbereich vollständig erfasst wurde. Zusätzlich wurden sie für eine Begutachtung am Ende jedes Messtages ins RiSCAN Pro importiert.

Zu Beginn mussten drei Scans, welche bei schlechten Wetterbedingungen erfasst wurden, bereinigt werden. Die restlichen Aufnahmen waren in Ordnung. So konnten Daten von gesamthaft elf Stationen in RiSCAN Pro importiert werden.

7.2 Registrierung und Georeferenzierung

Backsight Orientation

Nach dem Import der Scandaten wurden zusätzlich die Fixpunktkoordinaten der Scanstationen eingelesen. Die importierten Höhen entsprechen direkt der Höhe des Messgerätes. So konnte eine *Backsight Orientation* als erster Berechnungsschritt durchgeführt werden. Damit konnte jeder Scanposition die mit GNSS bestimmte Koordinate zugewiesen und die Scans somit georeferenziert werden. Zudem wurden alle Scans nach Norden ausgerichtet, da auf dem Felde keine Verknüpfungspunkte gescannt wurden. Dazu mussten sie alle von Hand gedreht werden, bis sie etwa die gleiche Ausrichtung hatten. Aufgrund der vorgängigen Horizontierung auf dem Felde musste nur die eine Richtungskomponente angepasst werden. Für die Scanposition auf der freien Station 5002 wurden keine Koordinaten gemessen. Deshalb wurde die Registrierung über gemeinsame Verknüpfungspunkte von Hand durchgeführt.

Multi Station Adjustment

Nun waren alle Scans im Bereich von einem halben Meter co-registriert. Somit wurden für jede Punktwolke Polydaten-Flächen generiert. Mit Hilfe dieser konnte dann ein *Multi Station Adjustment* durchgeführt werden. Dabei werden die Differenzen zwischen den einzelnen Scans ausgeglichen und die Scans definitiv aufeinander eingepasst. Dort galt es zu beachten, dass die Scanpositionen als fixiert definiert werden. Die Wahl der Parameter war nicht trivial und musste durch einige Versuche getestet werden. Schliesslich stellten die Parameter in der Tabelle 17 nach vier Iterationen die besten Resultate dar (vgl. Abbildung 16). Die Verteilung der Residuen gleicht einer Normalverteilung und die Standardabweichung liegt bei 4.4 cm.

Parameter	Wert
Mode	All nearest points (recommended)
Search radius [m]	0.15
Max. tilt angle [°]	5
Max. plane patch observations	1'000'000
Min. change of error 1 [m]	0.1
Min. change of error 2 [m]	0.005
Outlier threshold [1]	2

Tabelle 17: Parameter Multi Station Adjustment

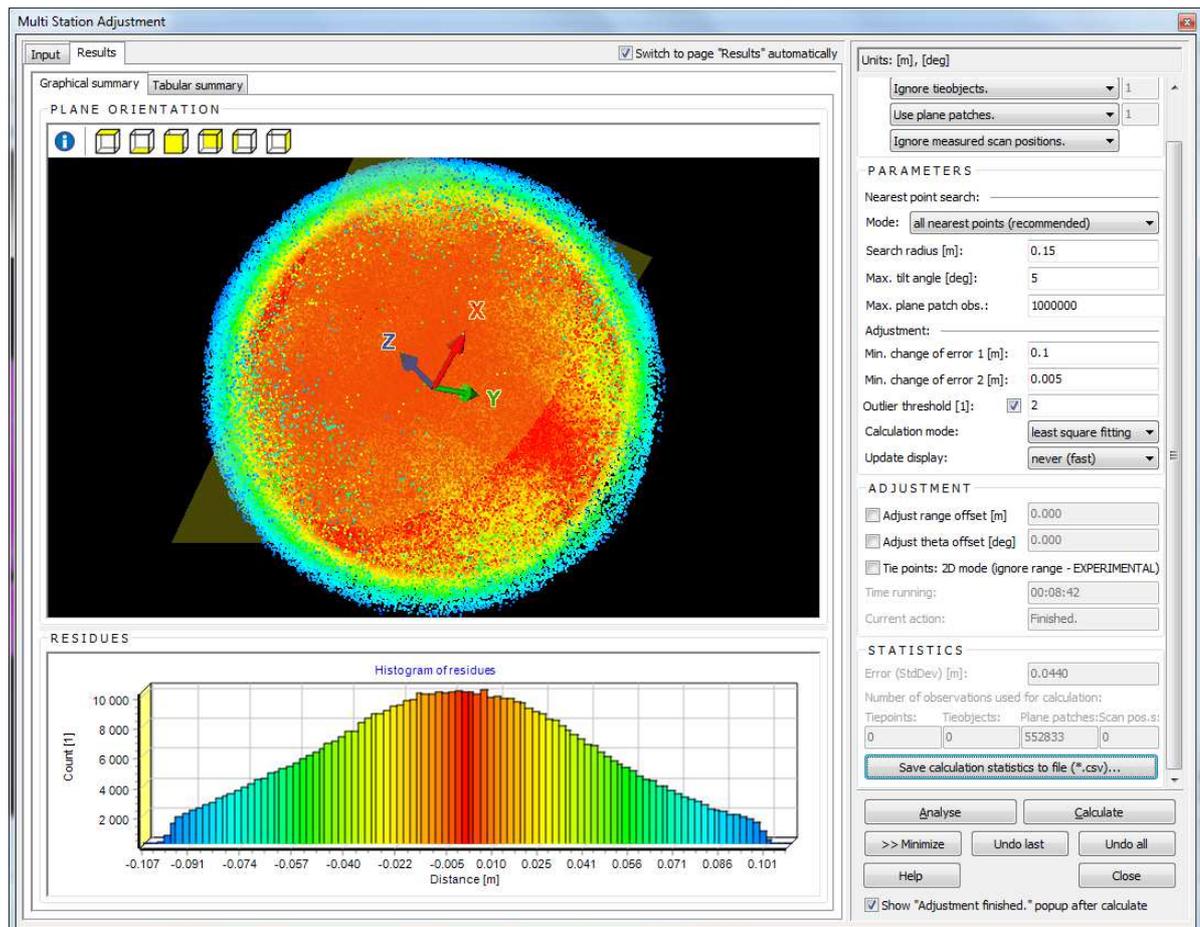


Abbildung 16: Resultate Multi Station Adjustment

Nach Begutachtung der Analyse wurden die Werte auf die Scans angewendet. Nun wurden die Punktwolken noch mit den Fotos eingefärbt. Danach konnten sie exportiert werden. Die weitere Verarbeitung fand in der Software 3DReshaper statt.

Aufgrund der vorgängigen Lagerung auf die Näherungskordinate der Session 1 aus den GNSS-Messungen 2017 anstatt auf die Koordinate aus dem Jahre 2010 mussten die Punktwolken nach dem Export zuerst noch mit einem Shift (dy: -10.8 cm, dx: -2.1 cm, dh: 25.9 cm) versehen werden. Die RiSCAN-Berechnungen wurden nicht mit den korrigierten Fixpunktkoordinaten durchgeführt. Folglich sind dort noch die falschen Koordinaten abgespeichert.

7.3 Berechnung des Oberflächenmodells

Die Punktwolken wurden als erstes auf den gleichen Bereich des Blockgletschers wie bei der Folgemessung zwei zugeschnitten. Danach bestand die komplette Punktwolke noch aus rund 350 Millionen Punkten. Da eine Weiterverarbeitung mit einer derart grossen Datenmenge unmöglich war, wurde die Punktwolke auf eine maximale Anzahl von 50 Mio. Punkten reduziert. Mit dieser Punktwolke wurde ein grösstenteils wasserdichtes Oberflächenmodell generiert. Damit eine Weiterverarbeitung möglich war, wurde das Netz in zwei Schritten um 25 und 20 % reduziert. In einem nächsten Schritt musste das Oberflächenmodell von Hand bereinigt werden. Da das Netz etwa 8000 Löcher beinhaltete, mussten diese aufgefüllt werden. Mit dem 3DReshaper-Algorithmus war das unmöglich. Die Oberfläche wurde komplett verfälscht. Daher wurde entschieden nur die groben Löcher von Hand aufzufüllen. Dafür war jedoch eine weitere Reduzierung um 50 % nötig. Die Bereiche ohne Scandaten wurden ebenfalls aufgefüllt. So kön-

nen bei späteren Messungen allfällige Senkungen der Löcher besser festgestellt werden. Zum Abschluss wurde das Mesh noch mit einer Stärke von zwei geglättet. Schlussendlich bestand das Oberflächenmodell noch aus rund 1.2 Mio. Punkten und 2.4 Mio. Dreiecken.

Für einen genaueren Vergleich zwischen den Profilen wurde mit einem Teil der bereits ausgedünnten TLS-Punktswolke der Fussbereich separat modelliert. Dabei kamen etwas mehr Details zum Vorschein. Die Oberfläche war dennoch mit vielen Löchern durchzogen und es gab auch zahlreiche fehlerhafte Vermaschungen. Es wurden nur die grössten Fehler manuell behoben.

3D-Druck

Mit zusätzlichen Rundumscans konnte ein 3D-Oberflächenmodell der gesamten Seenplatte generiert werden. Zuerst wurde das Modell in 3DReshaper ausgedünnt und vereinfacht. Nachdem es mit der Software *3ds Max* weiterverarbeitet worden war, wurde es in der Druckersoftware *Makerbot Desktop* aufbereitet und stand danach als 3D-Modell für den Druck bereit. Es wurde je ein Modell mit einer mittleren Dimension von rund 20 x 20 cm auf zwei unterschiedlichen 3D-Druckern der Marke *Makerbot Replicator* ausgedruckt (vgl. Abbildung 17).



Abbildung 17: gedrucktes 3D-Modell der Seenplatte Macun

7.4 Fazit

Die Auswertung der TLS-Aufnahmen konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die Einarbeitung in das RiSCAN Pro war jedoch nicht ganz trivial. Zudem brachte die Verarbeitung der grossen Datenmengen die Hardware oft an ihre Grenzen.

Das Weglassen des Scannens von Targets auf dem Feld hatte zur Folge, dass die Feldarbeiten deutlich beschleunigt werden konnten und weniger Material mitgeschleppt werden musste. Für ein anderes Mal wäre es von Vorteil, wenn der Scanner immer nach Norden oder zumindest immer in die gleiche Richtung ausgerichtet werden würde. So müssten nicht alle Scans manuell orientiert werden.

Die Scans, welche bei schlechten Wetterbedingungen mit Nebel und teilweise Schneefall getätigt wurden, beinhalteten falsche Punkte. Rund um die Station entstand eine Punktswolke aus Schneeflocken (vgl. Abbildung 18 links). Ebenfalls bildeten sich in grosser Entfernung Bereiche mit kleinen länglichen Punktswolken, welche in der Luft schwebten. Wegen des Nebels streuten die Messungen an der Bergflanke in einem ringförmigen Bereich (vgl. Abbildung 18 rechts).

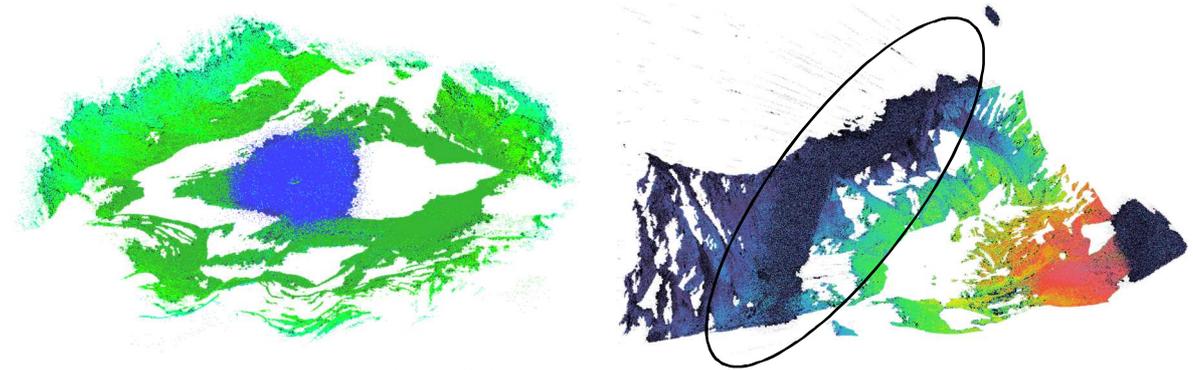


Abbildung 18: Scanprobleme wegen Schneefall (blau) und Nebel (schwarz eingekreist)

Nach dem Zusammenlegen aller Scans entstand eine extrem dichte Punktwolke mit rund einer halben Milliarde Punkten. Dies wirkte sich ungünstig auf die Rechen- und Bearbeitungszeit während der Weiterverarbeitung aus, obwohl 32 GB Arbeitsspeicher zur Verfügung standen. Jegliche Berechnungsprozesse nahmen zum Teil mehrere Stunden in Anspruch. Deshalb wurde eine Filterung der Wolke und zusätzlich des Netzes durchgeführt, was Datenverlust zur Folge hat. Dafür war die Weiterverarbeitung einfacher.

Die komplexe Struktur des Blockgletschers mit den Steinen an der Oberfläche konnte an den meisten Stellen unmöglich modelliert werden. Das resultierende Oberflächenmodell ist eine starke Vereinfachung der Realität. Bei Vertiefungen entstanden Löcher aufgrund fehlender Scandaten.

8. Auswertung Drohnen-Aufnahmen

Folgendes Auswertekonzept (vgl. Abbildung 19) von Fehr, Reich (2015) wurde für die Auswertung übernommen und wo nötig angepasst.

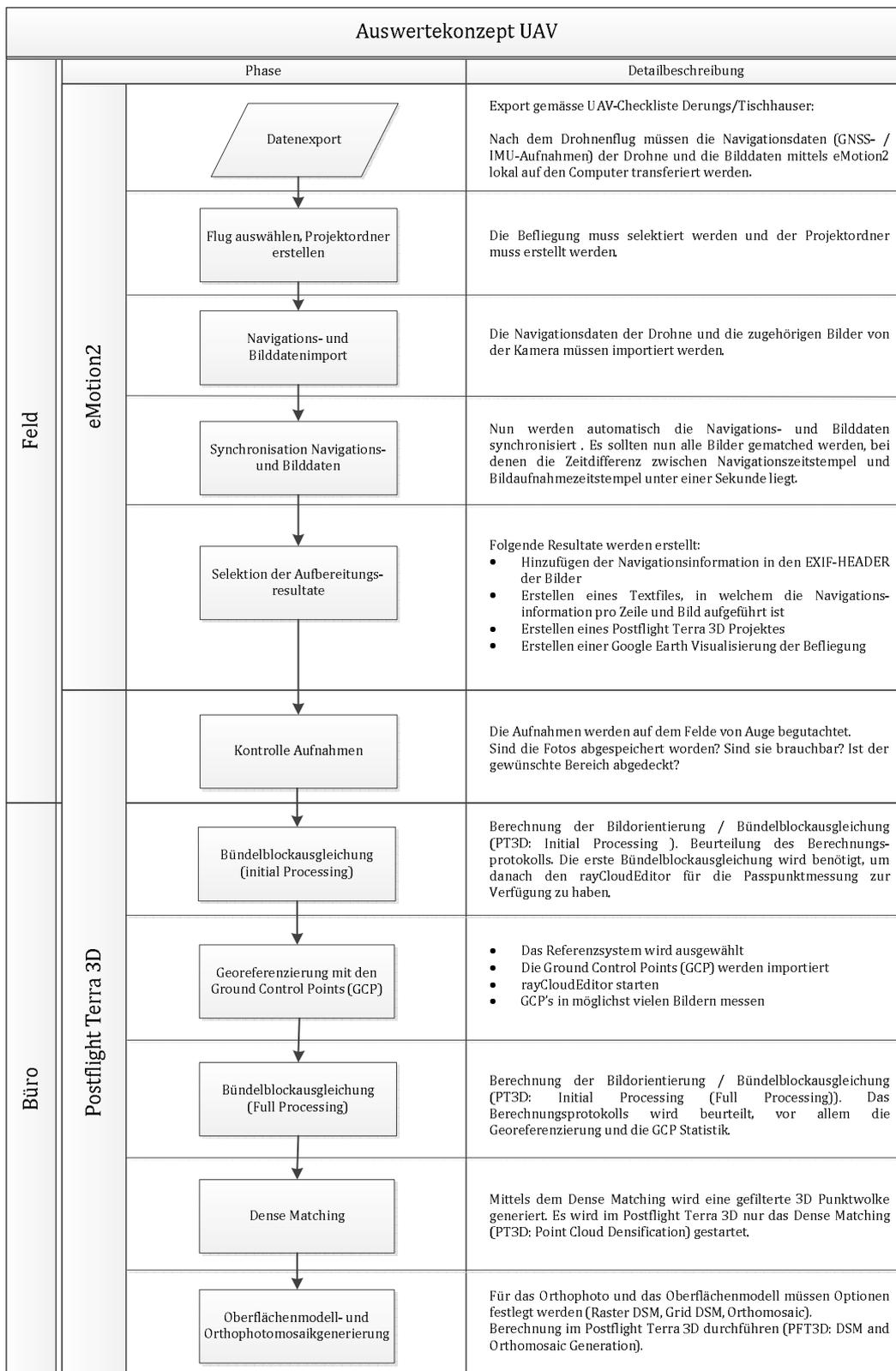


Abbildung 19: Auswertekonzept UAV angepasst aus Fehr, Reich (2015)

Als Resultat der eBee-Befliegungen gingen Bilder mit Geotags, die Navigationsdaten der Drohne sowie Pix4D-Dateien für den direkten Import in das Programm Postflight Terra 3D hervor. Mit den zwei Teilflügen wurden gesamthaft 218 Bilder aufgezeichnet. Beim Export wurde ein Matching von 99 % erreicht (vgl. Abbildung 19, Synchronisation Navigations- und Bilddaten). Lediglich zwei Fotos konnten nicht gematched werden, womit total 216 Bilder für die Auswertung zur Verfügung standen. Der gesamte Export fand unmittelbar nach der Befliegung auf dem Felde mit der Software eMotion2 statt.

8.1 Prozessierung der Daten

Die Software Postflight Terra 3D von senseFly wurde für die Bildverarbeitung und Bildorientierung verwendet. Damit konnte ein Oberflächenmodell (DSM) und ein Orthophotomosaik erstellt werden.

Bündelblockausgleichung

Die zwei Datensätze der Teilflüge wurden vorgängig in ein Projekt zusammengeführt. Dann konnte als erster Schritt das *Initial Processing* mit einer Bündelblockausgleichung durchgeführt werden. Dort wurden Keypoints gerechnet, Bildpaare gematched, Bildpositionen berechnet und Kameraparameter geschätzt. Es wurden die Standardeinstellungen für die Berechnungen übernommen.

Passpunktmessung

Als nächster Schritt konnten die Passpunktkoordinaten, welche aus den GNSS-Aufnahmen hervorgegangen sind, ins Postflight Terra 3D importiert werden. Ihnen wurde eine Genauigkeit von 2 cm in der Lage und 3 cm in der Höhe zugewiesen. Nach der Bündelblockausgleichung stand der rayCloudEditor zur Verfügung, womit die Passpunktmessungen in den Bildern durchgeführt werden konnten. Als Bezugssystem wurde CH1903+ und als Bezugsrahmen LV95/LHN95 gewählt. Es waren nicht alle zwölf Passpunkte in genügend Bildern sichtbar. Der FP1003 konnte für die Georeferenzierung nicht verwendet werden. Die restlichen elf Passpunkte waren in mindestens vier Bildern gut sichtbar. Durchschnittlich wurden die Passpunkte in acht Bildern gemessen.

Definitive Bündelblockausgleichung

Nachdem die Passpunktmessungen abgeschlossen waren, wurde die definitive Bündelblockausgleichung mit dem Befehl *rematch and optimize* durchgeführt. Die Genauigkeit der Georeferenzierung liegt bei 2.2 cm, wie im Report sichtbar ist. Der gesamte Report ist im *Anhang A13 Quality Report Postflight Terra 3D* zu finden. Schlussendlich konnte eine durchschnittliche Bodenaufklärung von 8.15 cm erreicht werden, dies bei einem abgedeckten Bereich von 125 ha. Die mittlere Genauigkeit der Passpunkte wurde wie folgt ausgegeben:

- Standardabweichung X: 1.3 cm
- Standardabweichung Y: 2.1 cm
- Standardabweichung Z: 3.5 cm

Ergebnisse

Mittels *Dense Matching* wurden eine Punktwolke sowie ein vereinfachtes 3D-Oberflächenmodell generiert, dieses war jedoch nicht georeferenziert. Deshalb wurde die Punktwolke im 3DReshaper zu einem Oberflächenmodell weiterverarbeitet.

Die generierte Punktwolke wurde zudem zusammen mit den Bilddaten für die Erstellung eines texturierten digitalen Oberflächenmodells und eines Orthophotos (vgl. Abbildung 20) verwendet.

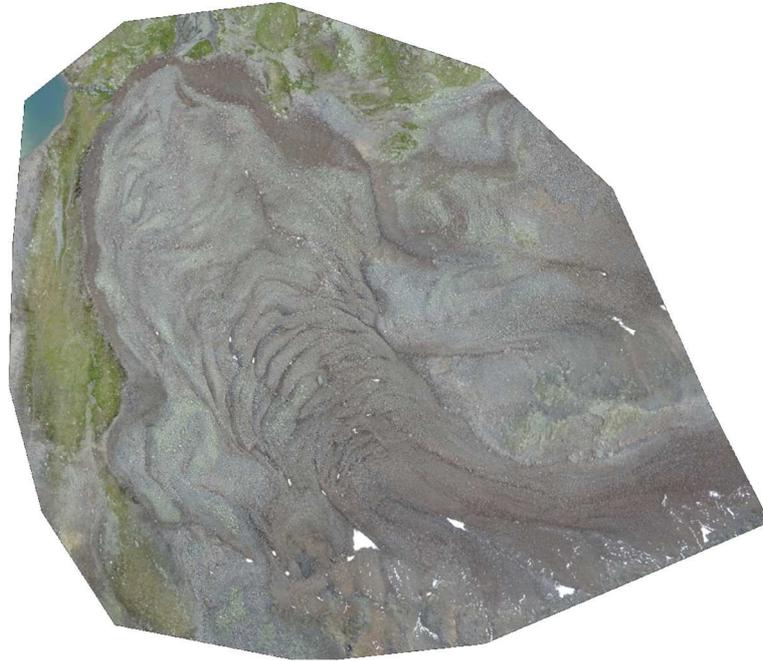


Abbildung 20: Orthophotomosaik des Blockgletschers Macun

8.2 Modellierung in 3DReshaper

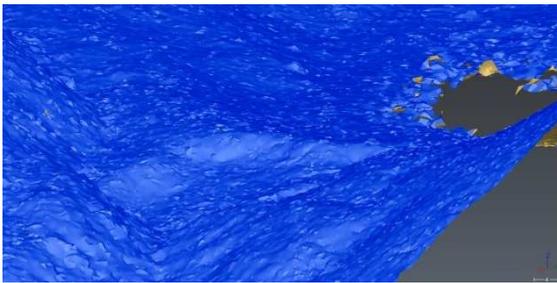
Da das Oberflächenmodell aus Postflight Terra 3D nicht georeferenziert war und nur einem vereinfachten Modell entsprach, wurde die Berechnung einer detaillierten Oberfläche, wie bei den TLS-Aufnahmen, mit 3DReshaper durchgeführt. Die Punktwolke bestand aus 19 Mio. Punkten, wobei alle importiert und anschliessend auf das Mesh 2015 zugeschnitten wurden. Nach der Berechnung eines grobmaschigen 3D-Modells wurde es mit Punkten aus der Punktwolke verfeinert und mit zusätzlichen interpolierten Punkten ergänzt. Dabei kam eine detaillierte Oberfläche heraus. Um die Löcher zu füllen musste das Mesh vorgängig reduziert werden. Dadurch entstanden im fertigen Modell sichtbare Dreiecksvermaschungen, welche mit einer geringen Glättung etwas ausgebessert werden konnten.

Folgend ist der Auswerteprozess aufgeführt und mit Bildern/Bilder zu Schwierigkeiten und Problematiken zusätzlich illustriert.

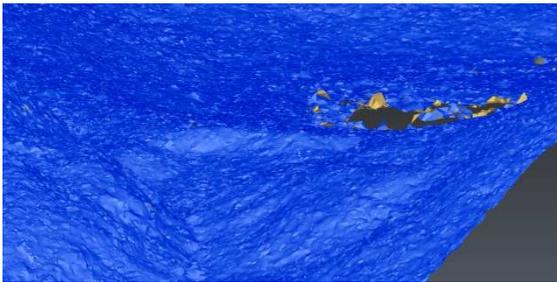
1. Eingefärbte Punktwolke



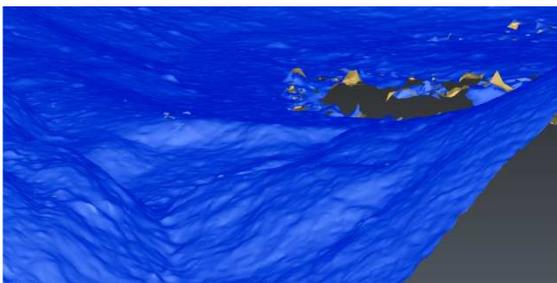
2. Grobe Vermaschung



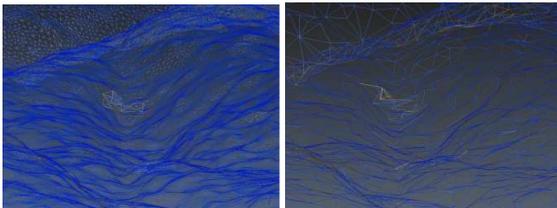
3. Verfeinerte Vermaschung mit Punktwolke



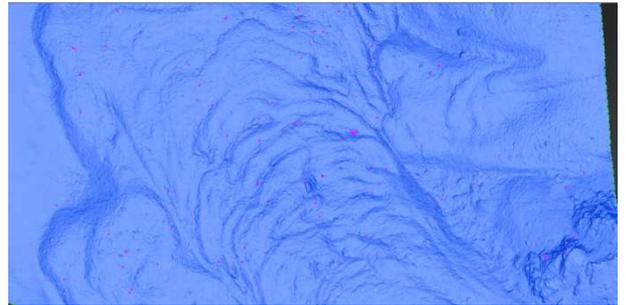
4. Vermaschung mit interpolierten Punkten



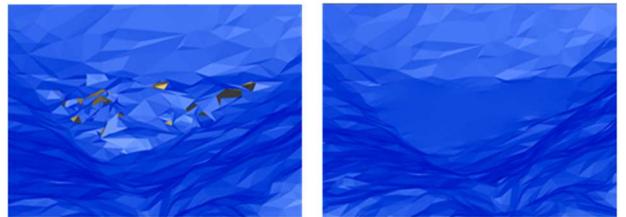
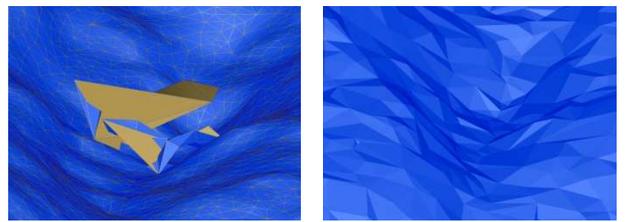
5. Netz reduzieren



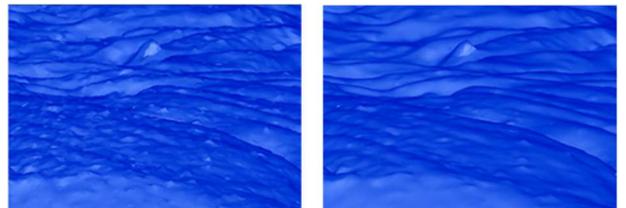
6. Löcher füllen



7 Vermaschung bereinigen (Artefakte, Messrauschen im Schnee)



8 Glättung (vorher - nachher)



9 Texturierung mit Orthophoto



8.3 Fazit

Mit den erfassten UAV-Aufnahmen konnte die Auswertung problemlos bewerkstelligt werden. Die Passpunktmessung war jedoch aufgrund der zum Teil verwackelten Fotos schwierig (vgl. Abbildung 21). Ebenfalls war die Unterscheidung zwischen Tafel und Schnee nicht immer ganz einfach. Deshalb war es wichtig, dass die Passpunktmarkierungen auf möglichst vielen Fotos erfasst waren. Bei einzelnen Passpunkten war das nicht der Fall. Der Aufnahmebereich bei der Flugplanung hätte dafür grösser gewählt werden sollen. Die provisorische Berechnung der Passpunkte in den Bildern durch die Software hat vieles vereinfacht. Schlussendlich konnte mit elf Passpunkten eine gute Genauigkeit für die Georeferenzierung erreicht werden.

Vielleicht wäre eine permanente Signalisation der Passpunkte mit einem gelben Kreuz für zukünftige Aufnahmen von Vorteil. Zum einen würde der Arbeitsschritt mit dem Anbringen der Passpunkttafeln wegfallen und zu anderen wären die Kreuze besser von Schneeflecken unterscheidbar.

Schade war, dass kein georeferenziertes 3D-Oberflächenmodell generiert wurde und wegen des zu sehr vereinfachten Modells eine zusätzliche Weiterverarbeitung nötig war. Dort konnte jedoch mit einigen Einstellungen ein ansprechendes Modell generiert werden.

Die erreichte Bodenauflösung von 8.2 cm ist leicht über den gewünschten und geplanten Wert von 6 cm. Dies könnte allenfalls daran liegen, dass die Aufnahmen viele verwackelte Fotos beinhalteten. Für die Aufnahmen sind möglichst ruhige Windverhältnisse zwingend. Falls möglich sollten mehrere Teilflüge mit geringerer Flughöhe durchgeführt werden. Dies setzt jedoch stabiles Wetter voraus. Vermutlich können durch eine tiefer angesetzte Bodenauflösung bei der Flugplanung bessere Resultate erzielt werden.

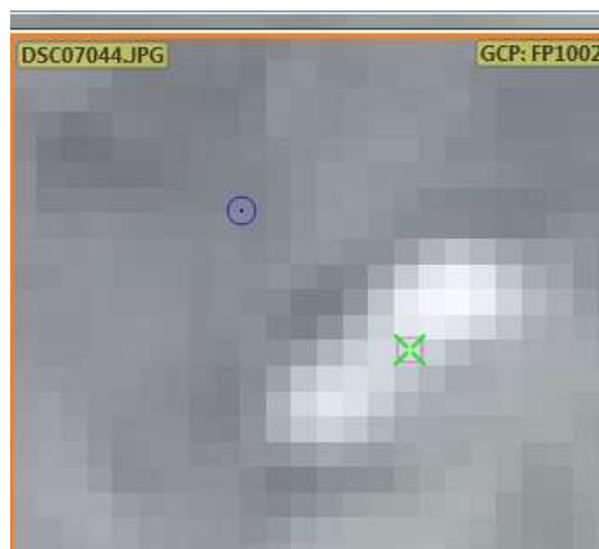


Abbildung 21: Bild mit verwackelter Signalisationstafel

9. Vergleich mit zweiter Folgemessung

Es wurden verschiedene Verschiebungs- und Bewegungsanalysen durchgeführt, um die dritte Folgemessung mit der zweiten zu vergleichen.

9.1 Verschiebungsvektoren der Fix- und Kontrollpunkte

Anhand der GNSS-Messungen konnten Verschiebungsvektoren bezüglich 2015 berechnet werden. Diese wurden im nachfolgendem Plan (vgl. Abbildung 22) mit grün für die Lage und blau für die Höhe im Massstab 1:100 eingetragen. Es wird sichtbar, dass sich die Punkte an der Front am meisten, die im oberen Bereich weniger stark und die am Rand des Blockgletschers kaum bewegt haben. Die grösste Verschiebung wurde beim FP1006 auf der östlich gelegenen Geröllhalde festgestellt.

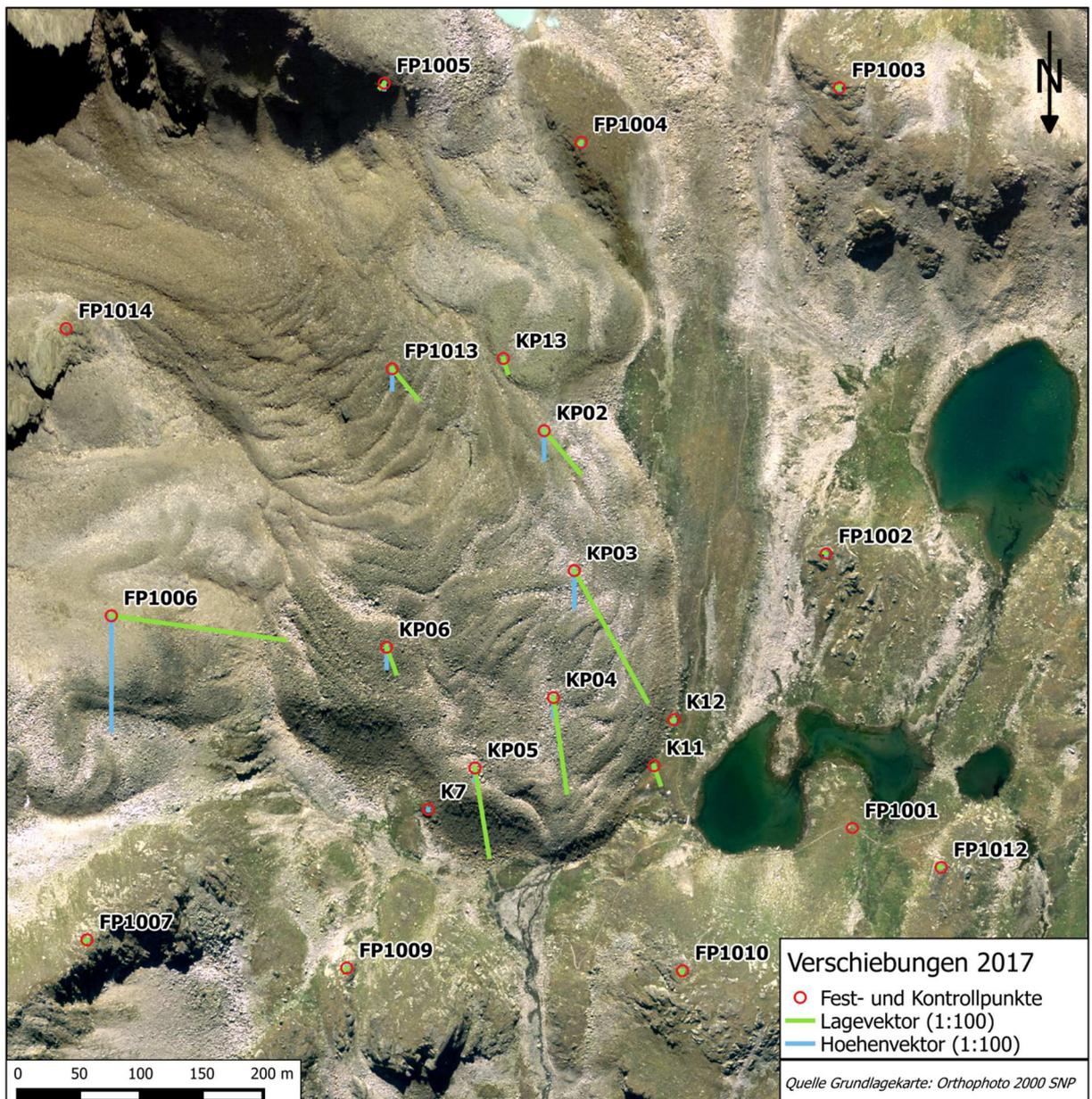


Abbildung 22: Plan mit Verschiebungsvektoren der Fest- und Kontrollpunkte

9.2 3D-Oberflächenmodelle

9.2.1 TLS

Die Abbildung 23 stellt den dreidimensionalen Vergleich, der mittels TLS generierten Oberflächenmodelle dar. Verschiebungen in positiver Richtung sind rot dargestellt, blaue Flächen haben sich in negativer Richtung der Koordinaten verschoben. Wie schon im Jahre 2015 sind die Verschiebungen bei der östlich gelegenen Geröllhalde auffällig. Darin wurden erhebliche Verschiebungen von bis zu 1.5 m in der Lage und -1.5 m in der Höhe gemessen. Auch im Wurzelbereich sind Senkungen von bis zu 1.5 m sichtbar. Die roten Gebiete an den Flanken und im Fussbereich deuten auf eine Ausweitung und ein Vorwärtskriechen hangabwärts. Die Mulde mitten im Ausschnitt an der östlichen Seite des Blockgletschers ist keine Veränderung, sondern nur Folge des Auffüllens eines Loches beim Oberflächenmodell 2017. Mit der Ansicht der Vogelperspektive wird das Vorwärtskriechen der Vertiefungen und Rücken sichtbar. Über das gesamte Gebiet des Blockgletschers zeigt sich, dass etwa 73 % aller Veränderungen innerhalb von ± 0.2 m liegen.

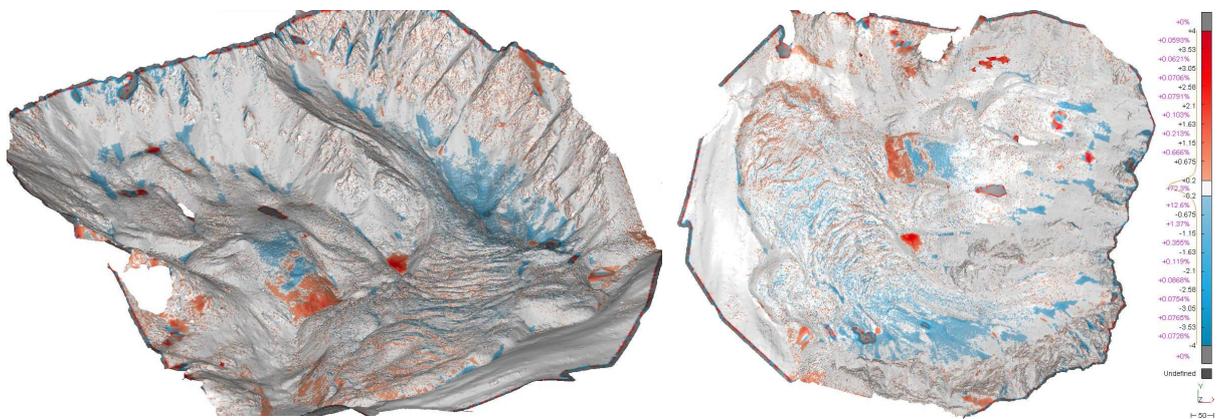


Abbildung 23: 3D-Vergleich der Oberflächenmodelle aus TLS-

9.2.2 UAV

Die Abbildung 24 stellt den dreidimensionalen Vergleich, der mittels UAV generierten Oberflächenmodelle dar. Die Verschiebungen sind gleich eingefärbt wie im vorangehenden Kapitel und können somit direkt miteinander verglichen werden.

Die Verschiebungen können hier gleich gut festgestellt werden. Zudem sind sie in der gleichen Grössenordnung wie beim TLS-Oberflächenmodell. Ein Vorteil ist, dass keine Verfälschungen durch Füllungen oder Löcher entstehen.

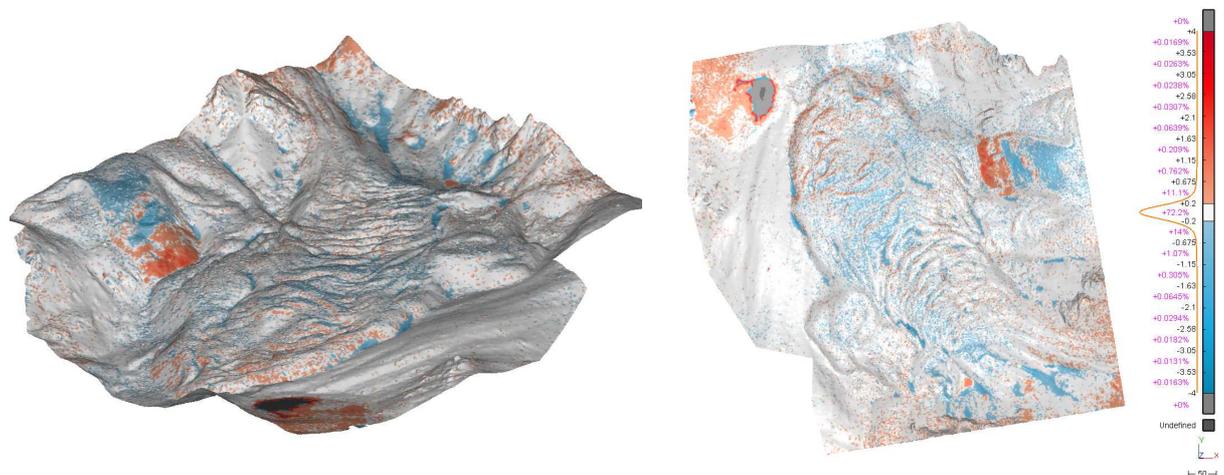


Abbildung 24 :3D-Vergleich der Oberflächenmodelle aus UAV-Daten

9.2.3 3D-Vergleich TLS und UAV 2017

Werden die zwei Oberflächenmodelle der TLS- und UAV-Daten 2017 (vgl. Abbildung 23: und Abbildung 24) verglichen, können folgende Unterschiede festgestellt werden:

- *Anzahl Löcher:* Das Oberflächenmodell der TLS-Daten beinhaltet Löcher, die nicht gefüllt werden konnten. Dies bereitet bei der Weiterverarbeitung Probleme (vgl. Kapitel 9.3.2). Das mit den UAV-Daten generierte Oberflächenmodell ist lückenlos.
- *Datenlücken:* Bei den TLS-Aufnahmen konnten nicht alle Vertiefungen erfasst werden. Sie können aufgefüllt oder auch offengelassen werden. Mittels UAV aus der Luft trifft diese Problematik nicht auf.
- *Punkt- und Dreiecksdichte:* Diese ist beim TLS-Modell viel höher. Entgegen den Erwartungen folgte daraus keine höhere Detailtreue.
- *Bodenauflösung:* Das TLS-Modell hat eine grössere Bodenauflösung. Bei der Weiterverarbeitung zu einem Modell geht diese jedoch verloren.
- *Grösse des Ausschnitts:* Das TLS-Modell deckt ein grösseres Gebiet ab. Bei den UAV-Aufnahmen gibt es Einschränkungen wegen diversen Gegebenheiten für die Ausführung eines Fluges.

Grundsätzlich führen die Vergleiche mit der Folgemessung zwei zu vergleichbaren Resultaten. Aus der Ferne betrachtet, haben sie ebenfalls starke Ähnlichkeiten.

9.2.4 Fokus auf den Wurzel- und Fussbereich des Blockgletschers

Der Vergleich der beiden Bereiche mittels den TLS-Modellen in Abbildung 25 zeigt deutlich, dass sich die Wurzel des Blockgletschers in den letzten zwei Jahren über einen Meter abgesenkt hat, während sich der Gletscherfuss um bis zu einem halben Meter nach vorne geschoben hat. Der gesamte Hang oberhalb der Blockgletscherwurzel weist negative Veränderungen auf. Das Material hat sich hangabwärts oder durch Einsenken aufgrund von Abnahme des Permafrosts in Richtung des Erdbodens verlagert. Weiterführende Untersuchungen folgen in Kapitel 9.3.

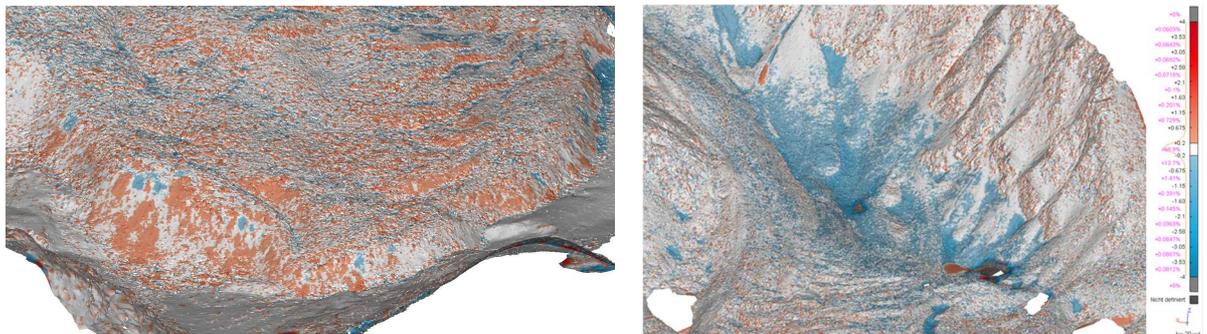


Abbildung 25: 3D-Vergleich aus den TLS-Daten im Fussbereich (links) und im Wurzelbereich (rechts)

9.3 Profile

Bewährt hat sich die Möglichkeit, zwei oder mehrere Oberflächenmodelle mit Profilen zu vergleichen. Hierzu wurden die Polylinien aus 2012 beigezogen und auf die neuen Oberflächenmodelle projiziert. Da die Profile aus 2015 aufgrund eines unbrauchbaren Dateityps (Textdatei) nicht in 3DReshaper importiert werden konnten, mussten sie ebenfalls neu abgetragen werden. Somit konnten die drei Zeitstände einander gegenübergestellt werden. Für den direkten Vergleich konnten jedoch nur zwei Profile ausgewählt werden.

Die Profile aus den Daten 2017 wurden wie bis anhin mit Colorbrewer 2.0 eingefärbt (vgl. Kapitel 1, Darstellungstechnische Hinweise). Die Vorzeichen der Werte stimmen mit den Farbwerten

der 3D-Vergleiche überein. Dessen Skala zeigt Werte von +2 (rot) bis -2 (blau), wobei rote Profile einer Absenkung und blaue Profile einer Erhebung gegenüber 2015 entsprechen. Profile aus der zweiten Folgemessung sind als schwarze Linien eingezeichnet.

9.3.1 Fussbereich

Die Profile wurden in drei Sektionen eingeteilt. Auf jeder Seite des Blockgletschers eine sowie eine dritte an der Front des Gletscherfusses. An den Seiten wählten Arpagaus, Joss (2012) einen Abstand von 10 bis 12 m, im Zentrum etwa 3 m.

TLS

Abbildung 26 gibt eine Übersicht über die TLS-Profile im Fussbereich. Von den daraus berechneten Differenzen sind im östlichen Bereich des Gletscherfusses 37 % positiv und 63 % negativ. Im frontalen nördlichen Bereich sind 72 % der Werte negativ und im westlichen Bereich sogar 81 %. Dies deutet auf eine Absenkung gegenüber 2015 hin.

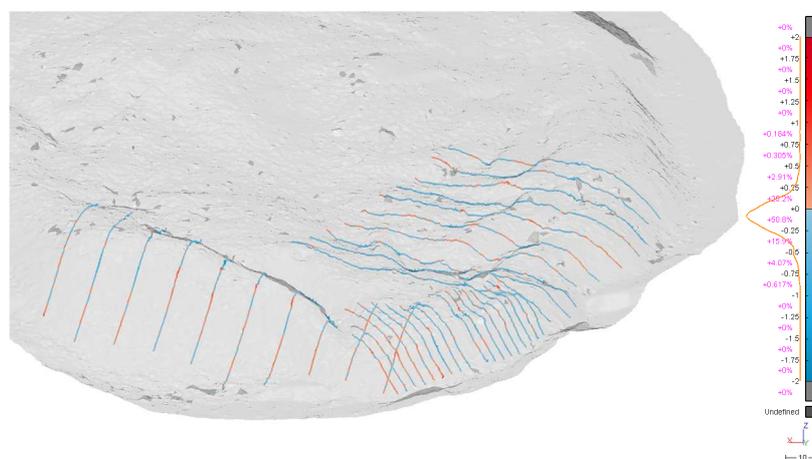


Abbildung 26: Übersicht der TLS-Profile im Fussbereich

Detailansichten des frontalen nördlichen und westlichen Fussbereichs sind in Abbildung 27 dargestellt. Es gibt Zonen, wo sich der Blockgletscher gegenüber 2015 gesenkt hat und Zonen in denen die Profile durch die Fliessbewegung Erhebungen aufzeichnen.

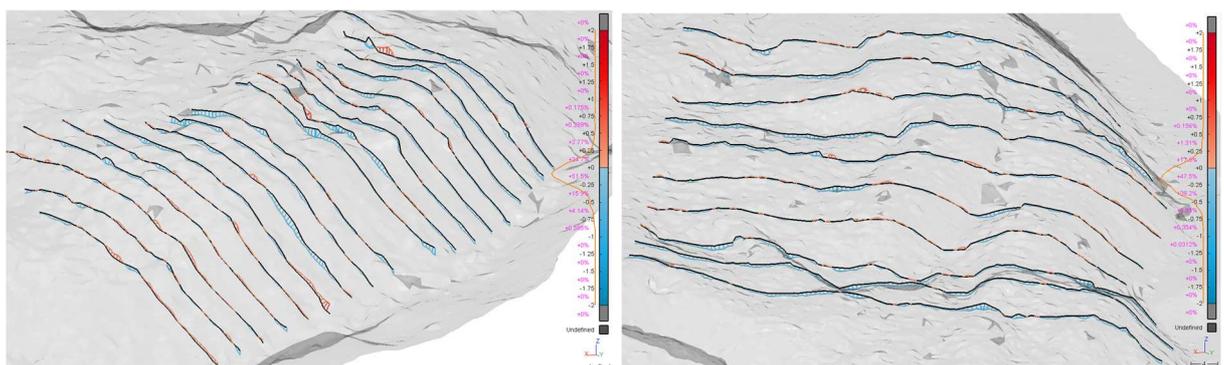


Abbildung 27: TLS-Profile frontaler nördlicher Fussbereich (links) und westlicher Fussbereich (rechts)

In der folgenden Abbildung 28 wurden die TLS-Profile der drei bisherigen Folgemessungen (2012-2017) einander gegenübergestellt. Die Verschiebung des Blocks in der Bildmitte ist eindeutig erkennbar. Sie beträgt seit 2012 über 1.8 m bzw. seit 2015 rund 1.1 m.

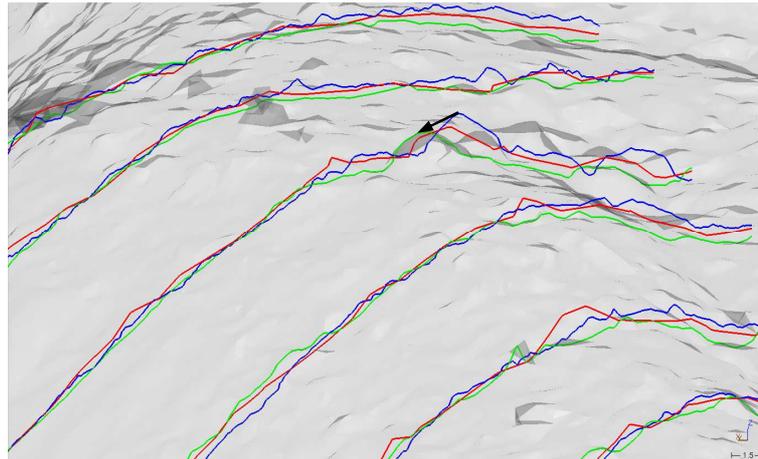


Abbildung 28: TLS-Profil 2017 (grün), 2015 (rot) und 2012 (blau) im östlichen Fussbereich

UAV

Eine Übersicht der Profile aus den UAV-Daten 2017 ist durch Abbildung 29 gegeben. Von den neuen UAV-Profilen liegen zwischen 38 und 47 % der Werte im negativen Bereich. Im Gegensatz zu den TLS-Profilen zeigen sich hier eher Aufschüttungen.

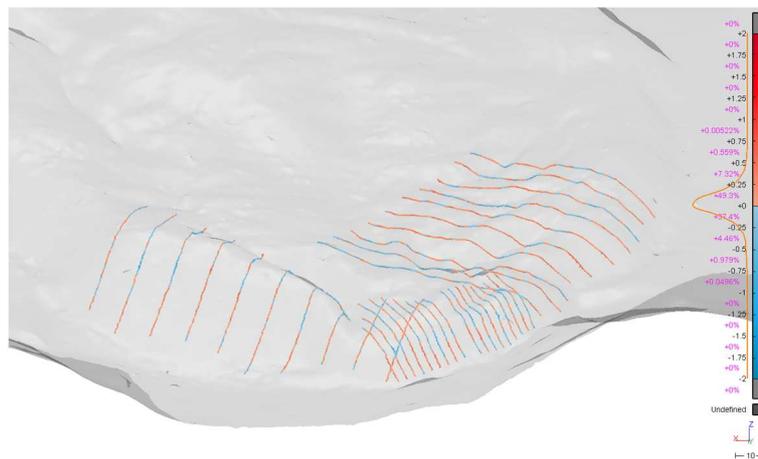


Abbildung 29: Übersicht der UAV-Profile im Fussbereich

Von dem frontalen nördlichen sowie östlichen Fussbereich sind wiederum Detailansichten in Abbildung 30 dargestellt. Auch hier sind Zonen erkennbar, wo sich der Blockgletscher gegenüber 2015 gesenkt hat und Zonen in denen die Profile Erhebungen aufzeichnen.

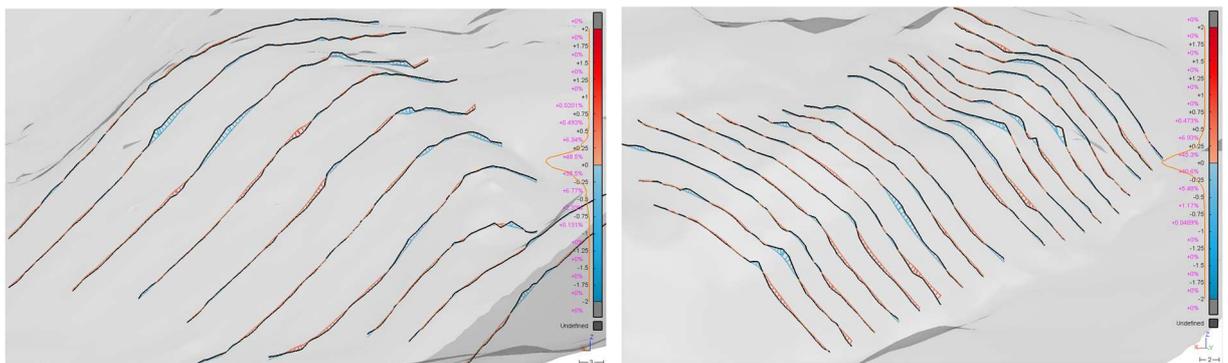


Abbildung 30: UAV-Profile östlicher Fussberiech (links) und frontaler nördlicher Fussbereich (rechts)

9.3.2 Wurzelbereich

Für den oberen Gletscherbereich wurden neue Profile für die Oberflächenmodelle aus 2015 und 2017 konstruiert. Sie bilden die vierte Sektion und das Intervall zwischen den Profilen beträgt 12 m.

TLS

Aus unerklärlichen Gründen konnten leider keine Polylinien auf das TLS-Modell projiziert werden. Somit fällt dieser Vergleich weg.

UAV

Über die gesamte Wurzelzone wurde eine Verteilung von 45 % positiven und 55 % negativen Werten berechnet. Es kann im Allgemeinen von einer Absenkung gesprochen werden. Oft wechseln jedoch die Profile von 2017 mit den Profilen 2015 das Vorzeichen. Abbildung 31 gibt eine Übersicht über die UAV-Profile im Wurzelbereich.

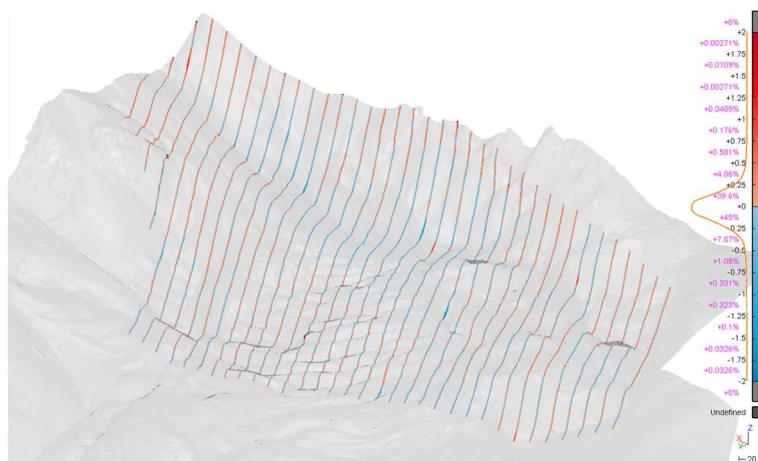


Abbildung 31: Übersicht der UAV-Profile im Wurzelbereich

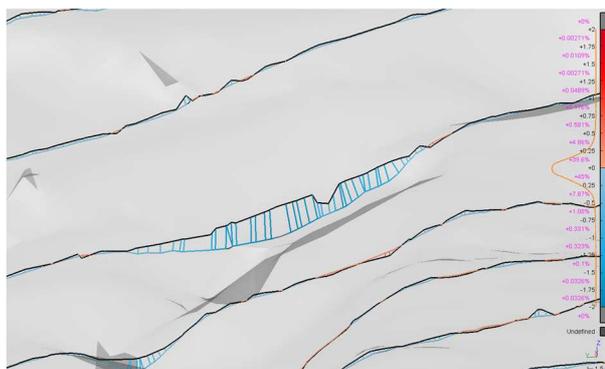


Abbildung 32: Vertiefung eines UAV-Profiles im unteren Wurzelbereich

Stellenweise gibt es starke Absenkungen, wie die in Abbildung 32 sichtbare Vertiefung im unteren Bereich der Gletscherwurzel. Das Profil, welches durch sie verläuft ist etwa 20 m lang und das Blockmaterial liegt dort bis zu 2 m tiefer als vor zwei Jahren. Die ganze Vertiefung ist auch im 3D-Vergleich gut erkennbar.

Im oberen Wurzelbereich sind flächendeckende Absenkungen aufgetreten. Beispielsweise wo die Profile horizontal verlaufen (Abbildung 33, links) liegen sie zwischen 30 und 40 cm tiefer. Sobald sie steiler verlaufen gibt es Absenkungen wie in einer Linie (Abbildung 33, rechts). Die grösseren Differenzen zu 2015 betragen 70 bis 140 cm.

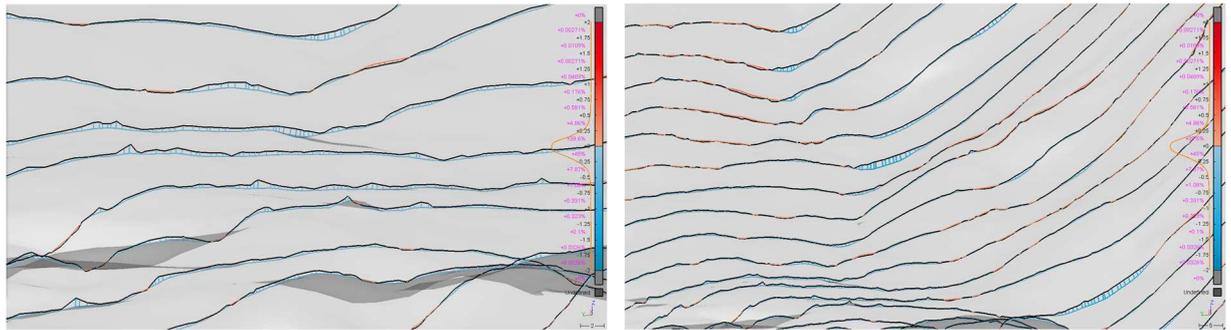


Abbildung 33: Absenkungen der UAV-Profile im oberen Wurzelbereich

9.3.3 Probleme

Mit der installierten Software Version 2016 konnten die Profile nicht miteinander verglichen werden. Das Problem war, dass die Differenzen je nach Referenzwahl in die falsche Richtung zeigten. Zudem war die Einfärbung der positiven und negativen Werte nicht konsequent. Am Beispiel aus Abbildung 34 wird deutlich gezeigt, dass teilweise ganze Profile nur mit einer Farbe dargestellt wurden. Mit Hilfe der neuen Version 2017 konnte dieses Problem behoben werden.

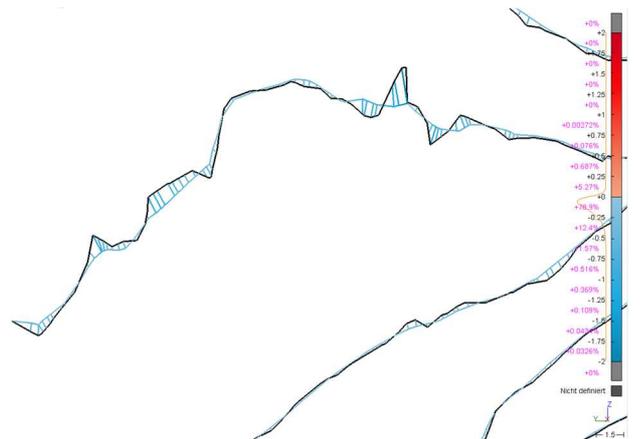


Abbildung 34: Problem wegen Einfärbung der Profile

Ein anderes Problem ist der Umstand, dass die Differenzen nicht senkrecht auf das Referenzobjekt projiziert, sondern als nächste Distanz berechnet werden. Deshalb können die Werte der Skala nicht direkt als Höhenänderung gesehen werden. Dieses Problem wirkt sich besonders bei steilem Gelände oder grossen Blöcken, wie es in Abbildung 35 der Fall ist, aus.

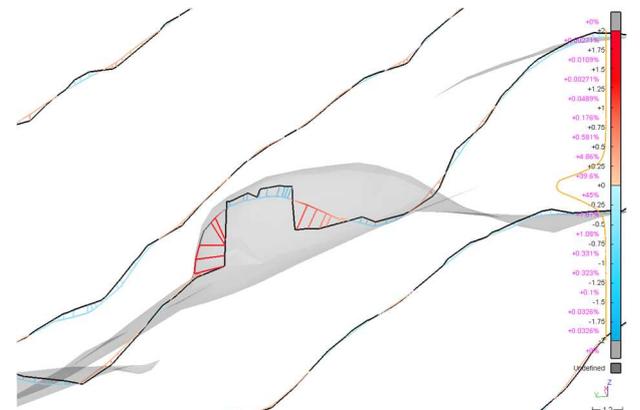


Abbildung 35: Problem wegen Projektion der Profile

Vergleich der TLS- und UAV-Profile 2017:

Zwischen den Modellen TLS und UAV wurde ein Höhenversatz im Bereich zwischen 30 und 50 cm festgestellt. Durch die stärkere Glättung infolge geringerer Auflösung im UAV-Modell kann dieser stellenweise sogar bis zu 1 m betragen. Im Nachhinein ist er auch bei der zweiten Folgemessung erkennbar.

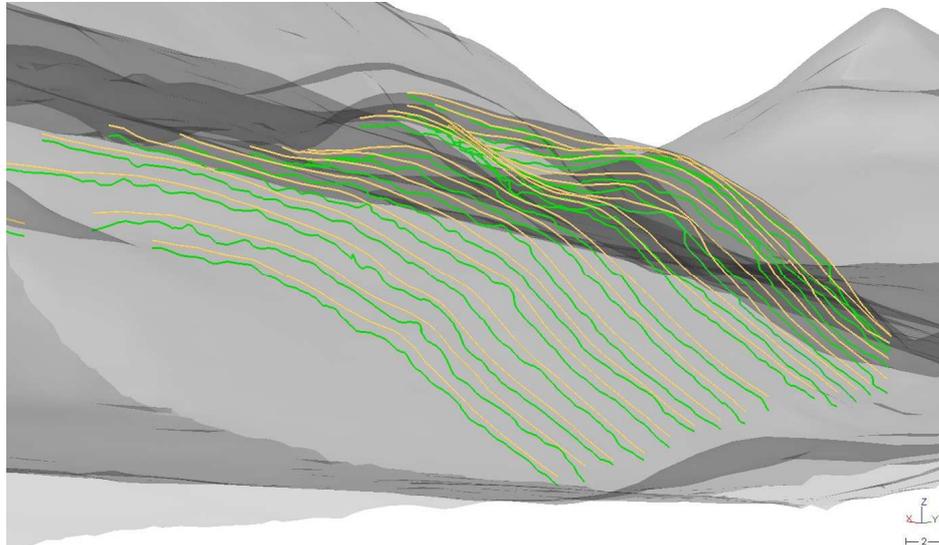


Abbildung 36: TLS- (grün) und UAV-Profile (orange) frontaler nördlicher Fussbereich

In Abbildung 36 sowie in Abbildung 37 ist der Höhenversatz zu sehen. Ob dieser auch im Wurzelbereich besteht, konnte aufgrund der fehlenden TLS-Profile nicht geprüft werden.

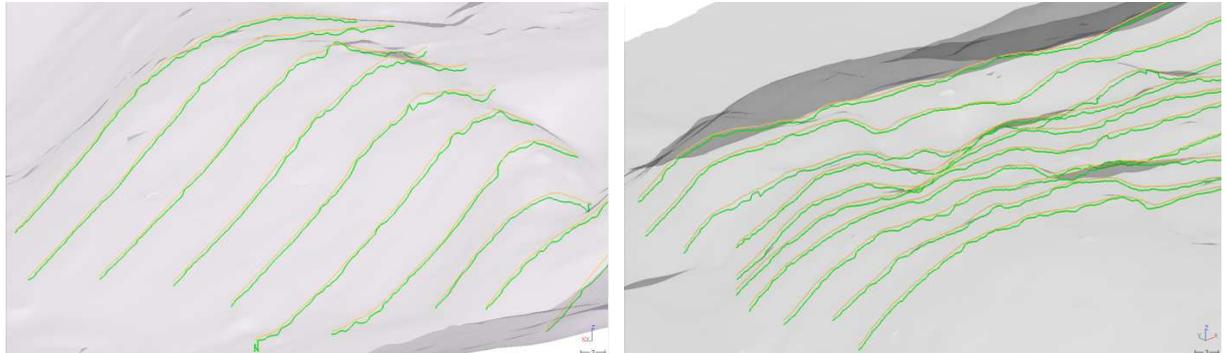


Abbildung 37: TLS- und UAV-Profile östlicher Fussbereich (links) und westlicher Fussbereich (rechts)

9.4 Begrenzungslinien des Fussbereiches

Anhand der Oberflächenmodelle konnte eine Begrenzung des Blockgletscherkörpers im Fussbereich digitalisiert werden. Die Begrenzungslinie 2015 wurde ebenfalls neu erstellt, da die alte mit Hilfe des Orthophotos 2015 entstanden ist. Es konnte sichtbar gemacht werden, dass sich der Blockgletscher an gewissen Stellen ausgeweitet und hangabwärts bewegt hat (vgl. Abbildung 38). Die grössten Veränderungen liegen im Bereich von 4 - 5 m, ansonsten pendeln diese sich zwischen 0.5 und 1.5 m, so wie es sich auch beim Vergleich der Oberflächenmodelle zeigte. Oft sind die Linien jedoch beinahe deckungsgleich. Allenfalls ist es auch Material, welches an den Flanken runtergefallen ist und sich aufgestaut hat. Die teilweise aufgetretenen Differenzen von bis zu 5 m sowie die daraus entstandenen einzelnen Veränderungen hangaufwärts, sind auf die unzureichende Genauigkeit bei der Digitalisierung und der Modellierung zurückzuführen.

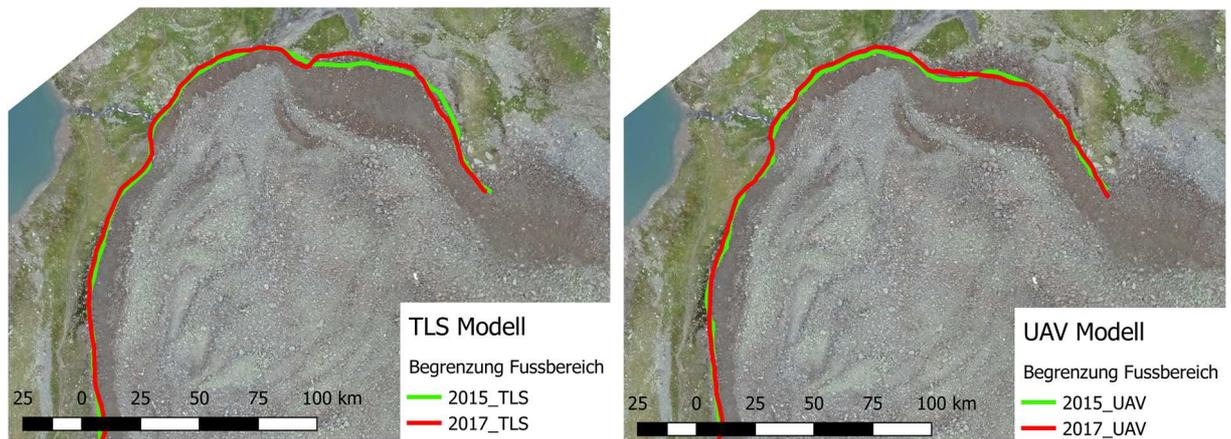


Abbildung 38: Vergleich der Begrenzungslinien im Fussbereich des Blockgletschers

9.5 Kubaturberechnung und Massenbilanz

Für die Berechnung der Kubatur wurden die Modelle des TLS und UAV aus den Jahren 2015 und 2017 auf denselben Bereich zugeschnitten. Die Basishöhe für die Berechnung wurde auf 2500 m ü. M. festgelegt. Es konnte nur eine Kubaturberechnung des Blockgletscherkörpers aus dem UAV-Modell bewerkstelligt werden. Das TLS-Modell beinhaltete zu viele Löcher, was zu einem falschen Volumen führte. In den zwei Jahren wurde eine Massenbilanz von 0.1 % festgestellt (vgl. Tabelle 18). Das entspricht einer Volumenabnahme von rund 22'800 m³. Auf eine Fläche von 300 x 600 m ergibt dies eine Höhendifferenz von rund 13 cm.

TLS		
Jahr	Volumen [m ³]	Rückgang
2015	37'187'756	77.7 %
2017	8'308'511	28'879'246 m ³

UAV		
Jahr	Volumen [m ³]	Rückgang
2015	36'922'396	0.1 %
2017	36'899'611	22'784.6 m ³

Tabelle 18: Massenbilanz der Blockgletscherkubatur

9.6 Fazit

Anhand des Vektorenplans konnten die Verschiebungen der Fix- und Kontrollpunkte aufschlussreich visualisiert werden. Dabei sticht der Verschiebungsvektor des FP1006 ins Auge. Die Vektoren der Kontrollpunkte auf dem Blockgletscher zeigen alle in dessen Fliessrichtung.

Die dreidimensionalen Vergleiche zeigen signifikante Deformationen und diverse auffällige Zonen (Wurzel- und Fussbereich sowie Rutschhang).

2D-Veränderungsanalysen in Fliessrichtung des Blockgletschers konnten zwar durchgeführt werden, jedoch konnte die Darstellung nicht schlüssig interpretiert werden und wurde deshalb nicht im Bericht aufgeführt.

Durch den Vergleich von Profilen können die beiden Zeitstände direkt und parallel veranschaulicht werden, was bei einem 3D-Vergleich zweier Modelle nur durch eine unterschiedliche Farb-

gebung gemacht werden kann. Es werden jedoch nur diskrete Teile des Blockgletschers erfasst. Auf die wirkliche Form der Verschiebung kann nicht geschlossen werden. Hingegen ist es nur mit Profilen möglich, mehr als zwei Zeitstände miteinander direkt zu vergleichen (vgl. Abbildung 28). Wie in Kapitel 9.3.1 beschrieben, wurde anhand der TLS-Profile eine Absenkung des Blockgletschers detektiert, während die UAV-Profile eher von einer Aufschüttung zeugten. Die Ursache liegt im Höhenversatz zwischen TLS- und UAV-Modell (vgl. Abbildung 36 und Abbildung 37). Wegen der festen TLS-Stationierung auf bekannten Punkten und wegen der verwackelten Bilder für die Passpunktmessung kann der Höhenversatz dem UAV-Modell zugeschrieben werden. Ein möglicher Grund für den fehlenden Vergleich der TLS-Profile im Wurzelbereich könnte die grosse Anzahl an Löcher im Oberflächenmodell sein, welche eine Projektion der Profile verhinderte (vgl. Kapitel 9.3.2). Wie im Kapitel 9.3.3 erklärt kann aus dem Vergleich der Profile nicht direkt die Grösse der Höhenänderung abgeleitet werden. Deshalb ist den Zahlenwerten nicht zu viel Aufmerksamkeit zu schenken. Dafür ist auf das Vorzeichen bzw. auf die Farbe der positiven oder negativen Werte Verlass.

Die Analyse der Begrenzungslinien im Fussbereich ist mit Vorsicht zu geniessen. Vor allem aufgrund der festgestellten jährlichen Veränderung der Begrenzungslinie von 8 cm Fehr, Reich (2015).

Es wurde klar, dass ein Vergleich der Kubaturberechnung nur möglich ist, wenn die beiden Modelle kongruent sind und dieselbe Basishöhe verwendet wird. Die berechnete Höhendifferenz ist plausibel und liegt im Bereich der anderen Analysen.

10. Auswertung Meteodaten

Die vom SLF erhaltenen Daten, für die Prüfung eines allfälligen Einflusses von Temperatur und Niederschlagsmengen auf das Verhalten des Blockgletschers, mussten vorgängig verarbeitet werden. Die gesamten Berechnungen sind im *Anhang A14 Berechnungen mit Temperatur- und Schneehöhendaten* sichtbar.

Temperaturdaten

Die Temperaturdaten waren 30- bis 40-minütige Tagesaufzeichnungen (45-50 Temperaturangaben pro Tag). Sie standen im Dateiformat *Comma-separated values* (CSV) zu Verfügung und können im *Anhang A15 Temperaturdaten* begutachtet werden. Leider waren sie lückenhaft, was die Bildung eines Tagesmittels erschwerte. Danach wurden die Temperaturdaten aller drei Me-teostationen in einem Liniendiagramm dargestellt und mit einer Trendlinie versehen. So konnten die drei Trendlinien verglichen und zu einer vereinigt werden. (vgl. Abbildung 39 unten).

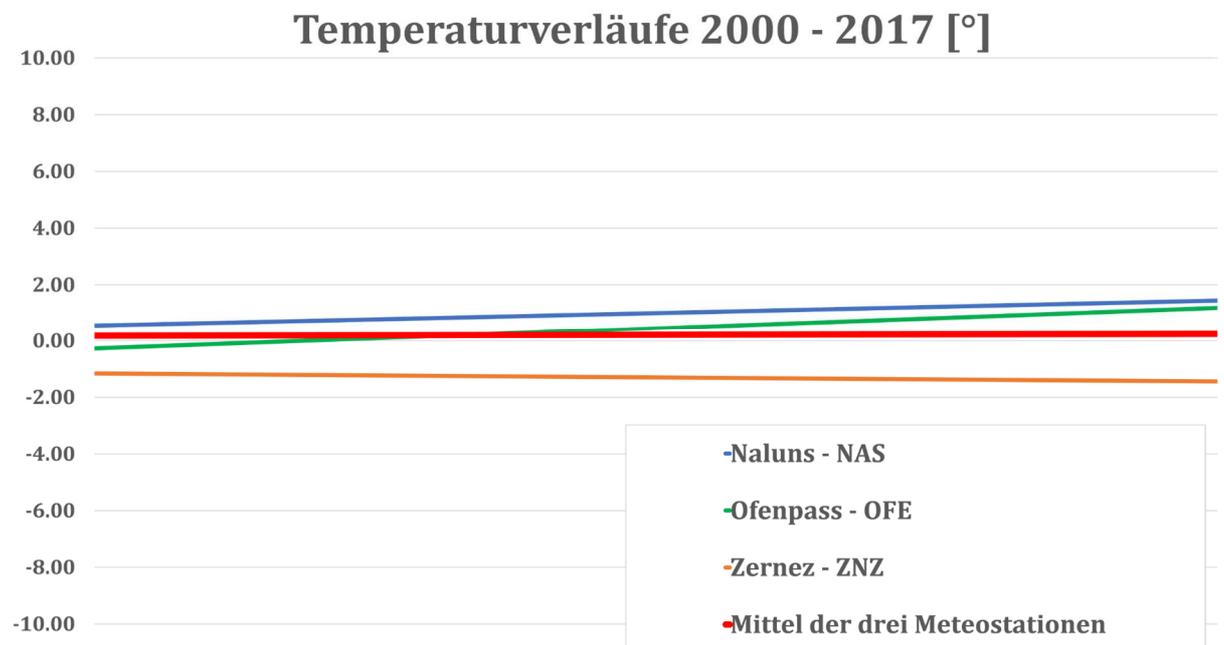


Abbildung 39: Diagramm der Temperaturverläufe 2000-2017

Es zeigt sich eine minimale Zunahme der Temperaturen. Diese ist jedoch zu wenig aussagekräftig, sodass ein Beiziehen dieser Daten für die Analysen der Blockgletscherveränderungen keinen Sinn macht. Es kann lediglich vermutet werden, dass eine gewisse, bereits geahnte, Korrelation zwischen Veränderungen am Blockgletscher und Temperatur besteht. Spezifische Erkenntnisse konnten nicht gezogen werden.

Niederschlagsdaten

Die maximalen Schneehöhen pro Jahr wurden wegen schlechten Grundlagedaten und wegen Zeitmangels von Auge den Liniendiagrammen entnommen und wiederum in ein anderes Liniendiagramm zusammengebracht. Es handelt sich hierbei um Darstellungen in PDF-Dateien, wie im *Anhang A16 Winterplots Schneehöhen* sichtbar. Es wurde jeweils der grösste Wert (max. Schneehöhe pro Jahr) dem Diagramm entnommen. Nach dem Zusammenbringen der Daten wurde über alle drei Messstationen ein Mittel berechnet (vgl. Abbildung 40).

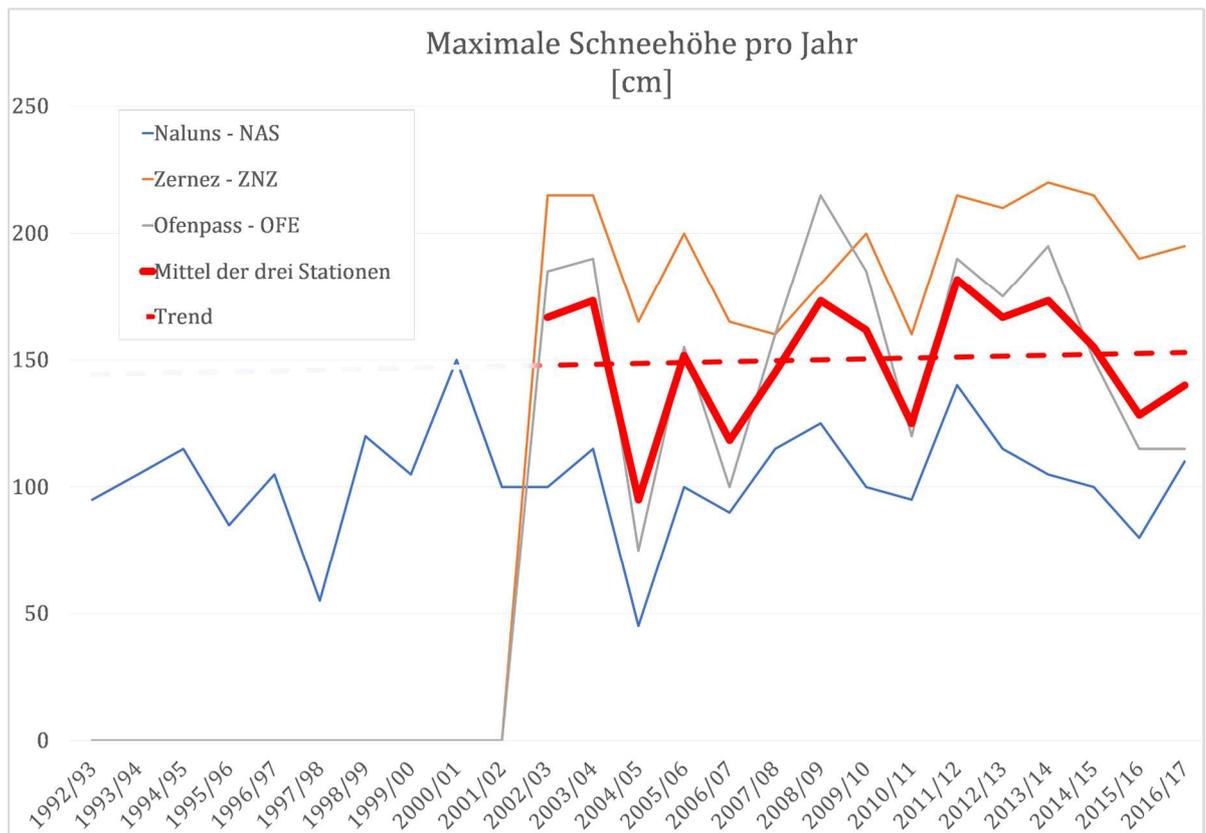


Abbildung 40: Diagramm mit den maximalen Schneehöhen 1992-2017

Entgegen den Erwartungen, dass bei einem Temperaturanstieg die Schneehöhen sinken, ist über die letzten 16 Jahre ein leichter Aufwärtstrend zu erkennen. Diese Folgerung ist jedoch mit Vorsicht zu geniessen, trotzdem kann diese Erkenntnis auch stimmen. Möglich ist, dass die maximalen Schneehöhen zunehmen, das Schmelzen aber durch die wärmeren Temperaturen beschleunigt wird. In einer weiteren Arbeit müssten allenfalls die mittleren Schneemengen, welche über längere Zeit liegen bleibt, für Beurteilungen beigezogen werden. Zudem ist die Zeitspanne von nur etwa fünfzehn Jahren zu kurz. Aufgrund der maximalen Schneehöhen müssten die Veränderungen am Blockgletscher eingedämmt werden. In den Jahren 2015-2017 war dies nicht der Fall.

11. Diskussion

Grundlagenetz mit GNSS

Die ersten zwei der drei GNSS-Sessionen mussten aufgrund des schlechten Wetters bei Nässe oder Schneefall durchgeführt werden. Dies beeinflusste nicht die Qualität der Messungen, jedoch die Dauer der Sessionen. Grössere Vorsicht war geboten und das erhöhte Verletzungsrisiko musste in Kauf genommen werden. Es hat sich dennoch gelohnt, sonst wären die Messungen nicht vor dem Wochenende abgeschlossen worden.

Mit einer mittleren Konfidenzellipse von 4.8 mm konnte die Genauigkeit gegenüber 2015 gesteigert werden. Höhengenaugigkeit wurde ebenfalls deutlich auf einen mittleren Wert von 10.6 mm verbessert. Somit bildete das Grundlagenetz eine geeignete Basis für die TLS- und UAV-Aufnahmen. Mit der Messung von drei Sessionen wurde sichtbar, dass Session 1 nicht so gut mit den anderen beiden Sessionen zusammenpasste.

Terrestrisches Laserscanning

Dank der hohen Motivation konnte der schwere Laserscanner trotz Schnee zu allen Stationen hochgetragen werden. Es ist jedoch fraglich, ob sich dieser Aufwand lohnt. Da die Übergabe des Scanners erst unmittelbar vor der Messwoche erfolgte, konnte die Bedienung nicht genügend geübt werden. Aus diesem Grund mussten auf Macun bei den ersten Stationen gewisse Verzögerungen akzeptiert werden. Wegen des Verzichts auf Targets bei den Feldarbeiten konnte wiederum Zeit eingespart werden. Wenn das Instrument bereits beim Scanning mit dem integrierten digitalen Kompass nach Norden ausgerichtet wird, muss dies nicht mehr manuell im Büro erledigt werden (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2014). Für die Vermeidung von Datenlücken müssen zusätzliche Scanstationen definiert werden. Der Arbeitsaufwand wird sich so aber noch mehr erhöhen.

Die Einarbeitung in RiSCAN brauchte mehr Zeit als erwartet, ebenso das *Multi Station Adjustment*, dessen Parameter nicht selbsterklärend waren. Bezüglich Genauigkeitsuntersuchungen des Scanners wird auf die vorhergehenden Folgemessungen verwiesen. Aufgrund desselben TLS-Instruments und des gleichen Messkonzepts, mit identischer Scanauflösung pro Station können die berechneten Werte aus 2015 beigezogen werden. Damals betrug die Höhengenaugigkeit 8 cm, was bedeutet, dass Höhenänderungen erst ab 25 cm signifikant ($S = 95\%$) nachgewiesen werden können (Fehr, Reich, 2015).

Drohnenbefliegung

Die erste Drohnenbefliegung musste wegen des Windes abgebrochen werden, konnte dann aber am Freitag innert drei Stunden nachgeholt werden. Falls in einer künftigen Folgemessung vorwiegend mit UAV befliegen wird, sollte dies nur bei bestem Wetter und windstillen Verhältnissen erfolgen. Die Planung der Messkampagne hat somit kurzfristig zu erfolgen und wegen des Bergwetters, welches schnell umschlagen kann, können ungewollte Wartezeiten entstehen.

Die Auswertung in Postflight Terra 3D konnte problemlos bewerkstelligt werden. Jedoch war die Passpunktmessung, aufgrund der teilweise verwackelten Bilder, schwierig. Zudem war die Abgrenzung zwischen einem Schneefleck und der weissen Signaltafel knifflig. Neben dem vereinfachten Oberflächenmodell, welches leider nicht georeferenziert war, wurde auch ein Orthophotomosaik des Blockgletschers erstellt. Die erreichte Bodenauflösung von 8.2 cm war leicht über der geplanten von 6 cm. Für eine bessere Genauigkeit kann die Flughöhe reduziert werden, indem die Bodenauflösung tiefer angesetzt wird und mehrere Teilflüge durchgeführt werden. Deshalb sind für die Aufnahmen möglichst ruhige Windverhältnisse zwingend. Bei der zweiten

Folgemessung war die GSD mit knapp 10 cm etwas schlechter. Zudem konnte der mit Bildern abgedeckte Bereich von ehemals 70 ha auf 125 ha ausgedehnt werden.

Oberflächenmodellierung

Die Software 3DReshaper erwies sich als weniger gut geeignet als erwartet. Zudem kamen die Rechner bereits mit einer halben Milliarde Punkte nicht mehr zurecht. Die Parameter für die Auswertung in 3DReshaper müssen wo möglich vereinheitlicht werden. Auch wenn die Punktwolke der TLS-Aufnahmen detailreicher und genauer ist, ist das finale Oberflächenmodell nicht viel genauer als das UAV-Modell. Es wird vermutet, dass 3DReshaper nicht so gut mit einer solchen unregelmässigen Oberfläche auskommt wie andere Softwareprodukte (z.B. I-Site Studio, verwendet in Folgemessungen 2010 und 2012). Möglicherweise erkennt sie die Blockgletscheroberfläche als Rauschen und erzeugt viele falsche Vermaschungen. In den Jahren 2010 und 2012 war die Detailtreue in den Modellen deutlich besser. Die Modellierung in 3DReshaper 2016 kann somit nicht akzeptiert werden. Für die nächste Oberflächenmodellierung muss deshalb zwingend eine alternative Software evaluiert werden. Für gewisse Berechnungsvorgänge wie beispielsweise 2D-Vergleiche oder Projektion der Profile kann die Version 2017 von 3DReshaper Abhilfe schaffen, da sie in der vorhergehenden Version nicht ausgeführt werden können.

Werden die zwei Oberflächenmodelle aus den TLS- und UAV-Aufnahmen verglichen, ist der Mehraufwand für das TLS-Modell nicht gerechtfertigt. Das UAV-Modell ist grösstenteils ebenso gut gelungen und dies mit geringeren Datenmengen sowie Arbeitsaufwand. Lediglich die neue Vermaschung des Fussbereiches konnte die Oberfläche etwas detailreicher modellieren. Die Komplexität mit den unterschiedlichsten Blocksteinen an der Oberfläche konnte trotzdem nicht vollständig korrekt modelliert werden. Daher ist es fraglich ob der Zeitaufwand und die grösseren Strapazen künftig in Kauf genommen werden sollen.

Vergleich mit zweiter Folgemessung

Die Vergleichbarkeit der Modelle ist durch unterschiedliche Modellierungsverfahren schwierig. Zudem können Datenlücken die Vergleiche verfälschen. Die Wahrscheinlichkeit für die Entstehung von Lücken bei Drohnenaufnahmen ist minimal. Hingegen sind beim TLS, durch die wellenartige Form des Blockgletschers mit mehreren Vertiefungen, einige grössere Löcher entstanden.

Nur mittels Profilen können zwei oder mehrere Zeitstände direkt und parallel veranschaulicht werden. Anhand dieser diskreten Abtastung des Objekts kann jedoch nicht auf dessen reale Verformung geschlossen werden. Weiter kann die Grösse der Höhenänderung nicht direkt aus der Skala abgeleitet werden. Es sind lediglich die Vorzeichen bzw. die Farbe der positiven oder negativen Werte aussagekräftig.

Ein Vergleich der Begrenzungslinien über eine Zeitdauer von lediglich zwei Jahren ist fraglich. Zudem ist es nicht ganz einfach, die wirkliche Begrenzung aus dem Oberflächenmodell festzustellen und zu digitalisieren. Deswegen kommt es an einigen Stellen zu Unstimmigkeiten, wie beispielsweise die örtliche Verschiebung der Umrandung von 2015 hangaufwärts. Ein möglicher Algorithmus für die Extraktion von Unebenheiten oder Formveränderungen könnte hier möglicherweise Abhilfe schaffen. Trotzdem wurde die Methode der Digitalisierung mit Hilfe des Oberflächenmodells als besser empfunden, als mit dem Orthophoto.

Der Druck des dreidimensionalen Modells erwies sich als schwieriger als erwartet. Die komplexe Form des Oberflächenmodells musste so reduziert werden, dass ein Druck möglich war. Schliesslich resultierten zwei gedruckte Oberflächenmodelle, welche stets an diese Bachelor-Thesis erinnern werden.

Ausblick

Aufgrund der erneuten Feststellung von grossen Verschiebungen an der östlichen Flanke empfiehlt sich bei Folgemessungen ein genaueres Augenmerk auf diesen Rutschhang zu richten. Allenfalls ist auch ein neues Messsetup für diesen Bereich empfehlenswert.

Wegen den nicht zufriedenstellenden Resultaten der Oberflächenmodelle wäre es angebracht den gleichen Datensatz mit einer alternativen Software auszuwerten. Danach können die Oberflächenmodelle verglichen werden.

Die Ursache des festgestellten Höhenversatzes aus den UAV-Modellen sollte mit der nächsten Folgemessung zwingend untersucht werden. Daraus können allfällige Schlüsse für UAV-Befliegungen mit der eBee gezogen werden.

Obwohl Fehr, Reich (2015) eine Folgemessung in frühestens drei Jahren empfohlen hatten, wurde bereits nach zwei Jahren eine solche durchgeführt. Es konnten erhebliche Verschiebungen festgestellt werden. Da für nichts und niemanden eine Gefahr aufgrund der Blockgletscherausdehnung besteht und wenn der Aufwand in Betracht gezogen wird, ist eine Folgemessung im Zweijahresrhythmus fraglich.

Schlussfolgerungen zusammen mit dem SNP Bereich Forschung und Geoinformation könnten erst im Rahmen einer Schlussbesprechungen gezogen werden. Aus diesem Grund können sie in diesem Bericht nicht aufgeführt werden.

12. Empfehlungen

Zum Abschluss dieser Arbeit sind Empfehlungen für Folgemessungen und für die Überwachung von Blockgletschern allgemein erarbeitet und nachfolgend aufgeführt worden.

12.1 Empfehlungen für Folgemessungen

Organisation

Es ist wichtig mit der Organisation von externem Material oder Software frühzeitig zu beginnen. So bleibt genug Zeit um allfälligen Problemen entgegenzuwirken oder das Material anderswo zu organisieren. Zu dem zählt ebenfalls die Reservation von internem Material. Dazu sollte eine Absprache mit den zuständigen Mitarbeitenden des IVGI sowie Kollegen erfolgen.

Da der Materialtransport zwischen MuttENZ und Zernez einen ganzen Tag in Anspruch nimmt, sollte er wenn möglich jeweils mit der Besprechung kombiniert werden.

Falls mit einem externen terrestrischem Laserscanner gearbeitet wird, sollten die Abklärungen für den Bezug des Gerätes bereits vor Beginn der Bachelor Arbeiten erfolgen. Es ist von Vorteil, wenn die Bedienung vorgängig erprobt werden kann. So können Verzögerungen während der Messwoche vermieden werden.

Rekognoszierung

Eine Rekognoszierung wird wärmstens empfohlen. Das Handy GPS funktioniert gut und reicht für das Auffinden der Punkte völlig aus. Es empfiehlt sich Farbe für die Erneuerung der Markierungen mitzunehmen. Für die Überschreitung von Zernez nach Lavin sollten etwa 13 Stunden einberechnet werden.

Messwoche

Für die Messwoche müssen Trittsicherheit, Schwindelfreiheit, Kondition und Kraft zwingend vorhanden sein. Ein Weglassen der TLS-Aufnahmen würde das Ganze ein wenig relativieren.

Die Messwoche sollte möglichst früh erfolgen, damit genügend Zeit für die Auswertung und Berichtverfassung übrig bleibt. Trotzdem darf der Zeitanspruch für die Planung und Organisation nicht unterschätzt werden.

Um falsche oder unvollständige Punktwolken zu vermeiden, darf nicht bei Schneefall oder Nebel gescannt werden. Zudem erhöht die Arbeit während schlechten Witterungsbedingungen das Verletzungsrisiko sowie den Aufwand.

Aufnahmen

Die GNSS-Messungen mit dem Verfahren Rapid-Static haben sich wiederum bewährt. Die Messung einer dritten Session ist nicht zwingend notwendig aber empfehlenswert, da allfällige Probleme bei der Auswertung vermieden werden können.

Als Alternative zu einer kompletten Erfassung des Blockgletschers mittels TLS bietet sich eine grossflächige UAV-Befliegung mit einzelnen Scans für den Wurzel- und Fussbereich an. So verringert sich der Aufwand für die Aufnahmen und Auswertung. Es ermöglicht eine genauere Modellierung der Oberfläche. Die Einstellungen der Scanauflösungen müsst dementsprechend angepasst werden.

Bei der vorgängigen Flugplanung ist es wichtig, dass die Hintergrundkarte sowie das Höhenmodell vorgängig in den Cache des eBee-Laptops geladen werden. Dies sollte zwingend vor der

Messkampagne getestet werden. Unbedingt muss die Einstellung der maximalen Flughöhe beachtet und allenfalls angepasst werden. Ansonsten kann die Flugroute nicht auf die eBee geladen werden. Die Start- und Landezone ist für die eBee bestens geeignet. Bei optimalen Flugbedingungen kann versucht werden, ein Kreuzflug durchzuführen. Allenfalls steigert dies die Qualität der Aufnahmen.

Auswertung

Für die Oberflächenmodellierung des Blockgletschers empfiehlt es sich, eine alternative Software zu verwenden.

Die Auswerteparameter sollten besser dokumentiert werden, damit sie für die Auswertung einer Folgemessung übernommen werden können. Dies ermöglicht zuverlässigere Vergleiche der Oberflächenmodelle.

Die Punktwolke des gesamten Blockgletschergebiets darf bei 3DReshaper nicht beim Import reduziert werden, sondern erst vor der Generierung der Oberfläche. Die Algorithmen für die Reduktion müssen jedoch vorgängig erprobt werden. Durch das Scannen kleinerer Bereiche könnte dieser Schritt auch weggelassen werden.

Es ist vorteilhaft, wenn die Festlegung der beabsichtigten Analysen vorgängig erfolgt. Zusätzlich kann so deren Machbarkeit überprüft werden.

12.2 Empfehlungen für Deformationsmessungen von Blockgletschern

Für eine Vergleichbarkeit von Folgemessungen sollte das Vorgehen bei der Erfassung und Auswertung gleich sein. Ebenso sollte die Wahl der Auswerteparameter möglichst dieselbe sein.

Die GNSS-Messungen des Fix- und Kontrollpunktnetzes sind zwingend durchzuführen. Nicht nur um die punktuellen Verschiebungen des Blockgletschers analysieren zu können, sondern auch um die neuen Koordinaten der Festpunkte zu bestimmen.

Die Form und Struktur eines Blockgletschers hat zur Folge, dass eine vollständige Modellierung der Oberfläche nur mit einem enormen Aufwand bewerkstelligt kann. Aus diesem Grund werden UAV-Aufnahmen für die Gesamterfassung des Gebiets bevorzugt. Während hingegen für besonders relevante Zonen des Blockgletschers (z.B. Wurzel- und Fussbereich) hochauflösende Scans zu deren Überwachung sinnvoll sein können.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Farbwerte von colorbrewer2.org	1
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Blockgletschers (Krainer, 2015).....	4
Abbildung 3: gesamte Ausdehnung des Blockgletschers Macun (eigene Aufnahme).....	5
Abbildung 4: Standort Blockgletscher Macun (www.angebote.paerke.ch).....	5
Abbildung 5: GNSS-Empfänger Leica Viva GS14 (Leica Geosystems, 2017)	8
Abbildung 6: Leica Viva Controller CS15 (Leica Geosystems, 2017)	8
Abbildung 7: TLS RIEGL VZ-4000 (RIEGL, 2017).....	8
Abbildung 8: eBee (senseFly, 2017).....	9
Abbildung 9: Schneesituation während der Rekognoszierung.....	12
Abbildung 10: Punktnummernplan Macun 2017.....	13
Abbildung 11: Fluglinien der zwei Teilflüge.....	17
Abbildung 12: Auswertekonzept GNSS angepasst aus Fehr, Reich (2015)	18
Abbildung 13: Helmerttransformation.....	25
Abbildung 14: Höhentransformation	25
Abbildung 15: Auswertekonzept TLS angepasst aus Fehr, Reich (2015).....	30
Abbildung 16: Resultate Multi Station Adjustment.....	32
Abbildung 17: gedrucktes 3D-Modell der Seenplatte Macun.....	33
Abbildung 18: Scanprobleme wegen Schneefall (blau) und Nebel (schwarz eingekreist).....	34
Abbildung 19: Auswertekonzept UAV angepasst aus Fehr, Reich (2015)	35
Abbildung 20: Orthophotomosaik des Blockgletschers Macun.....	37
Abbildung 21: Bild mit verwackelter Signalisationstafel.....	39
Abbildung 22: Plan mit Verschiebungsvektoren der Fest- und Kontrollpunkte	40
Abbildung 23: 3D-Vergleich der Oberflächenmodelle aus TLS-Daten	41
Abbildung 24 :3D-Vergleich der Oberflächenmodelle aus UAV-Daten	41
Abbildung 25: 3D-Vergleich aus den TLS-Daten im Fussbereich (links) und im Wurzelbereich (rechts).....	42
Abbildung 26: Übersicht der TLS-Profile im Fussbereich	43
Abbildung 27: TLS-Profile frontaler nördlicher Fussbereich (links) und westlicher Fussbereich (rechts).....	43
Abbildung 28: TLS-Profile 2017 (grün), 2015 (rot) und 2012 (blau) im östlichen Fussbereich ..	44
Abbildung 29: Übersicht der UAV-Profile im Fussbereich	44
Abbildung 30: UAV-Profile östlicher Fussbereich (links) und frontaler nördlicher Fussbereich (rechts).....	44
Abbildung 31: Übersicht der UAV-Profile im Wurzelbereich	45
Abbildung 32: Vertiefung eines UAV-Profiles im unteren Wurzelbereich	45
Abbildung 33: Absenkungen der UAV-Profile im oberen Wurzelbereich	46
Abbildung 34: Problem wegen Einfärbung der Profile	46
Abbildung 35: Problem wegen Projektion der Profile.....	46
Abbildung 36: TLS- (grün) und UAV-Profile (orange) frontaler nördlicher Fussbereich.....	47
Abbildung 37: TLS- und UAV-Profile östlicher Fussbereich (links) und westlicher Fussbereich (rechts).....	47
Abbildung 38: Vergleich der Begrenzungslinien im Fussbereich des Blockgletschers	48
Abbildung 39: Diagramm der Temperaturverläufe 2000-2017	50
Abbildung 40: Diagramm mit den maximalen Schneehöhen 1992-2017.....	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Verwendungszweck der Fixpunkte 2017	14
Tabelle 2: Provisorischer Messablauf.....	14
Tabelle 3: Messablauf 2017	15
Tabelle 4: Scan Einstellungen 2017.....	16
Tabelle 5: Basislinienberechnung Koordinatensystem.....	19
Tabelle 6: Basislinienberechnung Transformationsparameter	20
Tabelle 7: Basislinienberechnung Berechnungsparameter	20
Tabelle 8: Empirische Standardabweichungen der Basislinienberechnung.....	21
Tabelle 9: Überprüfung der Höhenmassstäbe	22
Tabelle 10: Überprüfung Dreh- und Massstabsparameter.....	23
Tabelle 11: Globaler Modelltest.....	24
Tabelle 12: Signifikanzgrenze Lage für die Helmerttransformation.....	24
Tabelle 13: Signifikanzgrenze Höhe für die Höhentransformation.....	24
Tabelle 14: Empirische Standardabweichungen 2017.....	26
Tabelle 15: Definitive Koordinaten 2017	27
Tabelle 16: Koordinatendifferenzen 2015-2017	28
Tabelle 17: Parameter Multi Station Adjustment.....	31
Tabelle 18: Massenbilanz der Blockgletscherkubatur.....	48

Literaturverzeichnis

- Arpagaus, Thomas; Joss, Samuel (2012): „Blockgletscher Macun – Erste Folgemessung“. (Bachelor-Thesis) Muttenz: Institut Vermessung und Geoinformation, FHNW.
- Baumhauer, Roland (2006): *Geomorphologie*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft. S. 85 ff. — ISBN: 978-3-534-15635-1
- Brewer, Cynthia; Harrower, Mark; The Pennsylvania State University (2017): „ColorBrewer: Color Advice for Maps“. Abgerufen am 21.08.2017 von <http://colorbrewer2.org/#type=diverging&scheme=RdBu&n=5>.
- Docci, Nando (2017): „Checkliste eBee-Flug für Studenten IVGI“. (Anleitung) Muttenz: Institut Vermessung und Geoinformation, FHNW.
- Fehr, Markus; Reich, Raphael (2015): „Blockgletscher Macun – Zweite Folgemessung“. (Bachelor-Thesis) Muttenz: Institut Vermessung und Geoinformation, FHNW.
- Frauenfelder, Regula; Roer, Isabelle (2007): „Permafrostindikatoren der besonderen Art: was Blockgletscher bewegt“. In: *Die Alpen*. 2007 (9), S. 34–37.
- Haeberli, Wilfried (1995): „Permafrost und Blockgletscher in den Alpen“. In: *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*. 140 (3), S. 113 ff.
- Koch, Eva-Maria; Erschbamer, Brigitta (Hg.) (2013): In: *Klima, Wetter, Gletscher im Wandel*. Innsbruck: Innsbruck University Press (Alpine Forschungsstelle Obergurgl - Band 3), S. 7.
- Kos, Andrew; Amann, Florian; Strozzi, Tazio; et al. (2016): „Contemporary glacier retreat triggers a rapid landslide response, Great Aletsch Glacier, Switzerland“. In: *Geophysical Research Letters*. 43 (24), DOI: 10.1002/2016GL071708.
- Krainer, et. al. (2015a): „Aufbau und Dynamik ausgewählter Blockgletscher in Nord- und Südtirol“. In: *Geo.Alp*. 12, S. 75–134.
- Krainer, Karl (2015b): „Kapitel 1 – Blockgletscher: Einführung“. In: *Schallhart, Nikolaus; Erschbamer, Brigitta (Hg.) (2015): Forschung am Blockgletscher: Methoden und Ergebnisse*. Innsbruck: Innsbruck University Press (Alpine Forschungsstelle Obergurgl - Band 4), S. 9–32. — ISBN: 978-3-902936-58-5
- Leica Geosystems AG (2012): „Leica Viva Series – Technisches Referenzhandbuch, und “Leica Viva GNSS GS14 Empfänger – Datenblatt“. Abgerufen am 18.07.2012 von <http://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-viva-gs14>.
- Lozza, Hans; Haller, Ruedi; Schmid, Christian; et al. (2012): „Blockgletscher: gigantische Tatzelwürmer“. In: *Cratschla*. 1, S. 4–11.
- Lugon, Ralph; Stoffel, Markus (2010): „Rock-glacier dynamics and magnitude-frequency relations of debris flows in a high-elevation watershed: Ritigraben, Swiss Alps“. In: *Global and Planetary Change*. 73 (3–4), S. 202–210, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2010.06.004.
- Marzeion, Ben (2012): „Klimawandel in den Alpen: Warum steigen die Temperaturen dort so stark?“. In: *Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. (Hg.) (2012): Jahrbuch 2011/2012 des Vereins zum Schutz der Bergwelt*, 76./77. München: Verein zum Schutz der Bergwelt e.V., S. 125–130.

- Mautz, Rainer; Grimm, David; Limpach, Philippe; et al. (2010): „Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten von Blockgletschern“. In: *Geomatik Schweiz*. 6, S. 264–268.
- Naegeli, Barbara (2010): „Felsstürzte und Permafrost – Ereignisanalyse und Abschätzung der Permafrostverhältnisse von Anrisszonen in den Alpen“. (Masterthesis) Zürich: Abteilung Physische Geographie, Universität Zürich.
- RIEGL Laser Measurement Systems GmbH (2017a): „RIEGL VZ-4000 – Datasheet“. Abgerufen am 12.07.2017 von http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegldownloads/DataSheet_VZ-4000_2017-06-07.pdf.
- RIEGL Laser Measurement Systems GmbH (2014): „RIEGL VZ-4000 – System Configuration“. Abgerufen am 23.08.2017 von http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegldownloads/30_SystemConfiguration_VZ-4000_03-14_03-03-2014.pdf.
- RIEGL Laser Measurement Systems GmbH (2017b): „RIEGL VZ-4000 – Produktdetail“. Abgerufen am 12.07.2017 von <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/30/>.
- Sievers, Beat (2015): „Richtlinie für Basislinienberechnungen mit LEICA Geo Office Version 8.4 am Institut Vermessung und Geoinformation der HABG, FHNW“. (Richtlinie) Muttenz: Institut Vermessung und Geoinformation, FHNW.
- SLF (2017): „SLF > Das SLF > Das WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF“. Abgerufen am 18.07.2017 von http://www.slf.ch/ueber/index_DE.
- SNP (2017): „Besonderheiten – Der Schweizerische Nationalpark“. *parc naziunal svizzer*. Abgerufen am 19.07.2017 von <http://www.nationalpark.ch/de/about/ueberuns/naturoase/besonderheiten/>.
- Staiger, Rudolf (2014): *Terrestrisches Laserscanning – eine Bestandesaufnahme 2014*. In: DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. (Hg.) (2014). *Terrestrisches Laserscanning 2014 (TLS 2014)*: Wissner-Verlag, Augsburg.
- Szönyi, Michael (2007): *Geoland Schweiz*. Zürich: vdf Hochschulverlag. — ISBN: 978-3-7281-3077-8

Anhang

- A1 Aufgabenstellung Blockgletscher Macun – Dritte Folgemessung
- A2 Datenblatt Leica Viva GS14
- A3 Datenblatt Leica Viva Controller CS15
- A4 Datenblatt RIEGL VZ-4000
- A5 eBee Broschüre
- A6 Materialliste
- A7 Rekognoszierung Punktezustand
- A8 Feldprotokolle GNSS-Messungen Rapid-Static
- A9 Feldprotokoll Scanstationen
- A10 Mathematisches Modell GNSS
- A11 Berechnungs-Journal
- A12 Berechnungsprotokoll definitives freies Netz
- A13 Quality Report Postflight Terra 3D
- A14 Berechnungen mit Temperatur- und Schneehöhendaten
- A15 Temperaturdaten
- A16 Winterplots Schneehöhen
- A17 Protokoll GNSS-Auswertung