

Blockgletscher Macun - Zweite Folgemessung

Bachelor - Thesis

FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik
Institut Vermessung und Geoinformation

Examinator/in:

Prof. Dr. Reinhard Gottwald
Prof. Dr. Susanne Bleisch

Experte:

Dr. Ruedi Haller

Autoren:

Markus Fehr
Rofenbergstrasse 4
9492 Eschen FL
fehr.markus@gmx.net

Raphael Reich
Pestalozzistrasse 7
4600 Olten
raphaelreich@gmx.ch

Muttenz, 21.08.2015

Vorwort

Diese Bachelor-Thesis bildet für uns den Abschluss unseres *Bachelors of Science in Geomatik* an der Fachhochschule Nordwestschweiz in Muttenz. Wir hatten acht sehr intensive Wochen, um uns mit dem Blockgletscher Macun auseinanderzusetzen, diesen zu Vermessen und unsere Arbeit zu verfassen.

Während dieser anstrengenden Zeit konnten wir fachlich reifen und Erfahrungen gewinnen, die uns im späteren Berufsleben von Nutzen sein werden. Ein Highlight während der Bachelor-Thesis bildete die Messwoche auf Macun, wo wir während einer Woche in einer kleinen aber gemütlichen Hütte am Rande des Nationalparks lebten. Im Ausgleich zu den strengen Tagen, fand am Abend der interdisziplinäre Austausch mit anderen Forschern statt. Die Unterengadiner Bergwelt und der Schweizer Nationalpark haben auf uns einen bleibenden Eindruck hinterlassen. Wir werden in dieser Gegend sicher wieder einmal eine Wanderung unternehmen.

An dieser Stelle möchten wir uns auch bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders möchten wir uns bei unserem Experten Dr. Ruedi Haller sowie seinen Mitarbeitern für die Betreuung und die Unterstützung, vor allem während der Messwoche bedanken. Ein Dank gebührt auch unseren Examinatoren Prof. Dr. Reinhard Gottwald und Prof. Dr. Susanne Bleisch.

Weiter bedanken wir uns bei Prof. Dr. Andreas Wieser vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich für das zur Verfügung stellen des Riegl-Scanners. Ausserdem gebührt auch Ephraim Friedli ein Dank für die Einführung des Riegl-Scanners und seine engagierte Unterstützung.

Weiter bedanken wir uns bei Nando Docci für eine Einführung in die Bedienung der eBee Drohne und für das Drucken eines 3D-Modells.

Zum Schluss möchten wir uns auch bei unseren Familien und Freunden herzlich für die Unterstützung bedanken. Besonders danken wir Carmen Schneider und Cornelia Fehr.

Abstract

Der Blockgletscher Macun liegt im Gebiet des Schweizerischen Nationalparks (SNP) im Unterengadin. Dieser wurde in den Jahren 2010 (Nullmessung) und 2012 (erste Folgemessung) mittels terrestrischem Laserscanning (TLS) aufgenommen. Aus den vorhandenen Messkampagnen stand bereits ein Grundlagennetz zur Verfügung.

Vor der Messkampagne stellte sich die Frage, ob die Messungen für die zweite Folgemessung auch mit der Totalstation MS50 von Leica anstatt eines Laserscanners erfolgen könnten. Durch verschiedene Testmessungen kam hervor, dass die Laserscanningfunktion dieses Instrumentes für die Vermessung des Blockgletschers unbrauchbar ist. Deshalb wurde in der zweiten Folgemessung der Blockgletscher mittels des TLS und photogrammetrisch mit einer Drohne (UAV) erfasst. Anhand dieser Daten und einem Geländemodell aus dem Jahr 1939 wurden die komplexen Bewegungen, mittels Oberflächenvergleich und Profilen, sowie Volumenveränderungen ausgewertet und visualisiert. Signifikante Oberflächenveränderungen wurden im Vergleich der Oberflächenmodelle von 1939 und 2015 ersichtlich. Dabei brach in der Wurzelzone der Blockgletscher bis zu 16 m ein und hat an seiner Front Aufschüttungen von bis zu 12 m zu verzeichnen. Auch im Oberflächenvergleich der Modelle von 2012 und 2015 konnten an einigen Stellen signifikante Verschiebungen detektiert werden. Neben den erstellten Geländemodellen waren Luftbilder zu verschiedenen Zeitständen vorhanden. Aus diesen Bilddaten konnte eine Zeitreihe erstellt werden. In dieser ist ersichtlich, dass sich der Blockgletscher zwischen 1939 und 2015 im Durchschnitt um 6 m vorwärts bewegte. Die gewonnen Erkenntnisse können vom SNP für weiterführende Analysen des Blockgletschers verwendet werden. Zudem sind die Daten für die Klimaforschung interessant.

Ausserdem vergleicht diese Bachelor-Thesis die beiden Aufnahmemethoden TLS und UAV auf ihre Eignung bei der Blockgletschervermessung. Es stellte sich heraus, dass sich beide Methoden eignen, jedoch UAV die kostengünstigere Variante darstellt. Eine dritte Folgemessung wird frühestens für in drei Jahren vorgeschlagen. Zum Schluss werden Empfehlungen für die dritte Folgemessung und generell für die Überwachung von Blockgletschern erläutert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Auftragsanalyse	2
3	Der Blockgletscher	3
3.1	Grundlagen über Blockgletscher.....	3
3.1.1	Entstehungsbedingungen	3
3.1.2	Aufbau eines Blockgletschers.....	5
3.1.3	Aktivitätsgrade.....	5
3.2	Der Blockgletscher Macun.....	6
3.2.1	Der Schweizerische Nationalpark.....	6
3.2.2	Geologie und Geografie von Macun.....	7
3.3	Blockgletscher als Messobjekt.....	8
4	Messverfahren für die Überwachung von Blockgletschern.....	10
4.1	Terrestrische Messverfahren	10
4.2	Luftgestützte Messverfahren	12
4.3	Vergleich der Messverfahren	13
5	Testmessungen.....	14
5.1	Leica Nova MS50 MultiStation	14
5.2	Der Riegel VZ-4000 Scanner und die eBee Drohne.....	17
6	Messkampagne Macun	18
6.1	Vorbereitung Messkampagne.....	18
6.1.1	Grundlagennetz 2012	18
6.1.2	Rekognoszierung	19
6.2	Messwoche Macun.....	19
6.2.1	Grundlagennetz 2015	19
6.2.2	Messablauf Allgemein	22
6.2.3	GNSS Messungen	22
6.2.4	TLS Messungen	24
6.2.5	UAV Befliegung	25
6.3	Fazit.....	26

7	Datenauswertung GNSS	27
7.1	Mathematisches Modell	28
7.2	Auswertung Basislinie	28
7.3	Ausgleichung des GNSS-Netzes.....	29
7.3.1	Überprüfung der Höhenmassstäbe.....	29
7.3.2	Provisorischer Abriss.....	29
7.3.3	Überprüfung Dreh- und Massstabsparameter	29
7.3.4	Test der normierten Verbesserungen	30
7.3.5	Globaler Modelltest	30
7.3.6	Test der Festpunkte.....	31
7.3.7	Definitiv frei gelagertes Netz.....	33
7.3.8	Beurteilung des definitiv frei gelagerten Netzes.....	33
7.4	Resultate.....	34
7.4.1	Koordinaten 2015	34
7.4.2	Verschiebungsanalyse 2012 – 2015.....	34
7.5	Fazit.....	36
8	Datenauswertung TLS	37
8.1	Datenaufbereitung.....	38
8.2	Registrierung und Georeferenzierung der Punktwolken.....	38
8.3	Berechnen der Oberfläche aus der Punktwolke	39
8.4	Abschätzen der Genauigkeit der TLS-Messungen.....	41
8.4.1	Genauigkeit der Punktwolke.....	41
8.4.2	Höhengenauigkeit des Oberflächenmodells	41
8.4.3	Genauigkeitsabschätzung des Laserscanners.....	42
8.5	Fazit.....	43
9	Datenauswertung UAV.....	44
9.1	Datenaufbereitung im Felde.....	45
9.2	Datenauswertung im Büro.....	46
9.3	Höhengenauigkeit Oberflächenmodell aus UAV Daten	48
9.4	Fazit.....	48
10	Analysen und Visualisierungen	49

10.1	Fotografischer Vergleich 1923 - 2015	49
10.2	Zeitreihen aus Luftbildern 1939 - 1973 - 2000 - 2015.....	49
10.3	Vergleich 1939 - 2015 mit Flugbilddaten	52
10.3.1	Oberflächenvergleich aus Flugbilddaten	53
10.3.2	Volumenanalyse aus Luftbilddaten	54
10.3.3	Profile aus Luftbilddaten	56
10.4	Vergleich 2012 - 2015 mit TLS-Daten	59
10.4.1	Oberflächenvergleiche aus TLS Daten.....	59
10.4.2	Volumenanalysen aus TLS Daten.....	62
10.4.3	Profile aus TLS-Daten	63
10.5	Verschiebungsplan der Fix- und Kontrollpunkte.....	65
10.6	Visualisierungen der UAV-Daten 2015	66
10.7	Fazit.....	70
11	Vergleich TLS versus UAV.....	71
11.1	Oberflächenvergleich TLS - UAV 2015	71
11.2	Zeit- und Kostenschätzung.....	72
11.3	Fazit.....	74
12	Diskussion.....	75
13	Empfehlungen.....	77
13.1	Empfehlungen für die dritte Folgemessung.....	77
13.2	Empfehlungen zur generellen Überwachung von Blockgletschern	79
14	Ausblick.....	80
	Abbildungsverzeichnis.....	81
	Tabellenverzeichnis	83
	Abkürzungsverzeichnis.....	84
	Literaturverzeichnis	85
	Anhang.....	88

1 Einleitung

Blockgletscher sind eher ein unbekanntes Naturphänomen. Viele Wanderer realisieren beim Vorbeigehen an einem Blockgletscher nicht, dass es sich bei diesem „Geröllhaufen“ nicht nur um Steine handelt, sondern um einen Blockgletscher. Bei genauerem betrachten kann die Zungenform und die spezielle Oberflächenstruktur erkannt werden. Blockgletscher sind ein gefrorenes Gebilde aus Schutt und Geröll. Sie kriechen einige Zentimeter bis Meter pro Jahr Talabwärts. In der Schweiz kommen Blockgletscher vor allem in Niederschlagsarmen Tälern in Graubünden und im Wallis vor (Frauenfelder / Roer, 2007: 34).

Das Verhalten von Blockgletschern ist speziell für Klimaforscher interessant. Sie beschäftigen sich mit der Fragestellung, wie das Fließverhalten der Blockgletscher mit der Klimaveränderung zusammenhängt. Blockgletscher werden bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts erforscht und vermessen. Früher wurden Blockgletscher mit einfachen Messverfahren und Methoden aufgenommen. Heutzutage werden sie mit modernsten technischen Messgeräten wie etwa mit terrestrischem Laserscanning (TLS) oder mit Drohnen, sogenannte unmanned aerial vehicles (UAV) vermessen.

Das Terrestrisches Laserscanning und die Drohnenvermessung haben sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt und an Popularität gewonnen. Beides sind flächenhafte Aufnahmeverfahren, mit denen Millionen von Punkten generiert werden können. Sie ergänzen die herkömmlichen Vermessungsmethoden wie Tachymetrie und Satellitennavigation.

In der vorliegenden Bachelor-Thesis wird aufgezeigt, wie sich die beiden Methoden TLS und UAV für Blockgletschervermessungen eignen. Aufbauen auf die beiden Bachelor-Thesen von 2010 (Lerch / Wüthrich, 2010) und 2012 (Arpagaus / Joss, 2012), wird die zweite Folgemessung des Blockgletschers Macun und deren Auswertung beschrieben. Es werden verschiedene Deformationsanalysen mit unterschiedlichen Methoden und Jahresständen berechnet und präsentiert. Weiter wird eine Empfehlung für das weitere Monitoring von Blockgletschern dargelegt. Am Ende wird ein Ausblick gegeben und auf weiterführende Forschungsmöglichkeiten hingewiesen.

2 Auftragsanalyse

Der zu vermessende Blockgletscher befindet sich im Schweizerischen Nationalpark im Gebiet Macun. Er wird seit 1965 regelmässig tachymetrisch punktuell von Mitarbeitenden der Universität Karlsruhe vermessen. Im Jahr 2010 wurde der Blockgletscher erstmals im Rahmen einer Bachelor-Thesis mittels TLS (HDS4400) aufgenommen (Lerch / Wüthrich, 2010). Zwei Jahre danach wurde die erste Folgemessung ebenso mittels TLS (HDS8800) durchgeführt (Arpagaus / Joss, 2012). Auch sind Luftbilder aus verschiedenen Jahren vorhanden. Ein Geländemodell aus dem Jahr 1939, welches aus Flugbilddaten generiert wurde, stand ebenfalls als Grundlage zur Verfügung.

Die Aufgabe dieser Bachelor-Thesis bestand darin die zweite Folgemessung durchzuführen und auszuwerten. Der Blockgletscher soll mit Leica MS50 Geräten (Leica Geosystems, 2013) gescannt werden. Zusätzlich wird eine photogrammetrische Erfassung mit einer Drohne (eBee, (senseFly Ltd, 2014)) gefordert. Mit den aufgenommenen Daten soll eine Verschiebungs-, Bewegungs- und Volumenanalyse durchgeführt werden. Der Auftraggeber, der Schweizerische Nationalpark, erwartet ein besonderes Augenmerk bei der Erfassung und Analyse in den Bereichen der Gletscherzunge sowie des oberen Teils des Blockgletschers, da dort die grössten Veränderungen zu erwarten sind. Mit dem Geländemodell von 1939 soll eine langjährige Massenbilanz berechnet werden.

Die erzielten Resultate sind zu analysieren und visualisieren, damit der Schweizerische Nationalpark entsprechende Schlüsse daraus ziehen kann. Ausserdem soll eine Empfehlung für die nächste Folgemessung, sowie generell für die Überwachung von Blockgletschern erarbeitet werden.

Der Auftrag ist im *Anhang A1 Aufgabenstellung* ersichtlich. Die Auftragsanalyse kann im Detail im *Anhang A2 Projektmanagement* in Kapitel 2 nachgelesen werden. Ein erstelltes Datenorganisations- und Datensicherungskonzept ist in *Anhang A4 Datenorganisations- und Datensicherungskonzept* abgelegt.

3 Der Blockgletscher

In diesem Kapitel wird der Blockgletscher zuerst allgemein beschrieben. Anschliessend wird spezifisch auf den Blockgletscher im Gebiet Macun eingegangen. Zum Schluss wird noch auf andere Vermessungsprojekte an Blockgletschern verwiesen.

3.1 Grundlagen über Blockgletscher

Ein Blockgletscher (engl. *rock glacier* oder *rockglacier*), früher auch Blockstrom genannt, ist ein zungenförmig gefrorenes Gebilde aus Schutt und Geröll, welches hangabwärts kriecht (Barsch, 1992: 176).

Fälschlicherweise wird der Begriff Blockgletscher von Laien meist mit einem klassischen Eisgletscher assoziiert. Wer zum ersten Mal zu einem Blockgletscher wandert, ist eventuell enttäuscht, da an Stelle eines klassischen Eisgletschers nur Geröll sichtbar ist. Der Begriff des Blockgletschers ist etwas unglücklich gewählt, da er verwirrend wirken kann. Doch Gletscher und Blockgletscher haben auch einige Gemeinsamkeiten. Beide bewegen sich, sind gefroren und bilden an der Oberfläche eine Fließstruktur. Der Blockgletscher ist aber laut Definition keine Untergattung des Gletschers sondern ein eigenes Naturphänomen (Lozza et. al., 2012 B: 8).

Blockgletscher kommen im Hochgebirge überall auf der Erde vor. Sie befinden sich nicht nur in den europäischen Alpen, sondern auch in den Anden, Rocky Mountains, Pyrenäen, Kaukasus, Himalaya, Neuseeländischen Alpen und vielen weiteren Gebirgen (Käab, 2007: 2236).

3.1.1 Entstehungsbedingungen

Klimatische Voraussetzungen

Ein Blockgletscher kann nur unter gewissen klimatischen Voraussetzungen entstehen. Das Gebiet muss grösstenteils so kalt sein, dass das Eis im Blockgletscher erhalten bleibt und es muss trocken genug sein, dass sich anstatt des Blockgletschers kein Eisgletscher bilden kann. Zusätzlich muss der Boden im Untergrund dauerhaft gefroren sein und im Sommer nur oberflächennah auftauen. Sogenannter Permafrost findet man in den Alpen in nördlichen Lagen auf einer Höhe ab 2500 m ü. M. und in südlichen Lagen ab etwa 3000 m ü. M. In der Schweiz befinden sich die Blockgletscher vor allem in den niederschlagsarmen Tälern im Graubünden und im Wallis. Wenn der Blockgletscher permafrostloses Gelände erreicht (durch das talabwärts Kriechen, oder das Steigen der Permafrostgrenze), schmilzt das Eis in seinem Inneren und ein aktiver Blockgletscher kann zu einem inaktiven oder relikten Blockgletscher werden (siehe Kapitel 3.1.3).

Geologische Voraussetzungen

Ein Blockgletscher muss zusätzlich auch geologische Bedingungen erfüllen. Es benötigt genügend Lockergestein und eine gewisse Hangneigung, damit der Blockgletscher sich fortbewegen kann. Ausserdem muss eine Felswand vorhanden sein, welche regelmässig Schutt, Geröll und im Winter auch Schnee nachliefert, damit die Wurzelzone (siehe Abbildung 2) laufend mit neuem Material gespeist wird. Abhängig von diesem Materialangebot und dem Relief entwickeln Blockgletscher ihre eigene Dimension und Mischung (Käab, 2007: 2236), (Frauenfelder / Roer, 2007: 34), (Lozza et. al., 2012 A: 4-5).

In der folgenden Abbildung 1 sind die wichtigsten Voraussetzungen eines Blockgletschers noch einmal schematisch dargestellt.

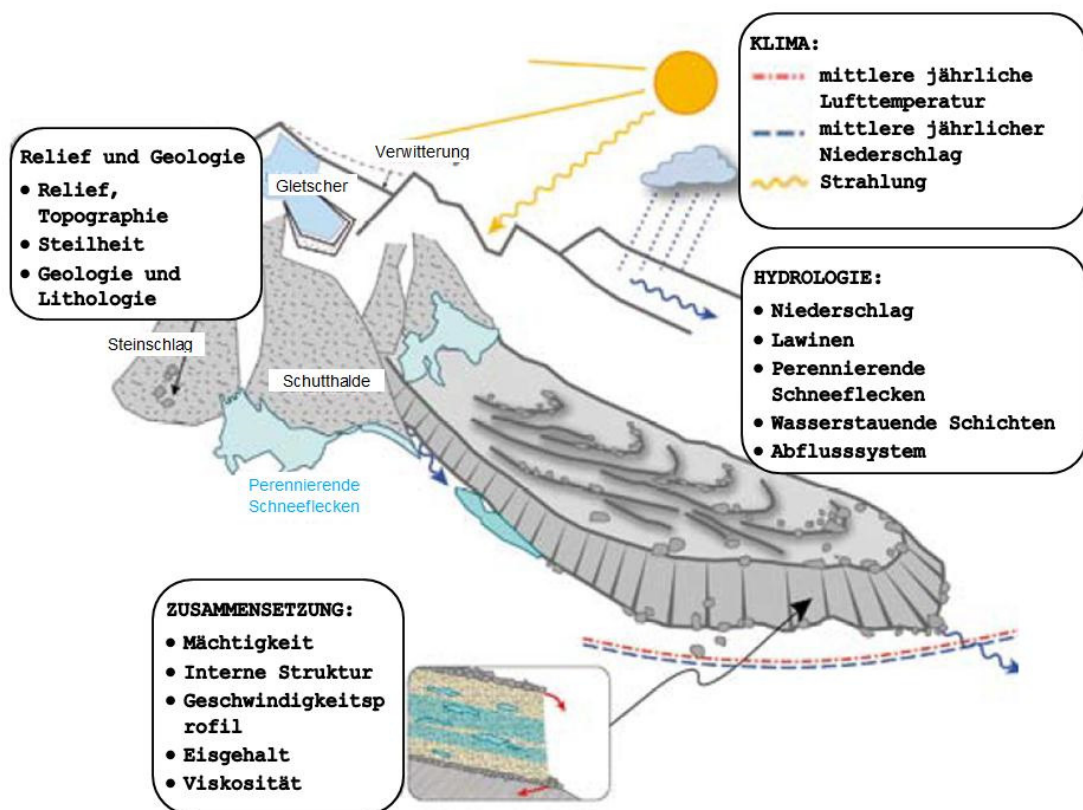


Abbildung 1: Voraussetzungen eines Blockgletschers (Frauenfelder / Roer, 2007), überarbeitet von Arpagaus / Joss (2012)

3.1.2 Aufbau eines Blockgletschers

Ein Blockgletscher ist aus verschiedenen Elementen zusammengesetzt. Oberhalb des Blockgletschers braucht es eine Schuttliefernde Felswand, welche die Wurzelzone des Blockgletschers mit Material versorgt. Die Wurzelzone ist sogleich auch der Beginn des Blockgletschers. Sie ist nicht immer eindeutig klassifizierbar. Auf dem Blockgletscher sind Kriechwülste zu erkennen, welche konvexförmig in Richtung Tal zeigen. Sie lassen auf eine ständige Bewegung des Blockgletschers schliessen. Im unteren Teil besitzt jeder Blockgletscher eine Zunge, welche sich langsam Talabwärts bewegt. Ganz vorne befindet sich die Front, auch Stirn genannt. Sie hat normalerweise eine übersteile und labile Böschung, die ein Anzeichen für ein langsames Vorrücken zeigt. Der Blockgletscher rückt dann vor, wenn indem die unterste Schicht von der mittleren und obersten Schicht überschüttet wird (Frauenfelder / Roer, 2007: 34), (Jäckli, 1978).

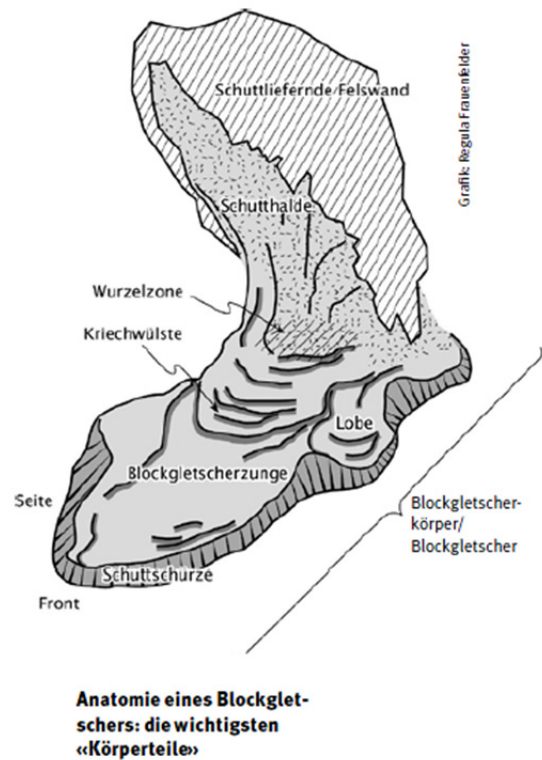


Abbildung 2: Aufbau eines Blockgletschers (Frauenfelder / Roer, 2007)

3.1.3 Aktivitätsgrade

In Frauenfelder / Roer (2007: 34-35) und Käab (2007: 2240) werden drei verschiedene Arten von Blockgletschern unterschieden: aktiv, inaktiv und relikte Blockgletscher. Dabei handelt es sich um rein theoretische Abgrenzungen. In der Praxis besteht ein fließender Übergang zwischen den drei Stadien.

Aktive Blockgletscher

Sie bewegen sich um einige Zentimeter bis Meter pro Jahr talabwärts. Ein markantes Zeichen eines aktiven Blockgletschers ist seine steile Front mit mehr als 35 Grad Gefälle, mit losen Blöcken und kaum einer Vegetation. Die Eisstruktur des aktiven Blockgletschers ist intakt und die Bodentemperaturen sind immer im Minusbereich, ausser an der äussersten Schicht, welche in den Sommermonaten auftauen kann.

Inaktive Blockgletscher

Die inaktiven Blockgletscher bewegen sich nicht mehr signifikant. Sie beinhalten in ihrem Inneren noch etwas Eis, welches aber nicht mehr zusammenhängend ist. Der Untergrund

besteht noch aus Permafrost. Die Schicht, welche jährlich im Sommer schmelzen kann, ist dicker als bei aktiven Blockgletschern. Die Front des inaktiven Blockgletschers ist weniger steil, als die des aktiven Blockgletschers. Sie besitzt stabilere Blöcke und eine gebietsweiser Vegetation. Es wurden bereits inaktive Blockgletscher gefunden, die nach einer Klimaveränderung wieder zu aktiven Blockgletschern reaktiviert worden sind.

Relikte Blockgletscher

Bei relikten Blockgletschern ist das ganze Eis geschmolzen und der Untergrund enthält kein Permafrost mehr. Die typische Struktur des Blockgletschers (Stirn, Gräben und Rücken) ist jedoch noch ersichtlich. Der Blockgletscher ist teils mit einer dichten Vegetation und auch kleinen Bäumen bewachsen.

3.2 Der Blockgletscher Macun

Der Blockgletscher Macun liegt im Unterengadin des Kantons Graubündens im Gebiet des Schweizerischen Nationalparks (SNP) zwischen Zernez und Lavin (siehe Abbildung 3).

3.2.1 Der Schweizerische Nationalpark

Als erster Nationalpark Mitteleuropas wurde der Schweizerische Nationalpark 1914 gegründet, um die unberührte Natur zu erhalten, zu beobachten und ihren Wert aufzuzeigen. Mit seinen 170 km² ist er zugleich auch das grösste Wildnisgebiet der Schweiz. Der Park erstreckt sich über eine Höhenlage von 1400 m ü. M. (Clemgia/Scuol) bis 3174 m ü. M. (Piz Pisoc). Im Jahre 2000 konnte das Nationalparkgebiet um die 3.6 km² grosse Seenplatte von Macun erweitert werden. Den Nationalpark durchstreift ein 80 km langes Wandernetz, welches zum Schutz der Natur nicht verlassen werden darf (SNP, 2015 A).

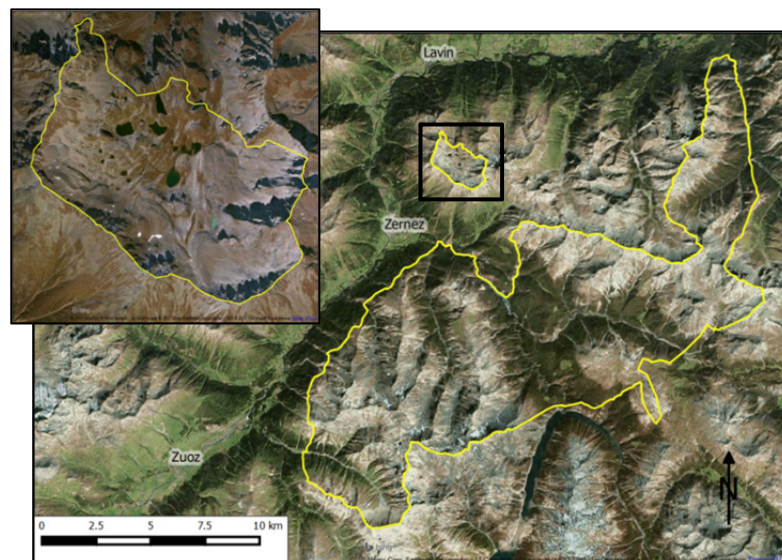


Abbildung 3: Gebiet des Schweizerischen Nationalparks (Microsoft, 2015), (SNP, 2015 B)

In Abbildung 3 ist der Nationalpark dargestellt. Im Ausschnitt oben links ist das Gebiet Macun vergrössert abgebildet.

Die nachfolgenden Ziele (SNP, 2008) des Schweizerischen Nationalparks gliedern sich in drei Kategorien, welche im Dreiklang zueinander stehen.

Naturschutz

Der Nationalpark will die Vision der Parkgründer weiterführen, den Nationalpark weiterentwickeln und vor menschlichen Einflüssen schützen. Dabei darf sich die Natur frei entfalten. Es ist wichtig, dass natürliche Prozesse zugelassen werden und dass zur Erhaltung einzelner Arten oder Lebensgemeinschaften nicht in die Natur eingegriffen wird.

Forschung

Der Nationalpark bietet eine einzigartige Chance, Forschungen in einem Gebiet zu betreiben, das von menschlichen Einflüssen verschont bleibt. Dabei erlangt man Einsicht in natürliche Vorgänge und das Verhältnis zwischen Mensch und Natur. Der Nationalpark initiiert und koordiniert Forschungsvorhaben und führt auch eigene Erhebungen zur Darstellung langfristiger Entwicklungen durch.

Information

Der Nationalpark ermöglicht den Menschen das Erlebnis einer unberührten Wildnis und will sie für den Schutz der Natur sensibilisieren. Auf den Wanderungen im Gelände und bei einem Besuch des Besucherzentrums in Zernez werden Informationen und Besonderheiten der Natur im Nationalpark aufgezeigt. Das Besucherzentrum soll den Besucher einerseits von der Nationalparkidee überzeugen sowie ihn als Botschafter gewinnen und andererseits dient der Nationalpark auch als Tourismusangebot der Region und fördert indirekt die lokale Wirtschaft.

3.2.2 Geologie und Geografie von Macun

Das Gebiet Macun liegt in einem Talkessel, der in Richtung Lavin geöffnet ist. Im Gebiet Macun gibt es 23 Seen, eine vielfältige Pflanzen- und Tierwelt und zahlreiche Blockgletscher (Lozza, 2000: 19). Beim dem zu vermessenden Blockgletscher handelt es sich um den grössten Blockgletscher im Gebiet, welcher in Abbildung 4 rot dargestellt. Er hat eine ungefähre Ausdehnung in Fliessrichtung von 600 m (Süd – Nord) und ist etwa 300 m breit (Ost – West). Die Höhendifferenz beträgt zirka 125 m.

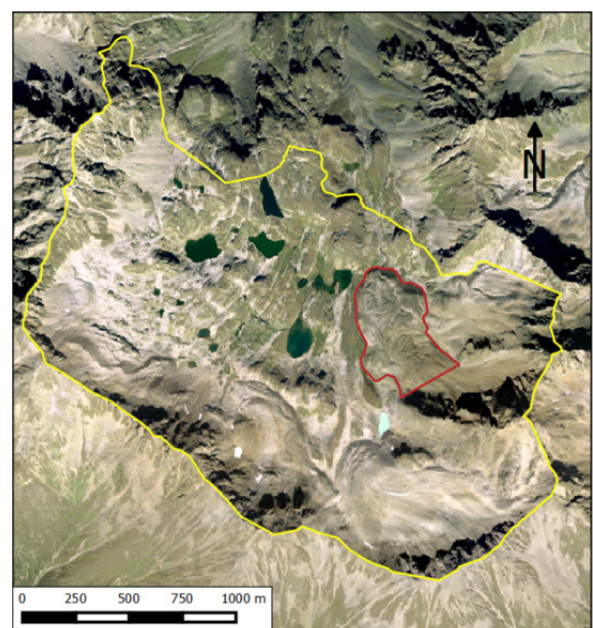


Abbildung 4: Standort Blockgletscher Macun (Microsoft, 2015), (SNP, 2015 B)

Entstehung des Blockgletschers in Macun

Vor 13'000 Jahren wurde das heutige Gebiet Macun nach der Vergletscherung wieder eisfrei. Erste Kartierungen um 1850 in Form der Urausgabe der Dufourkarte ergaben, dass im Gebiet Macun noch zwei Gletscher existieren. Erneute Kartierungen von D. Barsch in den 1960er Jahre ergaben, dass ein weiterer Gletscher existiert haben muss, der sich oberhalb des heutigen Hauptblockgletschers befand. Seit dem Jahr 1850 sind diese Gletscher bis auf wenige Kubikdekameter geschmolzen. Nachdem sich die Gletscher zurückgebildet haben, wurden die verbleibenden End- oder Seitenmoränen als Blockgletscher reaktiviert.

Im Gegensatz zu den kleineren Blockgletschern liegt der Ursprung des Hauptblockgletschers im rückliegenden Kar, dessen umgrenzende Felswände grosse Verwitterungsschuttproduzenten sind und für Nachschub von mehreren Seiten sorgen (Inderbitzin / Pointner, 2001: 50-54).

Gestein

Im Gebiet Macun kommen hauptsächlich drei verschiedene Gesteinstypen vor, welche in den markanten Blockgletschern und den umliegenden Felswänden enthalten sind. Dies sind zum grösstenteils Orthogneise der Flüelagranitischen Assoziation, in kleineren Zonen Biotitgneise und in den Gratzonen Amphibolite. Aufgrund der intensiven mechanischen Verwitterung liefern alle drei Gesteinstypen ausserordentlich viel Schutt (Inderbitzin / Pointner, 2001: 50-54).

3.3 Blockgletscher als Messobjekt

Die Blockgletscherforschung begann mit Spencer (1900) in Nordamerika. Gut zwei Jahrzehnte später begann die Forschung über Blockgletscher auch in den Schweizer Alpen mit A. Chaix. Er entdeckte 1918 den Blockgletscher Val da l'Acqua im Schweizerischen Nationalpark. Damals war das Ziel vor allem die Oberflächengeschwindigkeit des Blockgletschers zu detektieren und zu überwachen (Jäckli, 1978: 213).

Im Gegensatz zu früher ist heute die Fragestellung interessant, wie Blockgletscher auf Klimaänderungen reagieren. Denn in den dicht besiedelten Alpen mit dem wachsenden Tourismus kommt es durchaus vor, dass Liftmasten oder andere Bauten auf Blockgletschergebieten gebaut werden. In diesem Fall spielen wirtschaftliche und gefahren technische Aspekte eine Rolle. Auf Grund der Verschiebungen kann es zu grossen Sachschäden an den Bauten kommen oder im schlimmsten Fall Menschenleben gefährden (Frauenfelder / Roer, 2007).

Bisher wurde angenommen, dass sich die veränderten Temperaturverhältnisse verzögert auf das Kriechverhalten des Blockgletschers auswirken, da die mächtige Schutt- und Geröllschicht des Blockgletschers das Eis im Inneren schützt und wie als Puffer wirkt. Neueste Messergebnisse zeigen jedoch starke raumzeitliche Schwankungen der Bewegungen, die auf eine Korrelation zwischen Temperaturanstieg und Bewegung schliessen lassen. Es werden auch verstärkt geophysikalische Methoden und Computermodelle eingesetzt. Da-

mit kann die interne Struktur von Eis, ungefrorenem Wasser und Geröll, sowie deren Mischung besser analysiert werden. Schlussendlich können die Daten der Computersimulationen mit denen der Blockgletscherbewegung kombiniert werden, um die Dynamik und dessen Form besser beschreiben zu können (Frauenfelder / Roer, 2007).

Ab dem Ende der 1990er Jahre wurde an vielen Blockgletschern in den europäischen Alpen eine markante Geschwindigkeitszunahme beobachtet. Im Sommer 2003 erreichte diese ihr Maximum. Im darauffolgenden kühlen Sommer zeigte die Geschwindigkeitszunahme immer noch eine erhöhte, aber gleichwohl leicht abnehmende Tendenz. Auf die Geschwindigkeitszunahme reagiert nicht jeder Blockgletscher gleich. Sie kann dazu führen, dass auf der Oberfläche viele Gesteinsblöcke in Richtung Front befördert werden und sich ein grosses Schuttdepot auf der Zunge anhäufen kann. Dies wiederum bringt die Gefahr, dass Murgänge in sehr steilem Gelände ausgelöst werden können. Bei manchen Blockgletschern führt die erhöhte Kriechgeschwindigkeit zu einem Ungleichgewicht zwischen Massentransport und der Schuttlieferung aus den umliegenden Felswänden. Falls zu wenig Schutt nachgeliefert wird, kann der Blockgletscher inaktiv werden. Ein weiteres Szenario zeigt, dass bei der Erwärmung das Eis im Inneren des Blockgletschers ausschmilzt (Frauenfelder / Roer, 2007).

Heutzutage werden die Bewegungen von Blockgletschern mittels verschiedensten moderner Instrumente und Methoden ermittelt. Untenstehend wird auf einige Vermessungsprojekte an anderen Blockgletschern verwiesen. Die verschiedenen Messmethoden werden in Kapitel 4 vertieft behandelt.

Weiterführende Berichte anderer überwachter Blockgletscher:

- Schweiz: Val da l'Acqua, (Jäckli, 1978), (Lozza et. al., 2012 B)
- Schweiz: Val Sassa, (Lozza et. al., 2012 C)
- Österreich: Doesen, (Kaufmann / Ladstädter / Kienast, 2007)
- Spanien: Corral del Veleta, (Sanjose et. al., 2014)
- Bolivien: zahlreiche Blockgletscher, (Rangecroft et. al., 2014)

4 Messverfahren für die Überwachung von Blockgletschern

Wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, werden zahlreiche Blockgletscher messtechnisch überwacht. Dieses Kapitel beschreibt mögliche Methoden zur Vermessung von Blockgletschern. Dabei können die Messverfahren aufgrund ihrer Aufnahmeposition in zwei Kategorien unterteilt werden, in terrestrische und luftgestützte Messverfahren. Nachfolgend werden die einzelnen Verfahren kurz erläutert. Auf eine genaue Beschreibung dieser Verfahren wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

4.1 Terrestrische Messverfahren

Bei den terrestrischen Messmethoden ist der Aufnahmestandort bodengebunden. Dies bedeutet, dass das Terrain eine grosse Rolle in der Wahl der Aufnahmestandorte spielt.

Tachymetrie

Ein Tachymeter oder auch Totalstation genannt, ist ein Gerät zur Winkel- und Distanzmessung. Bei der Distanzmessung wird üblicherweise auf einen sogenannten Reflektor gemessen. Jedoch ist es heute auch möglich mittels eines Lasers auf beliebige Oberflächen zu messen. Mit dieser Technik können diskrete Punkte vermessen werden. Somit kann man ausgewählte Punkte in bestimmten Zeitabständen, zum Beispiel einmal im Jahr, einmessen und daraus langjährige Verschiebungen auf dem Blockgletscher detektieren. Des Weiteren ist es möglich eine Totalstation fix zu installieren, welche die diskreten Punkte fortlaufend, zum Beispiel alle 20 min, misst. Voraussetzung für eine automatische Messung der Punkte ist jedoch ein Reflektor. Nur dieser kann automatisch von einer Totalstation angezielt werden. Nur bei einer Fixinstallation der Totalstation sowie der Reflektoren ist eine Permanentüberwachung möglich. Permanent bedeutet in diesem Fall, dass die Messungen in kurzen Abständen, also hochfrequent, stattfinden. Dies macht Sinn bei einer verhältnismässig schnell Fließbewegung des Blockgletschers (Mautz et. al., 2010).

Terrestrisches Laser Scanning (TLS)

Ein Laserscanner funktioniert ähnlich wie ein Tachymeter. Es werden auch Winkel und Distanzen gemessen. Jedoch lassen sich mit diesem Verfahren Objekte mit einer hohen Geschwindigkeit und flächendeckend abtasten. Somit werden keine bestimmten Punkte gemessen und es entsteht eine sogenannte Punktwolke (Heim, 2014: 42 ff.), (Staiger, 2003). Eine detaillierte Beschreibung und Zusammenstellung des TLS findet man in der Bachelorarbeit über den Blockgletscher Macun von 2012 (Arpagaus / Joss, 2012: 17 ff.).

Terrestrische Photogrammetrie

In der terrestrischen Photogrammetrie werden Fotos vom Boden aus aufgenommen, welche in der anschliessenden Auswertung zu einer Punktwolke und einem Oberflächenmodell verarbeitet werden können. Die Aufnahmen benötigen vergleichsweise wenig Zeit und die Auswertung ist in einem hohen Grade automatisierbar. Ein Nachteil entsteht bei der Wahl der Aufnahmepositionen durch die Topographie. Dadurch ist es möglich, dass das Zielgebiet nicht flächendeckend erfasst werden kann. Die erzielbare Genauigkeit hängt stark von der Aufnahmekonfiguration und der verwendeten Kamera ab (Ladstädter / Kaufmann, 2005).

Inklinometermessungen

Um die innere Struktur und die inneren Deformationsprozesse eines Blockgletschers erkennen und überwachen zu können, müssen Bohrlöcher erstellt und untersucht werden. Die Bewegungen eines Bohrlochs werden meist mit einem Inklinometer erfasst. Ein Inklinometer ist ein Neigungsmessgerät. Ein Beispiel eines Inklinometers ist in Abbildung 5a schematisch dargestellt. Dieses Messgerät erfasst die horizontalen Bewegungen im Innern eines Blockgletschers. Für die Führung des Inklinometers muss ein PVC-Rohr in das Bohrloch eingelassen werden. Das Spezialrohr hat vier Rillen, wovon je zwei diametral entgegengesetzt sind (siehe Abbildung 5b). Dabei wird das Messgerät durch das Bohrloch geführt und in regelmässigen Abständen die Neigung bestimmt. Mit mehreren Messungen lassen sich die relativen Bewegungen entlang des Bohrlochs bestimmen. Der Felsuntergrund wird dabei als fest angenommen und die Neigungen von unten nach oben erfasst (Arenson / Hoelzle / Springman, 2002: 123 ff.).

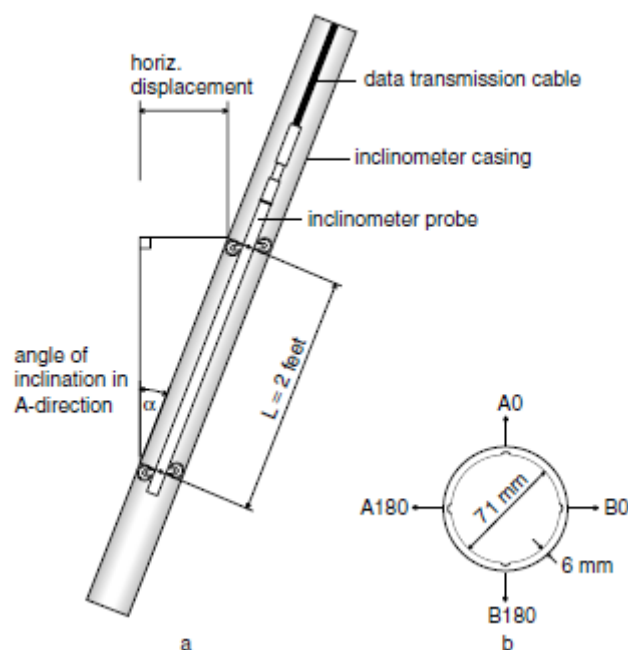


Abbildung 5: a) Längsschnitt durch einen Inklinometer in dem Führungsrohr; b) Querschnitt durch ein PVC-Rohr mit den Führungsrillen nach (Arenson / Hoelzle / Springman, 2002: 123)

Satellitenmesstechnik

Die Global Navigation Satellite System (GNSS) Messtechnik beruht auf der Distanzmessung zwischen einem Empfänger und den GNSS-Satelliten. Mit dieser Technik lassen sich diskrete Punkte mit einer hohen Genauigkeit messen. Voraussetzung für eine Messung mit GNSS ist eine direkte Sichtverbindung zu mindestens vier Satelliten. Somit darf der zu messende Punkt gegen den Himmel keine Abdeckung haben. Durch eine fixe Installation eines Empfängers ist eine Permanent-überwachung von Punkten möglich (Mautz et. al., 2010).

4.2 Luftgestützte Messverfahren

Bei den luftgestützten Messverfahren werden die Aufnahmen aus der Luft getätigt. Um eine höhere Genauigkeit bei der Georeferenzierung zu erreichen, werden heutzutage noch Passpunkte im und um das Messgebiet signalisiert und gemessen.

Airborne Laser Scanning (ALS)

Eine Möglichkeit Objekte aus der Luft zu erfassen ist das ALS. Dabei wird auf einer luftgestützten Plattform wie zum Beispiel einem Flugzeug oder einem Helikopter ein Laserscanner montiert. Das Besondere bei dieser Aufnahmemethode ist, dass bei jeder Punktmessung die Aufnahmeposition durch die Flugbewegung variiert. Diese Besonderheit bedingt, dass die Position und Ausrichtung des Sensors zu jedem Zeitpunkt genau bekannt sein muss. Dafür wird meistens ein Positionierungs- und Orientierungssystem verwendet, welches ein GNSS-Empfänger kombiniert mit einer Inertial Measuring Unit (IMU) enthält. Wie beim TLS ist das Resultat der Messungen eine Punktwolke (Wehr / Lohr, 1999: 75), (Landtwing, 2005: 4), (Favey, 2001: 3).

Luftgestützte Photogrammetrie

Die luftgestützte Photogrammetrie funktioniert sehr ähnlich wie die terrestrische Photogrammetrie. Bei der Photogrammetrie aus der Luft gibt es zwei verschiedene Arten von Plattformen. Zum einen kann dies ein Flugzeug, ein Helikopter oder Ähnliches sein. Eine andere Möglichkeit einer Plattform stellt das UAV dar. Bei beiden Arten werden die Aufnahmen mittels einer Fotokamera erstellt. Das Foto wurde früher analog und wird heute meistens digital aufgenommen. Die so erstellten Bilder werden miteinander über einen gemeinsamen Bereich (Überlappung) verknüpft. Daraus kann zum Beispiel ein Orthophoto oder ein Oberflächenmodell erstellt werden. Weiter können Koordinaten einzelner Punkte berechnet oder auch ganze Punktwolken generiert werden. Die Auswertung ist zu einem hohen Grade automatisierbar und durch diverse Softwarepakete umgesetzt (Eisenbeiss, 2009: 2 ff.), (Debella-Gilo / Käab, 2012: 44).

4.3 Vergleich der Messverfahren

Der grosse Vorteil der luftgestützten Messmethoden liegt darin, dass das zu erfassende Gebiet nicht oder nur teilweise zugänglich sein muss. Weiter ist mit einer Aufnahme aus der Luft meist eine flächendeckende Aufnahme möglich, da das Terrain die Sicht nicht so stark beeinflusst wie bei den terrestrischen Verfahren. Je nach Plattform können hohe Kosten für den Flug anfallen, jedoch ist die Aufnahmezeit im Allgemeinen kürzer als bei den Messungen vom Boden aus.

Bei den terrestrischen Messverfahren gibt es Einzelpunktverfahren und flächenabtastende Verfahren. Die Einzelpunktverfahren sind geeignet um wenige Punkte präzise zu beobachten und Aussagen über diskrete Punkte eines Blockgletschers zu machen. Die Auswertung dieser Messungen ist im Gegensatz zu Mehrpunktverfahren relativ einfach, da nur die Koordinaten eines Punktes aus verschiedenen Messzeitpunkten verglichen werden. Ein weiterer Vorteil der Einzelpunktverfahren besteht darin, dass Permanentüberwachungen möglich sind. Die Mehrpunktverfahren sind jedoch geeignet um Aussagen über das ganze Ausdehnungsgebietes des Blockgletschers zu erhalten. Hierbei ist die Genauigkeit eher schlechter, da keine diskreten Punkte verglichen werden können, sondern Oberflächen, Querprofile, Begrenzungen et cetera gegenübergestellt werden. Dies bedeutet auch einen grösseren Aufwand bei der Auswertung. Der grosse Vorteil dabei ist, dass der Blockgletscher flächendeckend beobachtet und beurteilt und so die örtlich unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten erfasst werden können.

Die Inklinometermessungen eignen sich sehr gut um Aufschluss über das innere des Blockgletschers zu erhalten. Jedoch ist diese Methode sehr aufwändig und kostenintensiv, da die Maschinen nur schwierig und mit hohem Aufwand auf einem Blockgletscher installiert werden können.

Die Auswertung der Messdaten hängt mehr von der Aufnahmemethode, als vom Aufnahmestandort ab. Zum Beispiel sind die Auswertungen von Laserscanningdaten aus TLS und ALS sehr ähnlich, aber unterschiedlich zu den Auswertungen der photogrammetrischen Aufnahmen aus der Luft oder vom Boden aus.

5 Testmessungen

Für die Planung der Messarbeiten mussten vorgängig einige Testmessungen durchgeführt werden. Nachstehend sind diese dokumentiert.

5.1 Leica Nova MS50 MultiStation

Die Aufgabenstellung sah vor, den Blockgletscher Macun mit Leica MS50 Instrumenten zu scannen. Jedoch liegen bei der Fachhochschule für die Scanfunktion bei diesen Geräten noch wenige praktische Tests vor. Laut dem Datenblatt der MS50 (Leica Geosystems, 2013) sind Messungen bis zu einer Distanz von einem Kilometer möglich, jedoch nur bei optimalen Bedingungen und einer Reflektivität des Zielobjektes von 90%. Deshalb wurde vorgängig die MS50 in der Praxis auf ihre Funktionstüchtigkeit betreffend des Scannings getestet. Vor allem sollte herausgefunden werden, mit welchen Einstellungen Scans auf die geforderten Zielweiten möglich sind.

Als Erstes wurden die Anforderungen an die Aufnahmen des Blockgletschers aus der Bachelor-Thesis von Arpagaus / Joss (2012) abgeleitet. Dabei wurde eine Auflösung von 2 cm auf 100 m angenommen. Das ergibt einen Punktabstand von 10 cm auf eine Distanz von 500 m. Dies entspricht etwa der mittleren erwarteten Distanz für die Blockgletscher-messungen in Macun.

Für die praktischen Untersuchungen wurde das Gebiet Lachmatt zwischen Muttenz und Pratteln (siehe Abbildung 6) gewählt, von welchem man eine gute Sicht auf die Kiesgrube nahe den Bahnlagen hat. Die Distanz zu der Kiesgrube beträgt zirka 760 m und ist somit etwas länger als die erwartete maximale Aufnahmedistanz beim Blockgletscher Macun (700 m). Weiter konnte an diesem Ort auf die alte Wartenburg gemessen werden, welche eine Distanz zum Instrument von zirka 500 m hatte.

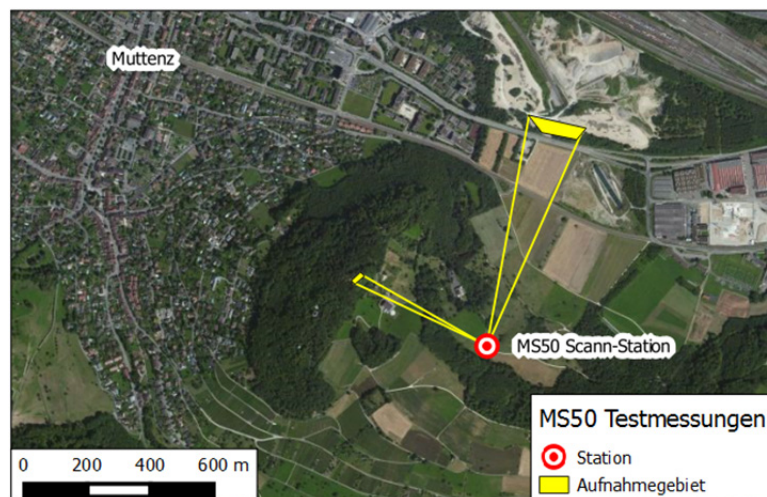


Abbildung 6: Testmessungen Lachmatt (Microsoft, 2015)

Die Messbedingungen waren gut, jedoch flimmerte die Luft ein wenig (sonnig, windstill, 20 Grad). Es wurden diverse Scans mit verschiedenen Einstellungen durchgeführt (siehe Tabelle 1). Variiert wurden die Parameter Rasterweite, Geschwindigkeit und Distanzfilter sowie der Zielbereich. Je weiter das Zielobjekt entfernt ist, desto langsamer ist die Scangeschwindigkeit einzustellen (Leica Geosystems, 2013). Die Rasterweite wurde grösser als in Macun gewählt und der Zielbereich eher klein gewählt. Damit konnte die Scandauer stark reduziert werden. Nur beim ersten Scan wurde ein grösserer Bereich definiert, um die ungefähre Zeit einer Messstation in Macun abschätzen zu können.

Scan Name	Bereich	Mittlere Distanz [m]	Rasterweite [cm] oder über Winkel	Zeit [min]	Geschwindigkeit [pt/s]	Anzahl gemessener Punkte
Burg1	Alte Wartenburg, alles sichtbare	500	10	105	62	0
K1	Kieshaufen, sehr kleiner Ausschnitt	760	15	10	1	1
Burg2	Alte Wartenburg, kleiner Ausschnitt	500	15	6	62	6
Strasse	Kiesstrasse vor Instrument	5	2	1	1000	3786
Burg4	Alte Wartenburg, sehr kleiner Ausschnitt	500	15	1	62	0
Burg5	Alte Wartenburg, sehr kleiner Ausschnitt	500	Raster mittels Winkel: 0.0192 gon	1	62	2
Wald	Kleiner Ausschnitt Wald	200	Winkel: 0.0192 gon	2	1000	2
Burg6	Alte Wartenburg, sehr kleiner Ausschnitt	500	Winkel: 0.0192 gon	8	1	409

Tabelle 1: Durchgeführte Scans mit der MS50 in Lachmatt

Aus der Tabelle 1 ist ersichtlich, dass nur bei zwei der durchgeführten Scans tatsächlich Punkte aufgezeichnet wurden, respektive dass nur bei wenigen Punkten eine Distanzmessung möglich war. Zum einen wurde die MS50 getestet, ob sie allgemein nicht richtig scannt, oder ob es an den Einstellungen und der Zielweiten liegt. Dafür wurde die Strasse direkt vor dem aufgestellten Scanner gescannt. Zum anderen konnte mit der Einstellung von nur einem Punkt pro Sekunde auf die alte Wartenburg gescannt werden.

Nach einer kurzen Besichtigung der Daten in der Software Cyclon von Leica Geosystems wurden weitere Scans auf dem Dach der Fachhochschule durchgeführt (siehe Tabelle 2). Vom Dach aus, kann auf die Baustellengrube des neuen FHNW Campus gemessen werden. Mit diesen zusätzlichen Messungen konnten kürzere Distanzen auf ein steinartiges Ziel getestet werden.

Scan Name	Bereich	Mittlere Distanz [m]	Rasterweite [cm]	Zeit [min]	Geschwindigkeit [pt/s]	Anzahl gemessene Punkte
Dach1	Kieshaufen Kubuk-Baustelle	380	30	1	250	0
Dach2	Kieshaufen Kubuk-Baustelle	380	30	2	62	1
Dach3	Kieshaufen Kubuk-Baustelle	380	30	22	1	739
Dach4	Aushubstelle Kubuk-Baustelle	280	30	0.5	1000	0
Dach5	Aushubstelle Kubuk-Baustelle	280	30	0.5	250	11
Dach6	Aushubstelle Kubuk-Baustelle	280	30	1	62	265

Tabelle 2: Durchgeführte Scans auf dem Dach der FHNW

Es ist aus der Tabelle 2 ersichtlich, dass auch hier nur bei zwei Einstellungen genügend Punkte gespeichert wurden. Auf den etwas weiter entfernten Kieshaufen konnte nur mit einem Punkt pro Sekunde gescannt werden. Jedoch konnte auch diese Geschwindigkeit nicht wirklich erreicht werden, da der Scan 22 min statt wie von der Software errechnete 9 min dauerte. Es war gut festzustellen, dass bei Punkten, auf welchen eher mit einem schleifenden Winkel gemessen wurde, die Messzeit deutlich länger als eine Sekunde betrug. Auf Flächen, welche etwa senkrecht zum Messstrahl standen, konnte besser gemessen werden. Der zweite Scan, welcher ein brauchbares Resultat lieferte, wurde auf die Aushubstelle der Baustelle gemessen. Die Geschwindigkeit wurde bei diesem Scan auf 62 Punkten pro Sekunde gesetzt. Die vorausgerechnete Zeit konnte hier eingehalten werden, jedoch wurden nicht alle Punkte wirklich gemessen. Bei diesem Scan wurden insgesamt nur 265 Punkte aufgenommen. Bei einer Zeit von 1 min und der Geschwindigkeit von 62 Punkten pro Sekunde müssten theoretisch 3720 Punkte aufgezeichnet werden, wovon jedoch einige durch Filterung von unbrauchbaren Messungen wegfallen. Bei den Scans mit höherer Geschwindigkeit, konnte auf dieses Ziel von etwa 280 m Entfernung kein brauchbares Resultat erzielt werden. Dies obwohl laut Hersteller auch mit 1000 Punkte pro Sekunde bis 300 m gemessen werden könnte (Leica Geosystems, 2013).

Fazit der MS50 Testmessungen

Von den vielen gemessenen Scans lieferten nur wenige brauchbare Resultate. Die Scangeschwindigkeit musste viel tiefer angesetzt werden, als dies möglich sein sollte. Die Einstellung der Rasterweite scheint keinen Einfluss auf die Messbarkeit der Punkte zu haben. Diese Resultate lassen auf eine schlechte Reflektivität des Zielpunktes und nicht optimale Messbedingungen schliessen.

Wie aus der Tabelle 1 und der Tabelle 2 ersichtlich ist, kann nur mit der Einstellung von einem Punkt pro Sekunde auf eine Distanz von etwa 400 m gemessen werden. Für maximale Distanzen von 700 m, wie sie in Macun erwartet werden, konnte keine Einstellung gefunden werden, welche ein brauchbares Resultat liefert.

Auch wenn mit mehreren Instrumenten gemessen werden könnte, ist die Scangeschwindigkeit viel zu langsam, um in einer Woche ein so grosses Objekt, wie der Blockgletscher Macun, aufnehmen zu können. Zusätzlich zu diesen Zeitgründen trug die beschränkte Reichweite der MS50 dazu bei, dass dieses Instrument für die vorliegende Arbeit als untauglich befunden wurde.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde ersatzweise der Riegl Scanner VZ-4000 von der ETH Zürich ausgeliehen.

5.2 Der Riegl VZ-4000 Scanner und die eBee Drohne

Mit dem Riegl VZ-4000 Scanner und der eBee Drohne von senseFly konnten wenige Testmessungen durchgeführt werden. Diese Tests konnten lediglich benutzt werden, um sich mit dem Handling der Geräte vertraut zu machen. Die erzeugten Daten konnten teilweise zur Erprobung der Auswertung verwendet werden. Genauigkeitsuntersuchungen wurden mit den Daten aus der Messkampagne durchgeführt.

6 Messkampagne Macun

Mit der Messkampagne werden die Daten 2015 des Blockgletschers Macun erfasst. In diesem Kapitel werden zuerst die verschiedenen Vorbereitungen beschrieben und danach wird auf die Messwoche in Macun eingegangen.

6.1 Vorbereitung Messkampagne

Eine gute Vorbereitung (Koordination / Logistik) ist wichtig, da das Messgebiet nur durch einen mehrstündigen Fussmarsch erreichbar ist. Die Vorbereitung der Messkampagne setzt sich aus der Analyse des Grundlagennetz 2012 und der Rekognoszierung zusammen.

6.1.1 Grundlagennetz 2012

Ein im Zuge der Bachelor-Thesis von Arpagaus und Joss im Jahr 2012 erstelltes Grundlagennetz (siehe Abbildung 7) wurde analysiert. Das Netz ist gut aufgestellt und das ganze Gebiet des Blockgletschers kann damit abgedeckt werden. Jedoch muss bei der Rekognoszierung geprüft werden, ob alle Punkte noch vorhanden sind. Gesamthaft besteht das Grundlagennetz 2012 aus 13 Fixpunkten und Elf Kontrollpunkten.



Abbildung 7: Grundlagennetz 2012 (nicht massstäblich)
(Arpagaus / Joss, 2012: 51)

6.1.2 Rekognoszierung

Die Rekognoszierung fand am Sonntag 5. Juli 2015 statt. Sie wurde mit der Überschreitung von Zernez nach Lavin, der Wanderoute 21 (SNP, 2015 A) kombiniert. Anhand der detaillierten Fixpunkt-krokis, die 2012 von Arpagaus und Joss erstellt wurden, konnten alle 13 Fixpunkte problemlos gefunden werden. Mit dem Global Positioning System (GPS) des Mobiltelefons wurden die Kontrollpunkte auf dem Blockgletscher gesucht. Dies stellte sich als anspruchsvoll heraus, da das Fort-



Abbildung 8: Schneesituation auf Macun während der Rekognoszierung am 05.07.2015

bewegen auf dem Blockgletscher weniger zügig voran ging als auf den Wanderwegen. Ausserdem wurden die Kontrollpunkte bei der ersten Folgemessung nur mit einem Markierspray gekennzeichnet. In den drei Jahren ist dieser enorm ausgebleicht, sodass die Punkte teils sehr schwer erkennbar waren. Die Kontrollpunkte KP02, K10 und K12 waren beim Aufsuchen durch das Mobiltelefon-GPS noch von Schneefeldern bedeckt (siehe Abbildung 8). Weiter wurden die Punkte KP01 und KP06 nicht gefunden. Es wurde entschieden die Punkte während der Messwoche erneut aufzusuchen und zu hoffen, dass der Schnee bis dahin geschmolzen ist.

Auf allen Fixpunkten wurde eine Sichtbarkeitsanalyse durchgeführt und ein Panoramafoto zur Dokumentation erstellt. Nach der Rekognoszierung wurde der provisorische Messablauf definiert, um den Fussweg möglichst kurz zu halten und dadurch Zeit und Energie während der Messwoche zu sparen.

Die Rekognoszierung war wichtig, um einen optimalen Ablauf während der Messwoche sicherstellen zu können und das Grundlagnetz 2015 zu definieren.

6.2 Messwoche Macun

Die Messwoche auf Macun fand vom 27. Juli bis 31. Juli 2015 statt. Vor der Messwoche konnte das Instrumentarium und das weitere Material nach Zernez zum Schloss Planta-Wildenberg gebracht werden. Dort wurde es von der Verwaltung des SNP entgegengenommen und am nächsten Tag mit dem Helikopter zur Unterkunft nach Macun geflogen.

6.2.1 Grundlagnetz 2015

Vor der Messwoche wurde das provisorische Grundlagnetz 2015 erstellt. Es war noch nicht klar, ob die Kontrollpunkte KP01, KP02, KP06, K10 und K12 vorhanden sind oder nicht. Anhand der Sichtbarkeitsanalyse der TLS-Stationen wurde entschieden, dass auf dem Fixpunkt FP1008 und FP1011 vom Grundlagnetz 2012 (siehe Abbildung 7) nicht stationiert werden muss. Dafür wurden zusätzlich zwei TLS-Stationierungen (Punkt 5000 und 5001) erstellt. Diese zwei Punkte wurden nicht mit GNSS bestimmt, da die Scans aus-

schliesslich über die Punktwolken registriert werden (siehe Kapitel 8.2). Während der Messwoche konnten einige der nicht gefundenen Kontrollpunkte gefunden werden. Somit konnte das definitive Grundlagennetz 2015 (siehe Abbildung 9) erstellt werden.

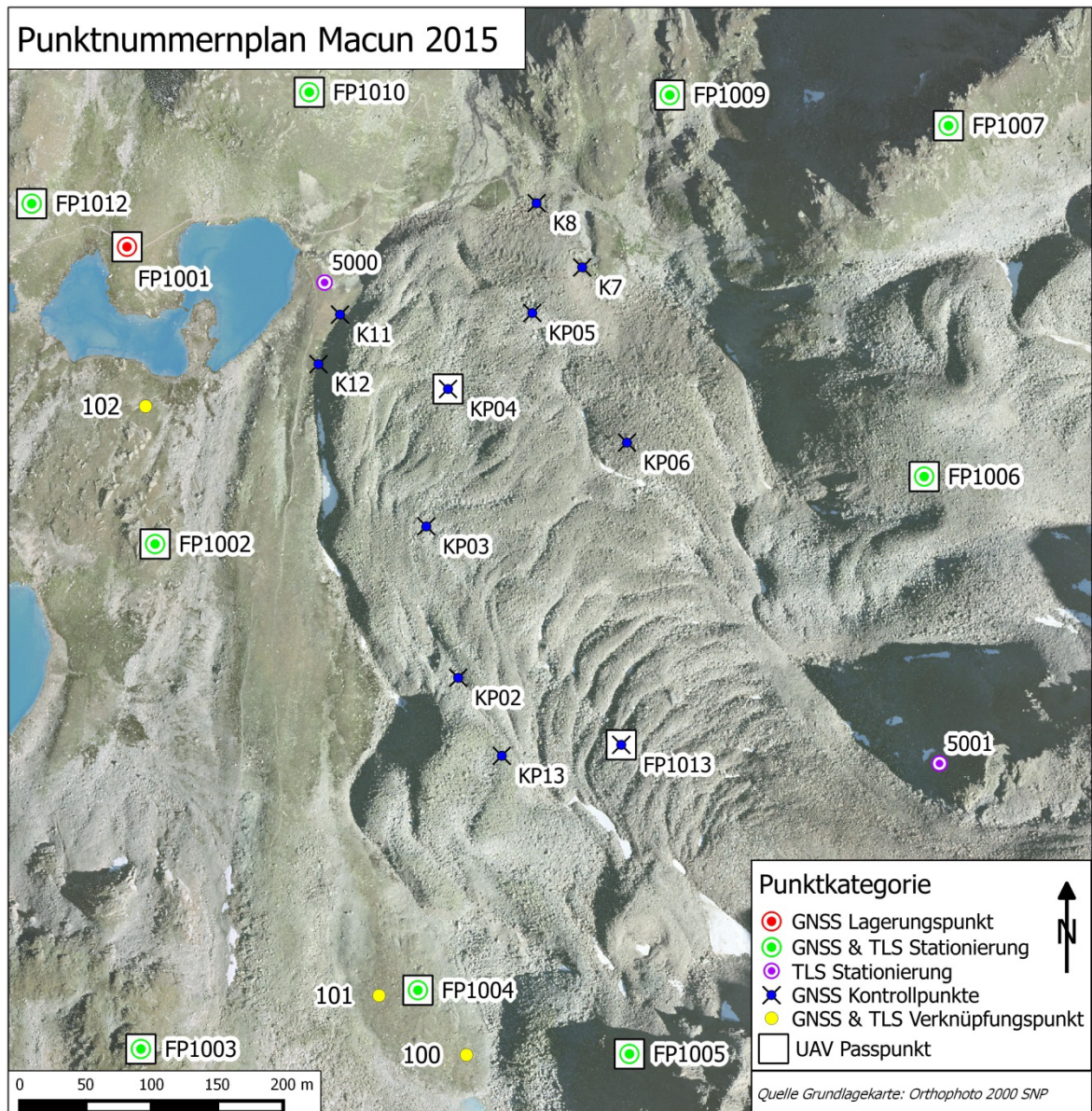


Abbildung 9: Grundlagennetz 2015

In der Tabelle 3 befindet sich ein Vergleich der Punkte vom Grundlagennetz 2012 und 2015. Im Gegensatz zur Rekognoszierung wurden in der Messwoche die Kontrollpunkte KP02 und K12 gefunden. Auch wurde eine schwache Spraymarkierung des Kontrollpunktes KP06 entdeckt. Bei der Auswertung der GNSS-Daten stellte sich jedoch heraus, dass die Spraymarkierung nur ein Hinweis auf den Punkt war, aber nicht der Punkt selbst. Dies konnte festgestellt werden, da sich der Punkt KP06 im Vergleich zu 2012 im Meterbereich entgegen der Fliessrichtung des Blockgletschers bewegt hat. Da ein Vergleich zu 2012 keinen Sinn macht, wird der Punkt KP06 im Jahr 2015 als Neupunkt klassifiziert. Die Kon-

trollpunkte KP01 und K10 wurden während der Rekognoszierung und auch während der Messwoche nicht gefunden. Für den Punkt KP01 wurde an einer ähnlicher Stelle ein neuer Kontrollpunkt KP13 erstellt. Für den Punkt K10 wurde kein Ersatz erstellt, da der Punkt nahe am Kontrollpunkt K11 lag. Ausserdem wurde der Punkt FP1013, welcher im Jahr 2012 als TLS Referenzpunkt verwendet wurde, in dieser Folgemessung als Kontrollpunkt verwendet.

Im Vergleich zu 2012 wurde der Blockgletscher 2015 zum ersten Mal zusätzlich aus der Luft mit einer Drohne aufgenommen. Damit die gesamten Bilddaten auch georeferenziert werden können, braucht es im ganzen Gebiet Passpunkte. In Abbildung 9 sind die Punkte gekennzeichnet, die auch als UAV-Passpunkte verwendet wurden (siehe Kapitel 6.2.5).

Punkt	2012	2015
FP1001	GNSS Lagerungspunkt	GNSS Lagerungspunkt & UAV Passpunkt
FP1002	TLS Stationierung	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1003	TLS Stationierung	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1004	TLS Stationierung	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1005	TLS Stationierung	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1006	TLS Stationierung	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1007	TLS Stationierung	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1008	TLS Stationierung	Nicht verwendet
FP1009	TLS Stationierung	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1010	TLS Stationierung	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1011	TLS Stationierung	Nicht verwendet
FP1012	TLS Stationierung	TLS Stationierung & UAV Passpunkt
FP1013	TLS Referenzpunkt	Kontrollpunkt & UAV Passpunkt
5000	-	Neue TLS Stationierung
5001	-	Neue TLS Stationierung
KP01	Kontrollpunkt	Nicht vorhanden
KP02	Kontrollpunkt	Kontrollpunkt
KP03	Kontrollpunkt	Kontrollpunkt
KP04	Kontrollpunkt	Kontrollpunkt & UAV Passpunkt
KP05	Kontrollpunkt	Kontrollpunkt
KP06	Kontrollpunkt	Neuer Kontrollpunkt
K7	Kontrollpunkt	Kontrollpunkt
K8	Kontrollpunkt	Kontrollpunkt
K10	Kontrollpunkt	Nicht vorhanden
K11	Kontrollpunkt	Kontrollpunkt
K12	Kontrollpunkt	Kontrollpunkt
KP13	-	Neuer Kontrollpunkt
100	-	TLS Verknüpfungspunkt
101	-	TLS Verknüpfungspunkt
102	-	TLS Verknüpfungspunkt

Tabelle 3: Übersicht Verwendungszweck der Punkte 2012 und 2015

6.2.2 Messablauf Allgemein

Ausschlaggebend für den Messablauf 2015 (siehe Tabelle 4) war die Wetterprognose und die Kapazität der TLS-Batterie, welche nur für gut drei bis maximal vier Stationen reichte. Laut Wetterbericht vom Montag 27. Juli 2015 wurde am Mittwochnachmittag und am Donnerstag Regen erwartet. Da die Drohnenbefliegung und die TLS-Messungen bei Regen nicht möglich sind, wurde für diese zwei Tage die GNSS-Messungen eingeplant. Der Messablauf hätte effizienter geplant werden können, wenn das Wetter die ganze Woche trocken prognostiziert worden wäre. Damit in diesem Fall während der GNSS-Session die Passpunkte signalisiert werden könnten, hätte die UAV-Befliegung nach der ersten GNSS-Session durchgeführt werden können.

Tag	Beschreibung
27.07 Morgen	Aufstieg zur Militärhütte, Material auspacken, Kontrolle
27.07 Nachmittag	TLS Stationen FP1005, FP1004, FP1003 und FP1002 (am Abend)
28.07 Morgen	UAV Passpunkte markieren, UAV Befliegung
28.07 Nachmittag	TLS Stationen FP1009, FP1010, FP1012 und 5000
29.07 Morgen	GNSS Session 1 (alle Punkte ausser 5000 und 5001)
29.07 Nachmittag	GNSS Session 2 (alle Punkte ausser 5000 und 5001)
30.07 Morgen	GNSS Session 3 (alle Punkte ausser 5000 und 5001)
30.07 Nachmittag	GNSS Session 3 fertigstellen, Aufnahme Foto für Terrestrischer Bildvergleich
31.07 Morgen	TLS Stationen FP1007 und FP1006
31.07 Nachmittag	TLS Station 5001, Material verpacken und Abstieg

Tabelle 4: Messablauf 2015

Vor den Messungen wurden die Dosenlibellen der Reflektorstative geprüft. Zudem wurde das Scannerstativ auf Stabilität kontrolliert. Es mussten keine Schrauben nachgezogen werden. Die komplette Materialliste befindet sich in *Anhang A5 Materialliste der Messwoche*.

Während der Messwoche wurden alle Fix- und Kontrollpunkte mit gelber Farbe neu markiert, damit sämtliche Punkte bei der nächsten Folgemessung gut auffindbar sind.

6.2.3 GNSS Messungen

Die GNSS-Messungen fanden mit dem Leica Viva System GS14 (Empfänger) kombiniert mit dem CS15 (Kontroller) statt (siehe Abbildung 10). Es wurden zwei Instrumente verwendet (Interne Nummer 7: CS15 Seriennummer 2906311, GS14 Seriennummer 2870169 und Interne Nummer 8: CS15 Seriennummer 2906327, GS14 Seriennummer 2870170). Da im Gebiet Macun kein *Global System for Mobile Communications* (GSM) Empfang



Abbildung 10: Leica Viva GS14, CS15 (FLT Geosystems, 2015)

vorhanden ist, kann nicht mit der *Real Time Kinematic* (RTK) Methode gemessen werden. Mit der RTK-Methode könnten Koordinaten in Echtzeit mit einer Genauigkeit von etwa 1 cm in der Lage und etwa 1.5 cm in der Höhe bestimmt werden. Als Alternative zur RTK-

Methode eignet sich die Rapid-Static Methode. Bei der Rapid-Static Methode wird kein GSM-Empfang benötigt. Dabei werden mit dem Empfänger lediglich die Rohdaten im globalen Bezugssystem WGS84 aufgezeichnet, welche eine Genauigkeit von 4 bis 5 m aufweisen. Für die Messungen wurden *Global Positioning System* (GPS) und *Globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema* (GLONASS) Satelliten verwendet.

Nach der Messkampagne wurde eine virtuelle Referenzstation (VRS) vom swipos Dienst der swisstopo heruntergeladen. Die gemessenen Rohdaten konnten mit der VRS im Post-Processing ausgewertet werden (siehe Kapitel 7.2). Eine VRS hat den Vorteil von kurzen Basislinien, welche hauptsächlich die systematischen Abweichungen der troposphärischen und ionosphärischen Laufzeitverzögerungen stark verringern.



Abbildung 11: GNSS-Messung mit Strebenstativ

Die GNSS-Messungen fanden am 29. und 30. Juli 2015 statt. Gesamthaft wurden 24 Punkte in drei Sessions bestimmt. Darin sind alle Kontroll- und Fixpunkte sowie drei Verknüpfungspunkte für die TLS-Messungen enthalten. Damit die Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanforderungen erreicht wurden, wurde solange gemessen, bis der Prozentindikator 100% erreichte. Der Prozentindikator ist unter anderem abhängig von der Anzahl empfangener Satelliten, der Satellitengeometrie, der Anzahl Phasensprünge und der angenommenen Basislinienlänge. Durchschnittlich betrug die Messzeit pro Punkt 2 min. Bei den Messungen wurde darauf geachtet, dass die Antenne nach Norden ausgerichtet war, um die Phasenzentrumsvariation (PCV) zu vermindern. Die Messungen fanden nicht wie in der Bachelor - Thesis 2012 mit einem Leica-Holzstativ statt, sondern mit einem Leica-Strebenstativ (siehe Abbildung 11). Der Vorteil gegenüber dem Holzstativ ist, dass es leichter ist und um einiges schneller aufgestellt werden kann. Der Nachteil besteht darin, dass der Empfänger nicht ganz so exakt über dem Punkt zentriert werden kann, wie mit einem Holzstativ kombiniert mit einem Dreifuss. Bei den Messungen in Macun wurde nicht die höchste Genauigkeit gefordert, deshalb konnte mit den Strebenstativen gemessen werden. Die Feldprotokolle zur GNSS-Messung befinden sich im *Anhang A6 Feldprotokolle*.

Ionosphärenindex

Störungen in der Ionosphäre, zum Beispiel verursacht durch Sonnenstürme, führen zu ionosphärischen Laufzeitverzögerungen. Dabei handelt es sich um regional inhomogene Elektronenverteilungen in der Ionosphäre, welche die Signalübertragung zwischen den Satelliten und dem Rover stören oder sogar verhindern (Sievers, 2009).

Wie in Abbildung 12 ersichtlich ist, war die Ionosphärenaktivität an den zwei Messtagen vom 29. und 30. Juli 2015 sehr gering. Sie hatte deshalb keinen Einfluss auf die Messergebnisse.

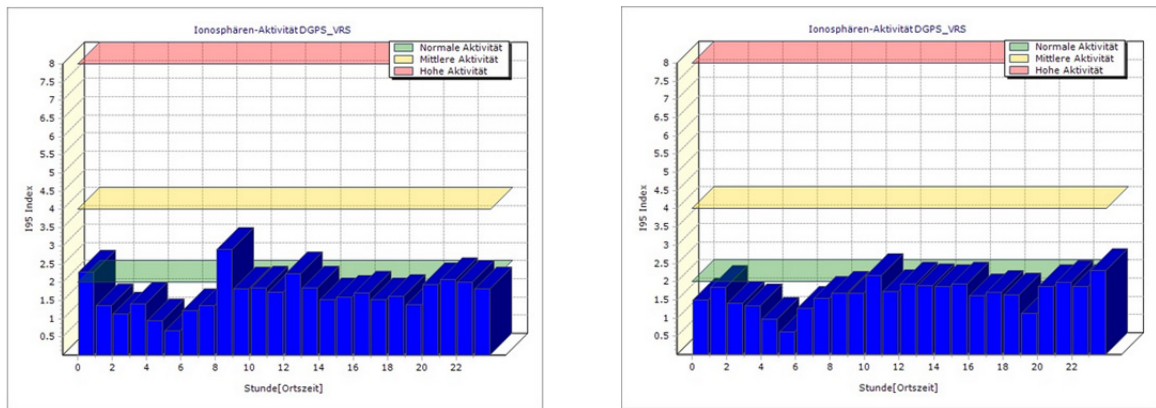


Abbildung 12: Ionosphärenindex 29.07.2015 (links) und 30.07.2015 (rechts) (swisstopo, 2015)

6.2.4 TLS Messungen

Die TLS-Messungen wurden mit dem Riegl VZ-4000 Scanner (Serien Nummer S9999039) durchgeführt (siehe Abbildung 13), welcher vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich zur Verfügung gestellt wurde. Die wichtigsten Eckdaten des Riegl Scanners sind untenstehend aufgeführt.



Reichweite:	5 - 4'000 m
Max. Messrate:	222'000 Messungen/Sekunde
Messgenauigkeit:	15 mm
Wiederholbarkeit:	10 mm
Footprint des Laserstrahls:	75 mm bei 500 m, 150 mm bei 1'000 m
Gewicht:	14.5 kg
vertikales Sichtfeld:	60° (+30° / -30°)
horizontales Sichtfeld:	360°
Speicherplatz:	80 GB SSD
Integrierte Kamera:	2'560 x 1'920 Pixel

Abbildung 13: Riegl VZ4000 Scanner (C. R. Kennedy & Co, 2015)

Aufgrund der beschränkten Batterielaufzeit des Laserscanners wurden die TLS-Messungen auf drei Tage aufgeteilt (siehe Tabelle 4). Um am Ende keine Löcher in der Punktwolke zu erhalten, wurden zusätzlich zu den Stationen auf den Fixpunkten zwei weitere Stationierungen gemessen (5000 und 5001). Die Messungen fanden auf einem speziellen Scannerstativ statt, das stabiler als ein normales Holzstativ ist. Zudem ist es zweifach gesichert, damit es nicht einsacken kann. Um nicht zu viele Punkte zu erhalten, wurde die Scanauflösung für jede Station in Abhängigkeit zur Distanz zum Blockgletscher gewählt. So konnte die erzeugte Datenmenge in Grenzen gehalten werden. Das Messprotokoll der TLS-Messung befindet sich im *Anhang A6 Feldprotokolle*.

6.2.5 UAV Befliegung

Die Befliegung mit der eBee Drohne (siehe Abbildung 14) von senseFly fand am Dienstag, 28. Juli 2015 statt. Die wichtigsten Eckdaten zur Drohne befinden sich untenstehend.

Gewicht:	0.7 kg
Flügelspannweite:	96 cm
Kamera:	Auswechselbar
Verwendete Kamera:	Canon IXUS 127
Maximale Flugzeit:	50 min
Fluggeschwindigkeit:	40 - 90 km/h
Reichweite Antenne:	bis 3 km
Wind:	bis 45 km/h



Abbildung 14: eBee Drohne von senseFly (Geomares Publishing, 2015)

Bevor die Befliegung durchgeführt werden konnte, mussten die Passpunkttafeln platziert werden. Gesamthaft wurden zwölf mit GNSS bestimmte Punkte als UAV-Passpunkte (siehe Abbildung 9) gewählt und jeweils mit einer 25 x 25 cm Tafel (siehe Abbildung 16) signalisiert.



Abbildung 16: Passpunktsignalisation für UAV

Der Start- und Landeplatz befand sich westlich des Blockgletschers auf der Wiese zwischen Wanderweg und Blockgletscher. Die Flugplanung wurde vor Ort mit dem Programm eMotion2 (Version 2.4.8) von senseFly durchgeführt. Wichtig war, dass bereits vor der Messkampagne die Hintergrundkarte und das Höhenmodell in den Cache geladen wurden, denn sonst wäre keine Flugplanung auf dem Feld möglich gewesen. Geplant war ein Kreuzflug, sprich Fluglinien längs und quer zum Blockgletscher, um eine optimale Aufnahmekonstellation und Überdeckung zu erhalten.

Weiter wurde eine Bodenauflösung von 7 cm und einer längs und quer Überdeckung von je 80% gewählt. Dafür wären zwei Flüge von jeweils 26 min nötig gewesen. Aufgrund des zunehmenden Windes war der Batterieverbrauch der Drohne um einiges höher als berechnet. So musste sie bereits nach 13 min wieder landen. Nach dem Batteriewechsel und dem erneuten Start wurde festgestellt, dass die Drohne die Fluglinien nicht so weiterflog, wie geplant. Somit musste eine erneute Landung durchgeführt werden. Die Batterieladung war danach bereits auf unter 50% gefallen. Somit kam ein Start mit dieser Batterie nicht mehr in Frage. Es blieb noch eine Batterie übrig, mit welcher ein erneuter Versuch gestartet wurde. Vor dem Start wurden nochmals die Fluglinien geprüft und auf die Drohne übertragen. Die Droh-

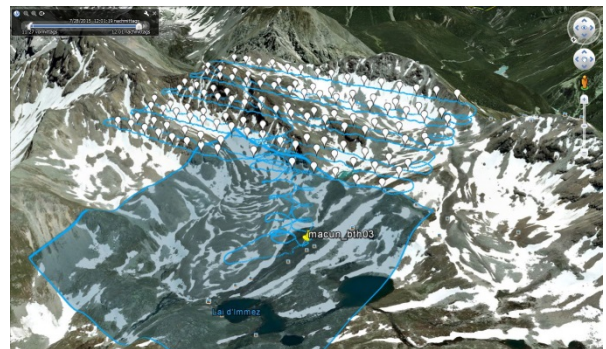


Abbildung 15: Geflogene Fluglinien

ne flog die restlichen Fluglinien wie geplant ab, jedoch hatte sie Probleme mit der Bildaufnahme. Es wurden keine Bilder auf der Kamera gespeichert. Aufgrund des Rapid Checks (siehe Kapitel 9.1) wurde entschlossen keine weitere Befliegung an einem folgenden Tag durchzuführen. Die geflogenen Fluglinien sind in Abbildung 15 ersichtlich.

6.3 Fazit

Das Wetter während der Messkampagne war besser als vorhergesagt. Somit konnte am Donnerstag nach der dritten GNSS-Session versucht werden ein Bild aus dem Jahr 1923 nachzustellen (siehe Kapitel 10.1). Die GNSS- und TLS-Messungen konnten wie geplant durchgeführt werden. Einzig die Drohnenbefliegung konnte nicht wie gewünscht ausgeführt werden. Dennoch konnte der ganze Blockgletscher mit einer Befliegung aufgenommen werden. Es wäre jedoch geplant gewesen, ein grösserer Bereich aufzunehmen, damit sich das Orthophoto und das Geländemodell über ein grösseres Gebiet ausdehnen und damit das Gebiet unterhalb des Blockgletschers besser erfasst gewesen wäre. Gesamthaft gesehen kann die Messwoche durchaus als erfolgreich angesehen werden und die aufgezeichneten Daten schauen vielversprechend aus.

Weiter ist zu sagen, dass die Messwoche eine gewisse Grundkondition, Bergerfahrung und Trittsicherheit der Diplomanden voraussetzt. Der Materialtransport und vor allem das Gewicht des Scanners darf nicht unterschätzt werden.

7 Datenauswertung GNSS

Die GNSS-Daten wurden nach dem in Abbildung 17 aufgeführten Auswertekonzept ausgewertet. Die einzelnen Auswertungsschritte sind in diesem Kapitel erläutert.

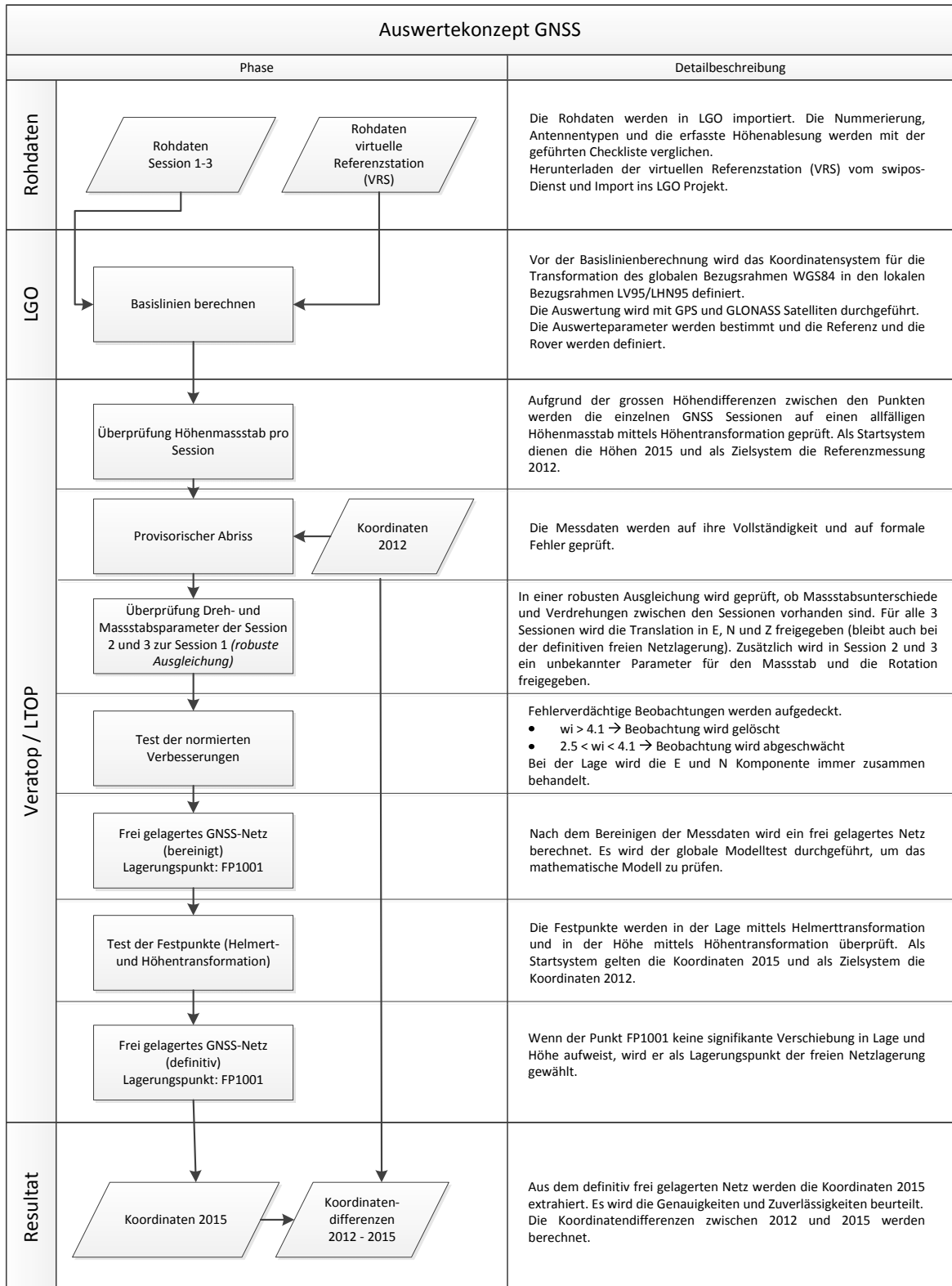


Abbildung 17: Auswertekonzept GNSS

7.1 Mathematisches Modell

Das mathematische Modell, bestehend aus dem stochastischen und funktionalen Modell befindet sich im *Anhang A7 Mathematisches Modell GNSS*. Bei den angenommenen theoretischen Standardabweichungen beim Rapid-Static Verfahren wurden bereits die Zentrier- und Höhenablesungsgenauigkeiten miteinander berechnet. Dies ergab für das stochastische Modell folgende Werte:

- GNSS-Lage: $\sigma_E = \sigma_N = 7 \text{ mm}$
- GNSS-Höhe: $\sigma_H = 15 \text{ mm}$

7.2 Auswertung Basislinie

Die Auswertung der Basislinien erfolgte mit der Software Leica Geo Office (LGO), Version 8.4. Die Berechnungsprotokolle der Basislinienauswertung befinden sich im *Anhang A8 Berechnungsprotokolle Basislinienauswertung GNSS*.

In LGO wurde für jede Session ein eigenes Projekt erstellt. Dabei wurde das Koordinatensystem definiert, mit dem die Koordinaten vom globalen Bezugsrahmen (WGS84) in den lokalen Bezugsrahmen (LV95 / LHN95) transformiert wurden. Das Koordinatensystem ist definiert durch:

- eine Transformation (LV95 Parameter)
- ein Ellipsoid (Bessel)
- eine Projektion (Swiss95)
- ein Geoidmodell (Geoid04-CH1903+)

Anschliessend wurden die Rohdaten und die virtuelle Referenzstation (VRS), welche vorgängig vom swipos-Dienst bezogen wurde, in die Projekte geladen. Als Referenzpunkt wurde die VRS gewählt, die restlichen Punkte konnten als Roverpunkte definiert werden. Bevor die Auswertung starten konnte, wurden die Auswerteparameter definiert. Die wichtigsten Auswerteparameter sind:

- Elevationswinkel: 10°
- Ephemeridentyp: Broadcast
- Lösungsart: Automatisch
- GNSS Typ: Automatisch (GPS & GLONASS)
- Frequenz: Automatisch
- Fixiere Ambiguities: bis zu 80 km
- Troposphärenmodell: Saastamoinen
- Ionosphärenmodell: Automatisch

Bei allen gemessenen Punkten in allen drei Sessions konnten die Basislinien gelöst werden. Im Durchschnitt wurden folgende Genauigkeiten erzielt:

Lage: 0.5 mm

Höhe: 0.8 mm

7.3 Ausgleichung des GNSS-Netzes

Die Ausgleichung wurde mit der Software Veratop (Version 2013 - Build 005) durchgeführt. Veratop stellt eine benutzerfreundliche Oberfläche für das Programm LTOP (Version 99.6.1) von swisstopo dar. Mit LTOP wird die Netzausgleichung berechnet.

In Veratop wurde ein Projekt erstellt und die Koordinaten der drei GNSS-Sessions wurden als Koordinatenbeobachtungen importiert. Des Weiteren wurden die Koordinaten aus dem Jahr 2012 importiert, welche als Näherungskordinaten dienen. Bei Neupunkten welche 2012 noch nicht vorhanden waren, wurden die Koordinaten von der ersten Session 2015 als Näherungskordinaten angenommen.

7.3.1 Überprüfung der Höhenmassstäbe

Aufgrund des grossen Höhenunterschiedes im Netz von gut 150 m wurden die GNSS-Sessions auf einen allfälligen Höhenmassstab untersucht. Dies geschah mit einer Höhentransformation. Als Startsystem wurde die jeweilige Session 2015 gewählt und als Zielsystem die Koordinaten von 2012. Ausser FP1006 und FP1013 wurden alle gemessenen Fixpunkte verwendet. Der Punkt FP1006 weist Verschiebungen im Meterbereich zu 2012 auf. Da dieser den Massstab sehr verzerren würde, wurde er weggelassen. Der Punkt FP1013 wurde, wie bereits in Kapitel 6.2.1 beschrieben, als Kontrollpunkt degradiert. Die Resultate der Höhentransformation befinden sich in Tabelle 5. Der Höhenmassstab ist signifikant, wenn er die Signifikanzgrenze überschreitet.

$$\text{Signifikanzgrenze} = [\text{Höhenmassstab}] < 1.96 * [\text{Genauigkeit Massstab}]$$

Keine der drei Sessions wies einen signifikanten Höhenmassstab auf.

Session	Massstab [ppm]	Genauigkeit Massstab	signifikant
1	-141.4	120.4	Nein
2	-41.7	156.0	Nein
3	65.6	176.1	Nein

Tabelle 5: Überprüfung der Höhenmassstäbe

7.3.2 Provisorischer Abriss

Beim provisorischen Abriss werden die Messdaten auf grobe Fehler geprüft. Der provisorische Abriss ergab keine Unstimmigkeiten.

7.3.3 Überprüfung Dreh- und Massstabsparameter

In einem weiteren Schritt wurden die GNSS-Sessions zueinander auf signifikante Dreh- und Massstabsparameter geprüft. Dafür wurde eine robuste Ausgleichung gerechnet, bei

welcher für alle drei Sessionen die Translationen E, N und Z freigegeben wurden. Ausserdem wurde für die Session zwei und drei ein unbekannter Parameter für die Rotation und für den Massstab freigegeben. Die Session eins dient dabei als Referenzsession. Die Resultate sind in Tabelle 6 ersichtlich. Der Massstab oder die Rotation ist signifikant, falls die Signifikanzgrenze überschritten wird.

$$\text{Signifikanzgrenze} = [\text{Massstab oder Rotation}] < 1.96 * [\text{Genauigkeit}]$$

Keine der Sessionen wies einen signifikanten Massstab oder eine signifikante Rotation auf.

Session	Rotation [cc]	Genauigkeit Rotation	Signifikant	Massstab [ppm]	Genauigkeit Massstab	signifikant
2	0.371	5.070	Nein	9.223	7.953	Nein
3	1.142	5.113	Nein	-6.201	8.015	Nein

Tabelle 6: Überprüfung Dreh- und Massstabsparameter

7.3.4 Test der normierten Verbesserungen

Für den Test der normierten Verbesserungen wurde vorgängig ein frei gelagertes Netz berechnet. Als Lagerungspunkt wurde wie bereits in den Jahren 2010 und 2012 der Punkt FP1001 gewählt. Mit dem Test der normierten Verbesserungen (w_i) wurden die fehlerverdächtigen Beobachtungen aufgedeckt. Diese wurden einzeln iterativ eliminiert oder abgeschwächt. Die Beobachtungen mit einem w_i welches grösser ist als 4.1 wurden eliminiert und die Beobachtungen mit einem w_i zwischen 2.5 und 4.1 wurden abgeschwächt, indem die Genauigkeit um das Zweifache verschlechtert wurde. Zuerst wurden die w_i 's in der Höhe behandelt, anschliessend die in der Lage. Die eliminierten und abgeschwächten Beobachtungen sind in Tabelle 7 ersichtlich.

Iteration	Session	Punkt	Messelement	w_i	Massnahme
1	2	KP13	Höhe	3.6	abgeschwächt
2	3	K11	Höhe	3.5	abgeschwächt
3	3	101	Höhe	2.6	abgeschwächt
4	1	KP03	Lage (N, E)	4.5	eliminiert
5	3	FP1006	Lage (N, E)	3.8	abgeschwächt
6	1	FP1002	Lage (N, E)	3.5	abgeschwächt
7	3	FP1004	Lage (N, E)	3.2	abgeschwächt
8	1	K11	Lage (N, E)	2.9	abgeschwächt
9	1	FP1012	Lage (N, E)	2.7	abgeschwächt
10	3	102	Lage (N, E)	2.6	abgeschwächt

Tabelle 7: Test der normierten Verbesserungen

7.3.5 Globaler Modelltest

Nachdem alle w_i bereinigt wurden, konnte erneut das frei gelagerte Netz berechnet werden. Als Lagerungspunkt wurde wieder der Punkt FP1001 gewählt. Dieses Netz diente als Grundlage für den globalen Modelltest. Der globale Modelltest prüft, ob das mathemati-

sche Modell mit den empirischen Resultaten zusammenpasst. Das Ergebnis des globalen Modelltests ist in Tabelle 8 ersichtlich. In der Lage wie auch in der Höhe ergab sich kein signifikanter Wert, somit konnte das Modell angenommen werden. Auf Gruppenmodelltests konnte verzichtet werden, da es sich bei den vorliegenden Messungen nur um eine Beobachtungsart (GNSS-Messungen) handelt. Die erhaltenen Koordinaten des frei gelagerten Netzes wurden als Koordinatenversion 2015 gespeichert. Falls beim Test der Festpunkte (siehe Kapitel 7.3.6) der Lagerungspunkt FP1001 keine signifikante Verschiebung aufweist, sind diese Koordinaten bereits die definitiven Koordinaten.

Globaler Modelltest	Lage	Höhe
Q^{\wedge}	0.96	1.07
Q^2	0.92	1.14
f	90	46
Quantil 95% (Chi-Quadrat Verteilung)	113.1	62.8
$q = X^2/f_{95\%}(q)$	1.26	1.37
$Q^2 \leq q$	nicht signifikant	nicht signifikant

Tabelle 8: Globaler Modelltest

7.3.6 Test der Festpunkte

Der Test der Festpunkte wird durchgeführt, um zu überprüfen, ob sich die Festpunkte signifikant zu 2012 verschoben haben. Weil eine freie Lagerung auf dem Punkt FP1001 gerechnet wurde, musste vor allem dieser Punkt überprüft werden. Die Festpunkte wurden in der Lage mittels Helmertransformation und in der Höhe mittels Höhentransformation geprüft. Dabei wurden als Startsystem die Koordinaten von 2015 gewählt und als Zielsystem die Koordinaten von 2012. Die Signifikanzgrenze wurde mit Hilfe der Genauigkeiten von 2012 und 2015 berechnet. Die Signifikanzgrenzen in der Lage und der Höhe sind in Tabelle 9 und Tabelle 10 dargestellt.

Signifikanzgrenze in der Lage	m_E [mm]	m_N [mm]
Genauigkeit 2012 (Mittelwert)	5.2	5.2
Genauigkeit 2015 (Mittelwert)	5.7	5.7
Signifikanzgrenze einer Restklaffung (dE, dN) (1σ)	$\sqrt{5.72 + 5.22} = 7.7 \text{ mm}$	
Signifikanzgrenze einer Restklaffung (dE, dN) ($2 \sigma = 95\%$)	$7.6 \text{ mm} * 1.96 = 15.1 \text{ mm}$	

Tabelle 9: Test der Festpunkte, Signifikanzgrenze Lage

Signifikanzgrenze in der Höhe	m_H [mm]
Genauigkeit 2012 (Mittelwert)	13.4
Genauigkeit 2015 (Mittelwert)	13.3
Signifikanzgrenze einer Restklaffung (dH) (1σ)	$\sqrt{13.32 + 13.42} = 18.9 \text{ mm}$
Signifikanzgrenze einer Restklaffung (dH) ($2 \sigma = 95\%$)	$18.7 \text{ mm} * 1.96 = 37.0 \text{ mm}$

Tabelle 10: Test der Festpunkte, Signifikanzgrenze Höhe

Bei der Helmerttransformation (siehe Abbildung 18) bestanden sechs der zehn Fixpunkte die Festpunktprüfung. Es ist ersichtlich, dass der Lagerungspunkt FP1001 in der Lage keine signifikante Verschiebung zu den Koordinaten der ersten Folgemessung im Jahre 2012 aufweist.

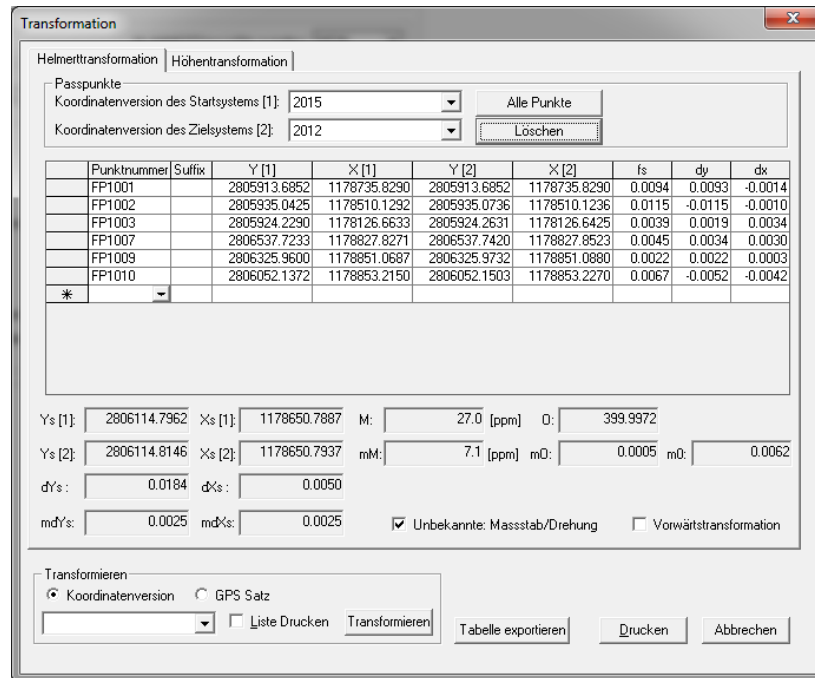


Abbildung 18: Test der Festpunkte, Helmerttransformation

Beim Test der Festpunkte in der Höhe (siehe Abbildung 19) bestanden acht der zehn Fixpunkte die Festpunktprüfung. Auch in der Höhe wies der Lagerungspunkt FP1001 keine signifikante Verschiebung zu den Koordinaten von 2012 auf. Bei der Höhentransformation musste der Höhenmassstab nicht berücksichtigt werden, da er bereits vorgängig (siehe Kapitel 7.3.1) für die einzelnen Sessions überprüft wurde.

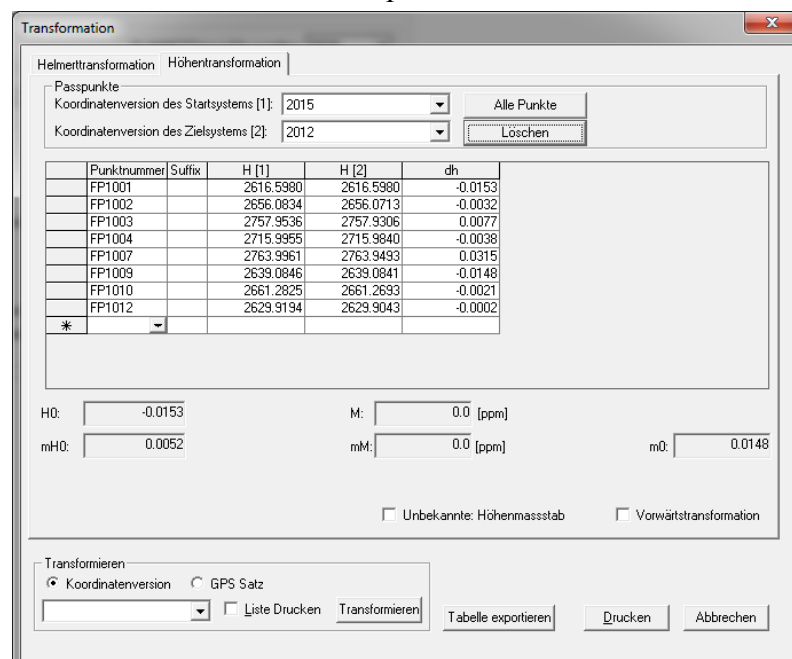


Abbildung 19: Test der Festpunkte, Höhentransformation

7.3.7 Definitiv frei gelagertes Netz

Der Lagerungspunkt FP1001 hatte den Festpunkttest in der Lage und Höhe bestanden. Somit sind die bereits gerechneten Koordinaten die definitiven Koordinaten für 2015. Sie wurden als ".koo-File" exportiert und sind in Kapitel 7.4.1 aufgelistet. Das Berechnungsprotokoll zur definitiven freien Netzlagerung befindet sich im *Anhang A9 Berechnungsprotokoll Definitiv frei gelagertes Netz GNSS*.

7.3.8 Beurteilung des definitiv frei gelagerten Netzes

Für die Beurteilung des definitiv frei gelagerten Netzes sind zwei Kriterien zu überprüfen.

Genauigkeit

In der Tabelle 11 sind die erzielten Genauigkeiten ersichtlich.

Punkt	m_E / m_N [mm]	m_H [mm]	3d Helmert'sche Punktfehler	Punkt	m_E / m_N [mm]	m_H [mm]	3d Helmert'sche Punktfehler
FP1001	Lagerungspunkt			KP03	6.2	13.2	15.8
FP1002	6.0	13.2	15.7	KP04	5.5	13.2	15.3
FP1003	5.5	13.2	15.3	KP05	5.5	13.2	15.3
FP1004	6.0	13.2	15.7	KP06	5.5	13.2	15.3
FP1005	5.5	13.2	15.3	K7	5.5	13.2	15.3
FP1006	6.0	13.2	15.7	K8	5.5	13.2	15.3
FP1007	5.5	13.2	15.3	K11	5.5	14.2	16.2
FP1009	5.5	13.2	15.3	K12	5.5	13.2	15.3
FP1010	5.5	13.2	15.3	KP13	5.5	14.2	16.2
FP1012	6.0	13.2	15.7	100	6.0	13.2	15.7
FP1013	5.5	13.2	15.3	101	6.0	14.2	16.5
KP02	5.5	13.2	15.3	102	5.5	13.2	15.3

Tabelle 11: Genauigkeiten des definitiv frei gelagerten Netzes

Die Erwartungen für die einzelnen Genauigkeiten wurden erfüllt. Im Durchschnitt wurde in der Lage, m_E oder m_N eine Genauigkeit von 5.7 mm erreicht ($\sigma_E = \sigma_N = 7$ mm). In der Höhe wurde eine durchschnittliche Genauigkeit von 13.3 mm erreicht ($\sigma_H = 15$ mm).

Zuverlässigkeit

Die durchschnittliche Zuverlässigkeitszahl, als Kennzahl eines geodätischen Netzes ist gut, wenn sie zwischen 0.5 und 1 liegt. Im vorliegenden definitiv frei gelagerten Netz beträgt sie 0.63 und ist somit gut.

Die äussere Zuverlässigkeit besagt, wie stark die innere Zuverlässigkeit (die nicht entdeckten kleinen groben Fehler) das Ausgleichungsergebnis verfälscht, sprich die Koordinaten der Neupunkte. Die äussere Zuverlässigkeit ist in Ordnung, wenn in der Lage NA kleiner gleich dreimal MFA ist, beziehungsweise in der Höhe NH kleiner gleich dreimal MFH ist.

Einzig der Punkt KP03 lag in der Lage knapp ausserhalb der Testgrösse ($NA = 21$ und $3 \cdot MFA = 18.6$). Der Grund dafür ist, dass beim Test der normierten Verbesserungen (siehe Kapitel 7.3.4) der Punkt KP03 aufgrund eines zu grossen w_i -Wertes in der Session eins, in der Lage eliminiert werden musste. Der Punkt KP03 wurde deshalb nur mittels zwei Sessio-
nen bestimmt.

7.4 Resultate

Als Resultat der GNSS-Kampagne konnten die Koordinaten von 2015 bestimmt werden. Zudem wurde die Verschiebungsanalyse zum Jahr 2012 berechnet. Diese beiden Resultate sind nachstehend aufgeführt.

7.4.1 Koordinaten 2015

In der Tabelle 12 sind die definitiven Koordinaten aus der GNSS-Kampagne 2015 ersicht-
lich. Die Punkte sind im Kapitel 6.2.1 Grundlagennetz 2015 in Abbildung 9 auf einem Plan
dargestellt.

Punkt	E	N	H	Punkt	E	N	H
FP1001	2805913.685	1178735.829	2616.598	KP03	2806141.092	1178523.458	2666.854
FP1002	2805935.043	1178510.129	2656.083	KP04	2806157.551	1178627.834	2641.616
FP1003	2805924.229	1178126.663	2757.954	KP05	2806221.569	1178685.569	2631.68
FP1004	2806134.69	1178171.267	2715.996	KP06	2806293.524	1178587.139	2671.096
FP1005	2806295.359	1178122.879	2763.732	K7	2806259.469	1178720.183	2613.13
FP1006	2806519.288	1178561.357	2737.022	K8	2806224.854	1178768.938	2589.674
FP1007	2806537.723	1178827.827	2763.996	K11	2806075.52	1178684.326	2616.761
FP1009	2806325.96	1178851.069	2639.085	K12	2806059.122	1178646.666	2622.016
FP1010	2806052.137	1178853.215	2661.283	KP13	2806198.38	1178349.319	2698.71
FP1012	2805841.284	1178768.615	2629.919	100	2806171.557	1178122.095	2720.478
FP1013	2806289.167	1178357.626	2708.441	101	2806105.175	1178167.194	2720.237
KP02	2806165.308	1178408.498	2683.76	102	2805927.821	1178614.711	2619.578

Tabelle 12: Koordinaten 2015

7.4.2 Verschiebungsanalyse 2012 – 2015

Die Verschiebungen zwischen 2012 und 2015 werden in der Tabelle 13 dargestellt. Aus-
serdem wurde ein Vektorplan der Verschiebungen erstellt, welcher sich in Kapitel 10.5
befindet. Die 95% Signifikanzgrenze einer Verschiebung beträgt:

$$\begin{aligned} \text{Lage: } & \sqrt{5.2^2(MFA_{2012}) + 5.7^2(MFA_{2015})} * 2.45 = 18.9 \text{ mm} \\ \text{Höhe: } & \sqrt{13.4^2(MFH_{2012}) + 13.3^2(MFH_{2015})} * 1.96 = 37.0 \text{ mm} \end{aligned}$$

Punkt	E2012 / E2015	N2012 / N2015	H2012 / H2015	dE [mm]	dN [mm]	fs [mm]	dH [mm]	Azi [gon]	signifikant
K7	2806259.479	1178720.193	2613.142	-10.4	-10.3	14.6	-11.8	250.3	Nein
	2806259.469	1178720.183	2613.13						
K8	2806224.916	1178768.940	2589.686	-61.3	-1.9	61.3	-12.7	298	Ja (Lage)
	2806224.854	1178768.938	2589.674						
K11	2806075.725	1178684.108	2616.870	-205.0	217.7	299	-109.0	351.9	Ja
	2806075.52	1178684.326	2616.761						
K12	2806059.139	1178646.679	2622.006	-16.9	-12.6	21.1	9.3	259.2	Ja (Lage)
	2806059.122	1178646.666	2622.016						
KP02	2806165.821	1178407.868	2684.088	-513.7	630.6	813.4	-327.4	356.5	Ja
	2806165.308	1178408.498	2683.76						
KP03	2806142.154	1178521.759	2667.233	-1061.7	1699.0	2003.4	-379.4	364.4	Ja
	2806141.092	1178523.458	2666.854						
KP04	2806157.737	1178626.540	2641.870	-185.5	1294.6	1307.8	-254.0	390.9	Ja
	2806157.551	1178627.834	2641.616						
KP05	2806221.762	1178684.439	2631.789	-192.8	1129.5	1145.8	-108.9	389.2	Ja
	2806221.569	1178685.569	2631.68						
FP1001	2805913.685	1178735.829	2616.598	Lagerungspunkt					
	2805913.685	1178735.829	2616.598						
FP1002	2805935.074	1178510.124	2656.071	-31.1	5.6	31.6	12.1	311.3	Ja (Lage)
	2805935.043	1178510.129	2656.083						
FP1003	2805924.263	1178126.643	2757.931	-34.1	20.8	39.9	23.0	334.9	Ja (Lage)
	2805924.229	1178126.663	2757.954						
FP1004	2806134.706	1178171.247	2715.984	-15.3	19.3	24.6	11.5	357.3	Ja (Lage)
	2806134.690	1178171.267	2715.996						
FP1005	2806295.359	1178122.841	2763.766	-0.2	38.0	38.0	-33.8	399.7	Ja (Lage)
	2806295.359	1178122.879	2763.732						
FP1006	2806521.224	1178561.177	2738.136	-1936.1	179.7	1944.4	-1113.5	305.9	Ja
	2806519.288	1178561.357	2737.022						
FP1007	2806537.742	1178827.852	2763.949	-18.7	-25.2	31.4	46.8	240.6	Ja
	2806537.723	1178827.827	2763.996						
FP1009	2806325.973	1178851.088	2639.084	-13.2	-19.3	23.4	0.5	238.2	Ja (Lage)
	2806325.960	1178851.069	2639.085						
FP1010	2806052.150	1178853.227	2661.269	-13.1	-12.0	17.8	13.2	252.8	Nein
	2806052.137	1178853.215	2661.283						
FP1012	2805841.315	1178768.604	2629.904	-30.7	10.3	32.4	15.1	320.6	Ja (Lage)
	2805841.284	1178768.615	2629.919						
FP1013	2806289.502	1178357.235	2708.619	-335.3	390.7	514.9	-178.1	354.8	Ja
	2806289.167	1178357.626	2708.441						

Tabelle 13: Verschiebungsanalyse 2012 - 2015

Fixpunkte

Nur der Fixpunkt FP1010 weist keine signifikante Verschiebung in der Lage und Höhe auf. Alle anderen Fixpunkte weisen in der Lage, teils auch in der Höhe (FP1006 und FP1007) eine signifikante Verschiebung zu den Koordinaten von 2012 auf. Eindrücklich ist die Verschiebung des Punktes FP1006, welcher östlich oberhalb des zu vermessenden Blockgletschers liegt. Im Kapitel 10.4.1 in Abbildung 47 ist ersichtlich, dass sich das Gebiet auf dem der Punkt FP1006 liegt, hangabwärts bewegt. Aufgrund der Tatsache, dass sich fast alle Fixpunkte signifikant bewegt haben, scheint es, dass das ganze Gebiet rund um den Blockgletscher etwas in Bewegung ist.

Kontrollpunkte

Von den Kontrollpunkten, welche auf dem Blockgletscher liegen (KP02, KP03, KP04, KP05 und neu auch FP1013), haben sich alle signifikant bewegt. Im Schnitt haben sie sich über 1 m in der Lage bewegt und zwischen 11 cm (KP05) und 38 cm (KP03) gesenkt. Bei diesen Kontrollpunkten konnte das erste Mal eine Verschiebung berechnet werden, da die Punkte bei der ersten Folgemessung, im Jahr 2012, durch Arpagaus und Joss neu angelegt wurden. Die Kontrollpunkte K7 und K8, welche vor der Blockgletscherfront liegen (siehe Abbildung 9), gab es nur eine signifikante Verschiebung bei Punkt K8 in der Lage. Diese Punkte scheinen für die Verschiebungsanalyse des Blockgletschers weniger geeignet zu sein. Die beiden Kontrollpunkte K11 und K12, welche an der Nordwestlichen Seite des Blockgletschers liegen, haben sich signifikant verschoben. Wobei sich der Punkt K12 nur in der Lage und der Punkt K11 in der Lage und Höhe signifikant verschoben hat.

7.5 Fazit

Die GNSS-Auswertung konnte wie geplant durchgeführt werden. Die durchschnittlichen Punktgenauigkeiten sind leicht besser, als die vorgängig angenommenen theoretischen Standardabweichungen. Bei der Verschiebungsanalyse wurden viele signifikante Verschiebungen detektiert. Es gab maximale Verschiebungen bis zu 2 m in der Lage und bis zu 1 m in der Höhe. Mit den neuen Koordinaten der Fix- und Kontrollpunkte können die weiteren Auswertungen (TLS und UAV) und die Visualisierungen durchgeführt werden.

8 Datenauswertung TLS

Die Resultate einer TLS-Messkampagne zeichnen sich vor allem durch eine grosse Datenmenge aus. Da dies ein flächenabtastendes Verfahren ist, sind die gemessenen Punkte rastermässig verteilt und keine exakt bestimmten Punkte. Um daraus Erkenntnisse und Visualisierungen erhalten zu können, müssen sie in einer Auswertung weiterverarbeitet werden. Die einzelnen Auswertungsschritte sind in Abbildung 20 in einer Übersicht dargestellt und werden in diesem Kapitel erläutert.

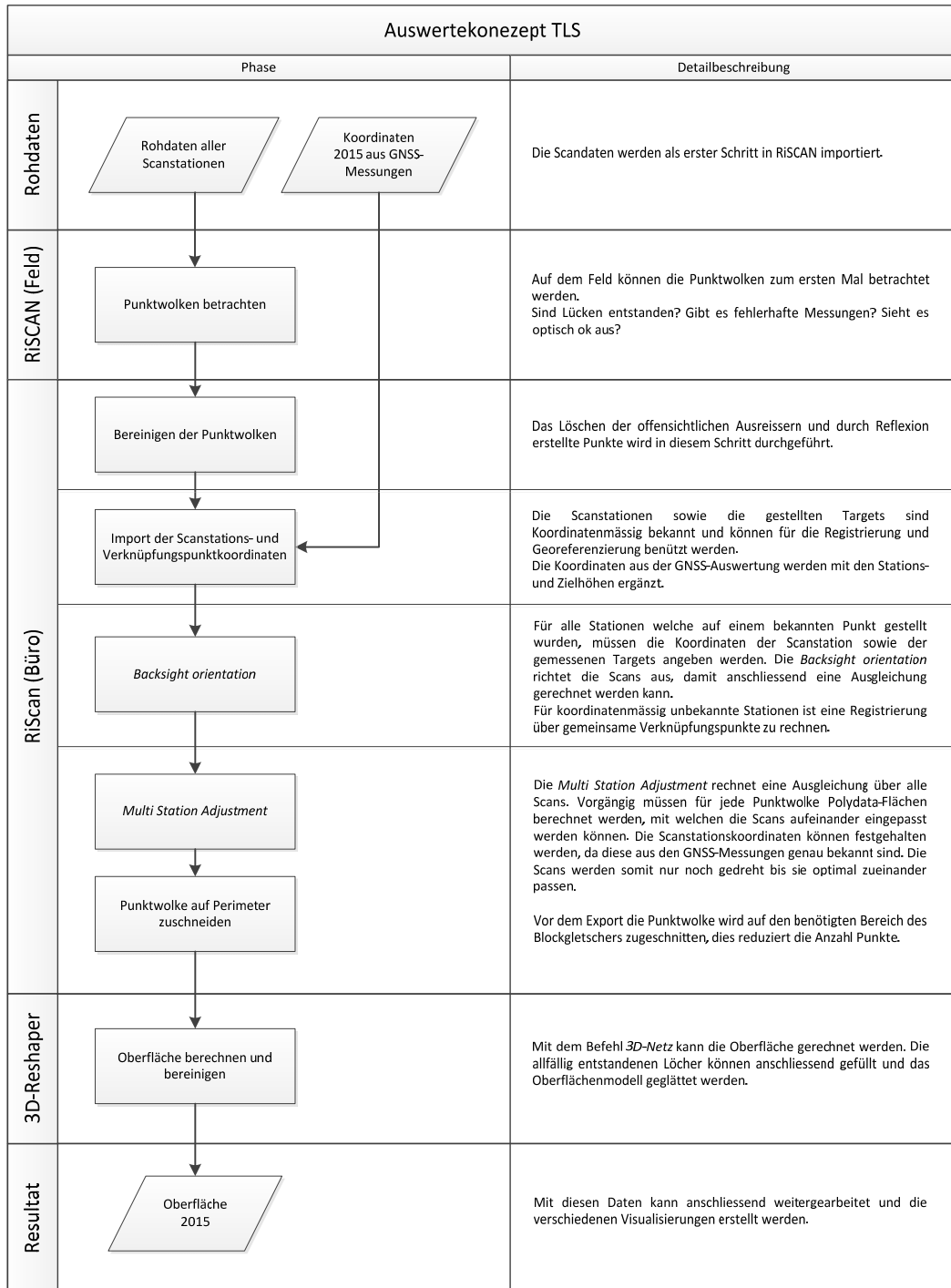


Abbildung 20: Auswertekonzept TLS

8.1 Datenaufbereitung

Die ersten Arbeitsschritte wurden in RiSCAN PRO (Version Nummer 2.0) von Riegl, welches auch vom IGP der ETH Zürich zur Verfügung gestellt wurde, durchgeführt. Nach dem Import der Messdaten wurden als erstes die Scans optisch überprüft. Gesamthaft bestehen die Punktwolken aus 326 Millionen Punkten. Dabei konnten viele fehlerhafte Punkte entdeckt werden, welche sternförmig um die Scanstation verteilt waren. Die grobe Bereinigung wurde mit selektieren und löschen erledigt.

8.2 Registrierung und Georeferenzierung der Punktwolken

Als nächster Schritt folgte die Registrierung und Georeferenzierung der einzelnen Punktwolken. Dazu sind die Koordinaten der Fixpunkte aus der GNSS-Auswertung nötig. Diese mussten vor dem Import mit den Stationshöhen ergänzt werden. So konnten direkt die Koordinaten des Scanners und nicht die des Fixpunktes am Boden verwendet werden. Dasselbe wurde mit den Verknüpfungspunkten, auf welche ein Target aufgestellt wurde, durchgeführt.

Für die erste Grobausrichtung der Punktwolken wurde eine *Backsight orientation* gerechnet. Dafür mussten die Standpunktkoordinaten bekannt sein. Für die Ausrichtung der Punktwolke konnten ein oder zwei Zielpunktkoordinaten angegeben werden. Falls kein Anschluss gemessen wurde, konnte der Scan nach Norden ausgerichtet werden. Danach musste er von Hand ungefähr in die richtige Position gedreht werden.

Für die zwei Stationen (5000 und 5001), bei welchen der Standpunkt nicht mit GNSS gemessen wurde, musste eine andere Orientierungsart gewählt werden. In diesem Fall kam eine Orientierung über Verknüpfungspunkte zum Einsatz. Dabei wird der zu orientierende Scan auf eine bereits registrierte Punktwolke, über von Hand ausgewählte Verknüpfungspunkte, ausgerichtet und platziert. Es müssen mindestens vier gemeinsame Verknüpfungspunkte ausgewählt werden.

Am Ende dieser Schritte wurden alle Punktwolken zusammen betrachtet und optisch auf Plausibilität überprüft.

Als nächster Schritt wurden die Punktwolken in einer *Multi Station Adjustment* möglichst exakt zueinander ausgerichtet. Damit diese Funktion ausgeführt werden konnte, mussten die Punktwolken bereits grob zueinander ausgerichtet sein. Die *Multi Station Adjustment* wurde iterativ dreimal durchgeführt. Zu beachten galt hier, dass die Koordinaten der bekannten Stationen nicht verändert werden durften und nur die Drehung um die Scanstation verändert wurde. Um bei jeder Iteration ein noch besseres Resultat zu erreichen, wurden die Parameter jeweils angepasst. Bei der dritten Iteration konnte eine Standardabweichung von 4.7 cm erreicht werden. Die Abweichungen der einzelnen Flächen streuen annähernd normalverteilt. Dies ist an der Verteilung der rot eingefärbten Punkten in der Kugel ersichtlich (siehe Abbildung 21).

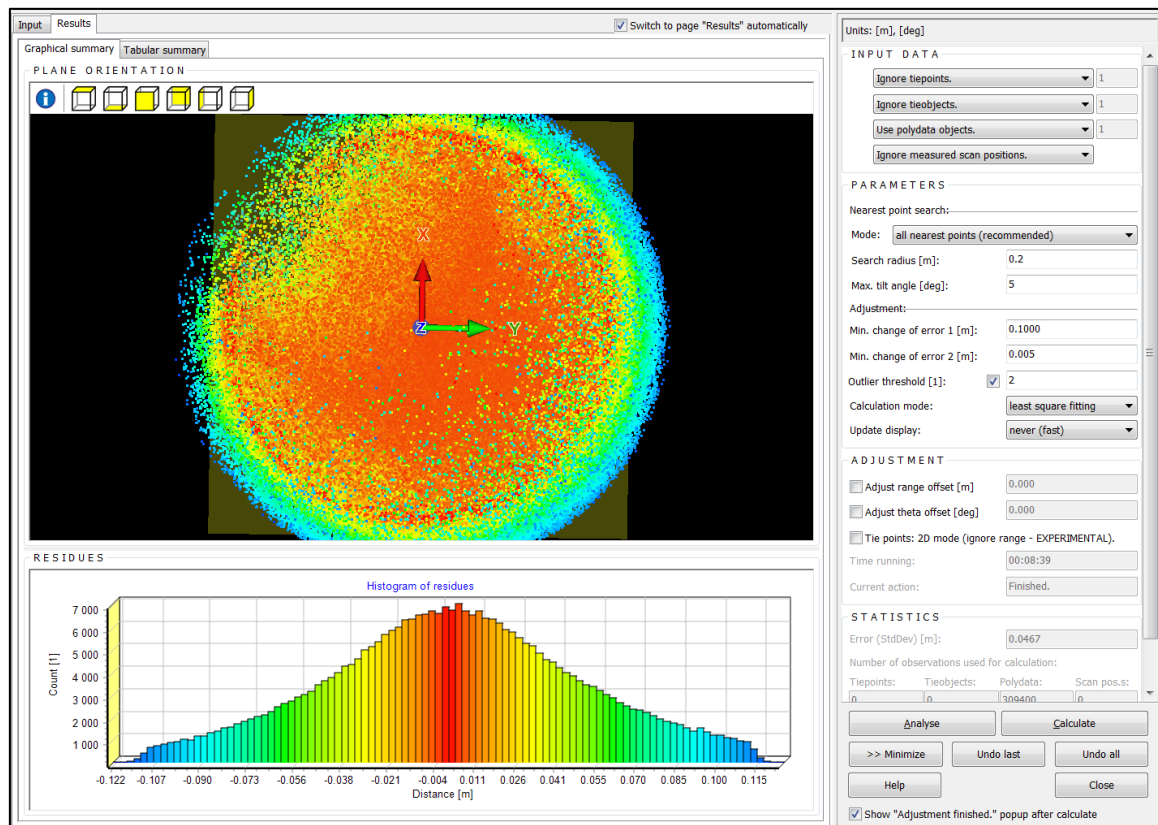


Abbildung 21: Dritte Iteration der Multi Station Adjustment in RiSCAN

Nach der Überprüfung des Resultats war die Registrierung und Georeferenzierung der Punktwolken abgeschlossen. Da alle Punkte, welche sich nicht im Bereich des Blockgletschers befanden, nach diesem Schritt nicht mehr gebraucht wurden, konnten diese für die Weiterverarbeitung gelöscht werden. Dabei wurde kein genauer Perimeter erstellt, sondern es wurden nur grob die Punkte ausgewählt. So konnten etwa 40 Millionen Punkte gelöscht werden.

8.3 Berechnen der Oberfläche aus der Punktwolke

Für die nächsten Arbeitsschritte wurde die Software 3DReshaper (Version 12.0.18214.0) von Hexagon verwendet. Als erstes wurde mit einem Filter die Punktwolke von Ausreißern und Störpunkten befreit. Bei dieser Funktion sind durch Ausprobieren die richtigen Einstellungen zu finden. Dabei sollen möglichst alle fehlerhaften, jedoch kaum brauchbare Punkte gelöscht werden. Dies könnte das Resultat am Ende verfälschen.

Um die Punktwolke trotzdem verkleinern zu können, existiert eine separate Filterfunktion. Diese reduziert die Anzahl Punkte, welche in einer gemeinsamen Fläche liegen. So gehen fast keine Informationen verloren, aber die Datenmenge konnte merklich verkleinert werden. Mit dieser Funktion konnten 25%, also gut 70 Millionen Punkte entfernt werden.

Nach dem Bereinigen und Verkleinern der Punktwolke kann ein dreidimensionales Netz berechnet werden. Dabei wählt der Algorithmus die relevanten Punkte automatisch aus und

rechnet daraus ein Netz. Einzig die Rausch-Verringerung und das Behandeln der Löcher kann eingestellt werden. Bei Ersterem kann die Stärke der Glättung reguliert werden. Beim Zweiten kann die Grösse der Löcher angegeben werden, welche automatisch geschlossen werden sollen. Um das beste Resultat zu erreichen, müssen diese Einstellungen durch iteratives ausprobieren eruiert werden.

Als nächster Schritt können einzelne Lücken gefüllt werden. Dabei ist zu beachten, dass man die Parameter so einstellt, dass die kleinen Löcher gefüllt werden, jedoch die Grossen bestehen bleiben. Das Füllen von grossen Löchern kann zu einer Verfälschung der Resultate führen, da dort die Fläche interpoliert wird und nicht auf Messungen abgestützt ist. Mit diesem Befehl konnten 33 von 50 Lücken im berechneten Netz geschlossen werden (siehe Abbildung 22).

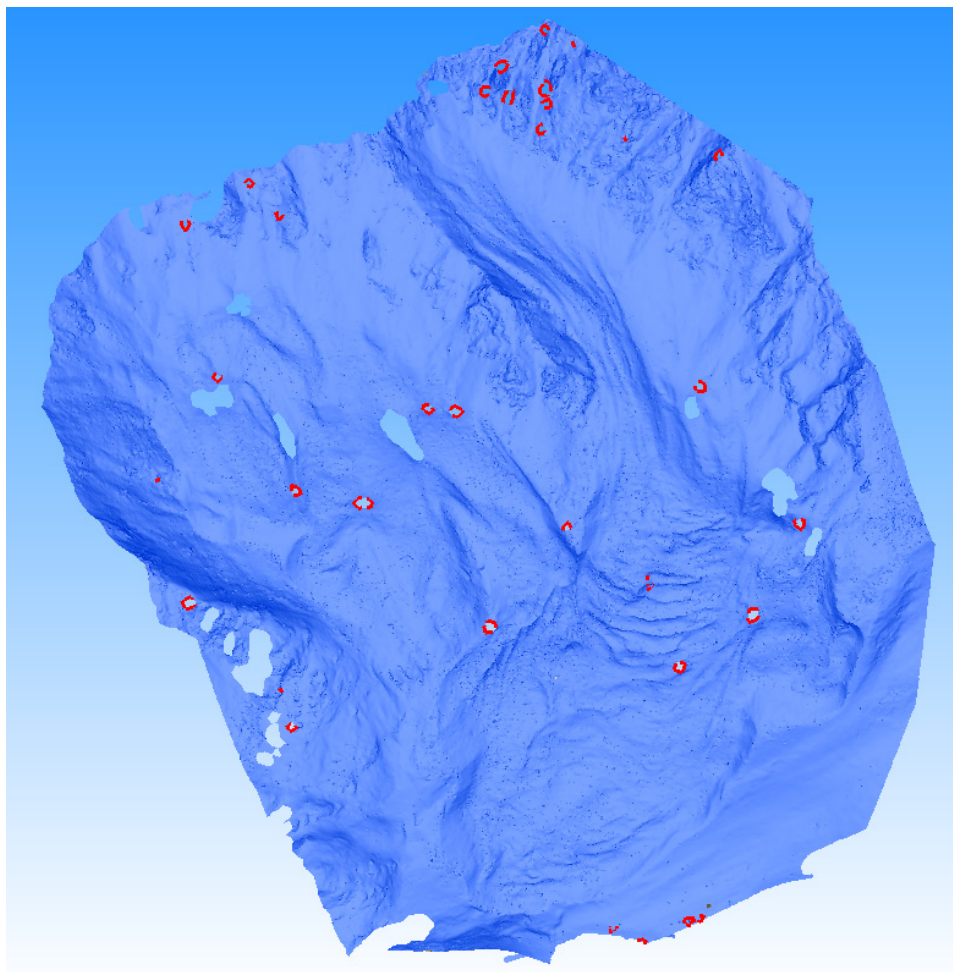


Abbildung 22: Netz 2015 mit den rot markierten und geschlossenen Lücken

8.4 Abschätzen der Genauigkeit der TLS-Messungen

Für die Genauigkeitsabschätzung der TLS-Messungen und derer Produkte wurden drei verschiedene Methoden gewählt. Diese sind anschliessend einzeln aufgeführt und die daraus entstandenen Resultate werden erläutert.

8.4.1 Genauigkeit der Punktwolke

Als erstes wurden die gemessenen Targets für einen Vergleich benutzt. Dieser Vergleich dient der Abschätzung der Punktwolkengenauigkeit. Da die Targets mit einem Strebenstativ auf bekannten Punkten aufgestellt wurden, können die GNSS-Koordinaten der bekannten Punkte für eine Genauigkeitsabschätzung beigezogen werden. Dazu mussten die Koordinaten der Targets aus der georeferenzierten Punktwolke herausgemessen werden. In der nachstehenden Tabelle 14 sind die Differenzen der beiden Koordinatensätze aufgelistet.

Punktnummer	Differenzen Punktwolke - GNSS [m]		
	Ost	Nord	Höhe
K8	0.01	-0.06	-0.03
K11	0.04	-0.03	-0.04
100	-0.05	0.04	-0.07
101	0.01	0.04	-0.09
102	0.00	0.00	-0.07
FP1001	-0.02	-0.07	-0.05
FP1004	-0.04	0.07	-0.04
Standardabweichung	0.03	0.05	0.02

Tabelle 14: Differenzen der Target-Koordinaten: Punktwolke - GNSS

Der 3D-Helmert'sche Punktfehler, berechnet aus den drei Standardabweichungen, beträgt 6.7 cm. Bei den Ost- und Nord-Differenzen ist keine Systematik erkennbar. Jedoch sind in der Höhe alle Differenzen negativ, respektive die Punktwolke ist tiefer als die GNSS-Koordinaten. Dies lässt auf eine ungewünschte Systematik schliessen. Da die Werte im Schnitt nur 5.5 cm betragen, wurde auf eine Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

8.4.2 Höhengenaugigkeit des Oberflächenmodells

Für die Abschätzung der Höhengenaugigkeit des Oberflächenmodells, gerechnet aus den TLS-Daten, wurden die gemessenen Kontrollpunkte auf dem Blockgletscher beigezogen. Dafür wurde die Höhe des Oberflächenmodells bei den bekannten Koordinaten der Kontrollpunkte gemessen und mit den GNSS-Koordinaten verglichen. Die erzielten Resultate sind in der nachstehenden Tabelle 15 ersichtlich.

Punktnummer	Höhendifferenz Modell - GNSS [m]
KP02	-0.05
KP03	-0.25
KP04	-0.16
KP05	-0.19
KP06	-0.29
KP13	-0.29
FP1013	-0.07
Standardabweichung	0.10

Tabelle 15: Höhendifferenzen des Oberflächenmodells zu den Kontrollpunkten

Die Höhengenaugigkeit des Oberflächenmodells beträgt rund 10 cm. Es ist eine Systematik erkennbar, welche mit dem Erstellungsprozess des Oberflächenmodells und den Gegebenheiten auf dem Blockgletscher erklärt werden kann. Bei der Berechnung des 3D-Netzes glättet der Algorithmus automatisch die Oberfläche. Da alle Punkte auf einem markanten Stein liegen, ist die Wahrscheinlichkeit gross, dass an diesem Ort die Oberfläche durch Glätten etwas tiefer liegt. Beim Betrachten des Oberflächenmodells konnte festgestellt werden, dass bei fast allen Kontrollpunkten die Oberfläche durch Glätten tiefer liegt als der Kontrollpunkt. Es war nicht möglich, die komplexe Oberflächenstruktur mit dem 3DReshaper so detailliert zu modellieren.

8.4.3 Genauigkeitsabschätzung des Laserscanners

Die dritte Methode der Genauigkeitsabschätzung beruht auf einem Vergleich von zwei verschiedenen Scans, welche von der gleichen Station (FP1009) und mit den gleichen Einstellungen gemacht wurden. Dieser Vergleich hatte das Ziel, die Genauigkeit des Laserscanners zu schätzen. Mit dieser Aufnahmekonfiguration müssten die beiden Scans theoretisch genau die gleichen Punkte hervorbringen, dies ist jedoch nie der Fall.

Um nun die Genauigkeit des Scanners abschätzen zu können, muss aus den Punktwolken je eine Oberfläche berechnet werden. Diese wurden in der Software 3DReshaper mit den gleichen Einstellungen erstellt. Der anschliessende Vergleich der Oberflächen ist in Abbildung 23 ersichtlich.

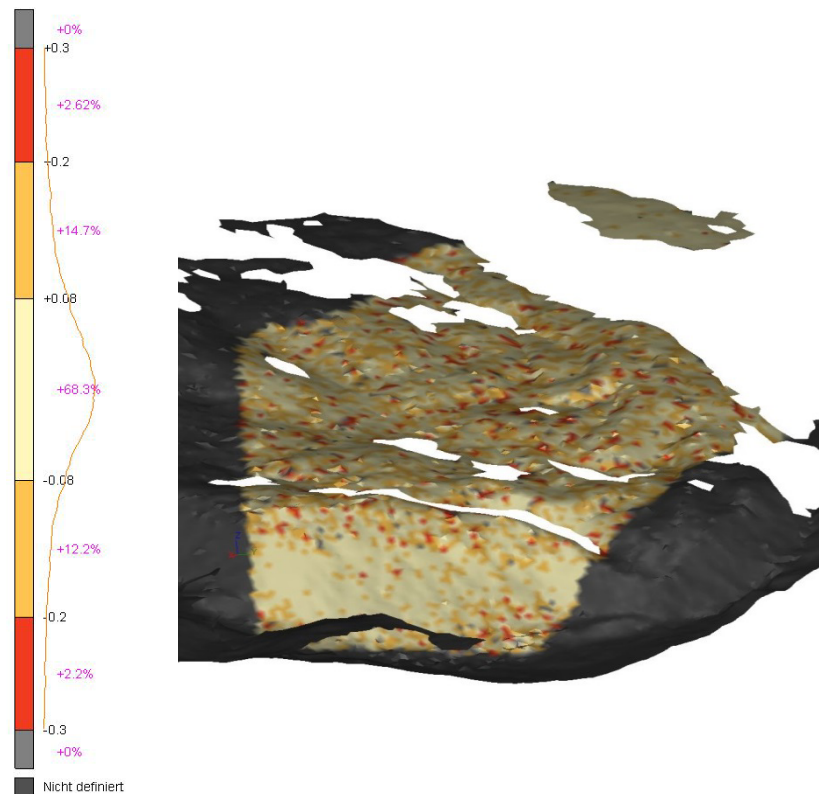


Abbildung 23: Genauigkeitsabschätzung durch einen Vergleich von zwei Oberflächen

Aus Abbildung 23 ist ersichtlich, dass etwa 68% (1σ) der Oberflächen innerhalb von 8 cm in der Höhe zusammenpassen. In einem Bereich von 20 cm liegen 95% (2σ). Die meisten grossen Abweichungen liegen im mittleren Teil der Oberflächen, auf welche eher schleifend gemessen wurde. Bei der Blockgletscherfront (in Abbildung 23 unten) passen die Oberflächen sehr gut zueinander.

8.5 Fazit

Die TLS-Daten konnten erfolgreich ausgewertet und daraus ein Oberflächenmodell erstellt werden. Die Schwierigkeit bestand darin, die richtigen Parameter zu finden, um ein optimales Ergebnis zu erhalten.

Die Software von Riegl konnte mit vielseitigen Funktionen und einem guten Resultat überzeugen. Die Einarbeitung in das Programm war jedoch knifflig.

Der 3DReshaper vermochte bei der Oberflächenberechnung nicht vollständig zu überzeugen, da zu wenig Einstellungen getroffen werden konnten und das Resultat etwas zu stark geglättet war. Die Strukturierung der Blockgletscheroberfläche konnte aufgrund der Glättung nicht optimal abgebildet werden. Dafür war die Einarbeitung in die Software relativ einfach.

Die Höhengenaugkeit ist mit 10 cm nicht so gut wie erwartet, was vor allem an der Glättung der Oberfläche liegt. Trotzdem reicht diese Genauigkeit aus, um an einigen Stellen des Blockgletschers signifikante Veränderungen festzustellen.

9 Datenauswertung UAV

Die Auswertung der Befliegungsdaten durch die eBee Drohne erfolgte nach dem Ablaufschema in Abbildung 24.

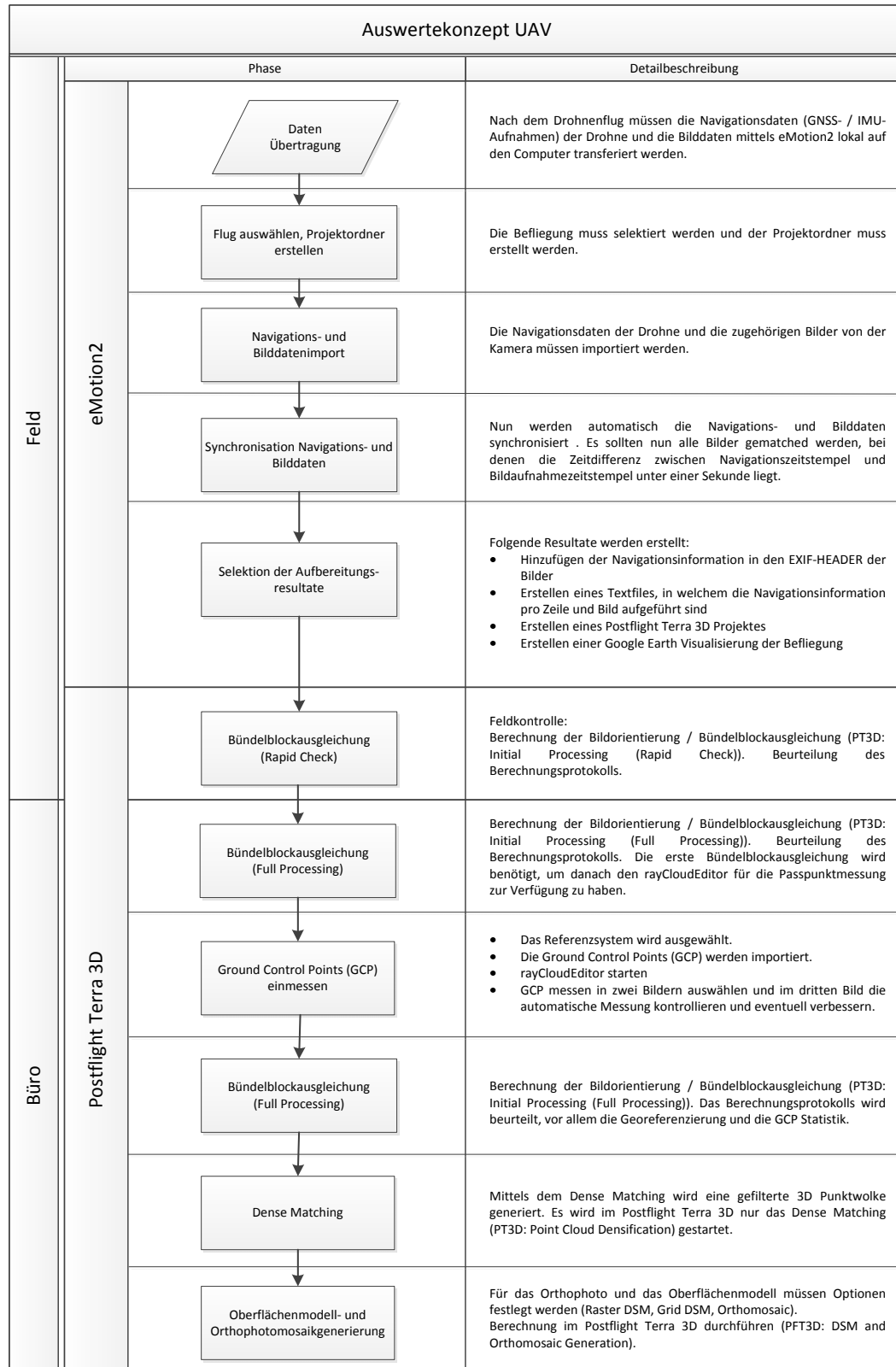


Abbildung 24: Auswertekonzept UAV

9.1 Datenaufbereitung im Felde

Direkt auf dem Feld mussten nach der Befliegung die Navigationsdaten der Drohne (GNSS und IMU) und die Bilddaten der Kamera mittels der Software eMotion2 (Version 2.4.8) von senseFly lokal auf den Feldlaptop transferiert werden. Anschliessend wurden die Navigationsdaten mit den Bilddaten synchronisiert. Alle Bilder, bei denen der Zeitunterschied zwischen Bildaufnahme und Navigationszeitstempel unter einer Sekunde lag, wurden gematched. Alle 123 Bilder konnten verwendet werden. Zum Schluss der Auswertung konnte das weitere Vorgehen mit eMotion2 ausgewählt und Resultate generiert werden. Folgende Resultate wurden erzeugt:

- Die Navigationsinformation wurde in den EXIF-Header der Bilder hinzugefügt.
- Ein Textfile wurde erstellt, in welchem pro Zeile das Bild mit den dazugehörigen Navigationsinformationen aufgelistet ist.
- Eine Google Earth Visualisierung der Befliegung wurde generiert.
- Das Postflight Terra 3D Projekt wurde erstellt, mit welchem die weitere Auswertung durchgeführt wurde.

Anschliessend wurde mit der Software Postflight Terra 3D (Version 3.4.28) von senseFly das erstellte Projekt geöffnet und die Bündelblockausgleichung mit der Option *Rapid Check* durchgeführt. Der Quality Report des Rapid Checks wurde auf Macun beurteilt und die Befliegung wurde als in Ordnung befunden. Mit den Bildern wurde eine Fläche von 69.6 ha aufgenommen. Die durchschnittliche Bodenauflösung beträgt 9.88 cm. In Abbildung 25 (links) ist ein Preview des Orthophotos zu sehen und in Abbildung 25 (rechts) ist der Preview des digitalen Oberflächenmodells zu erkennen.

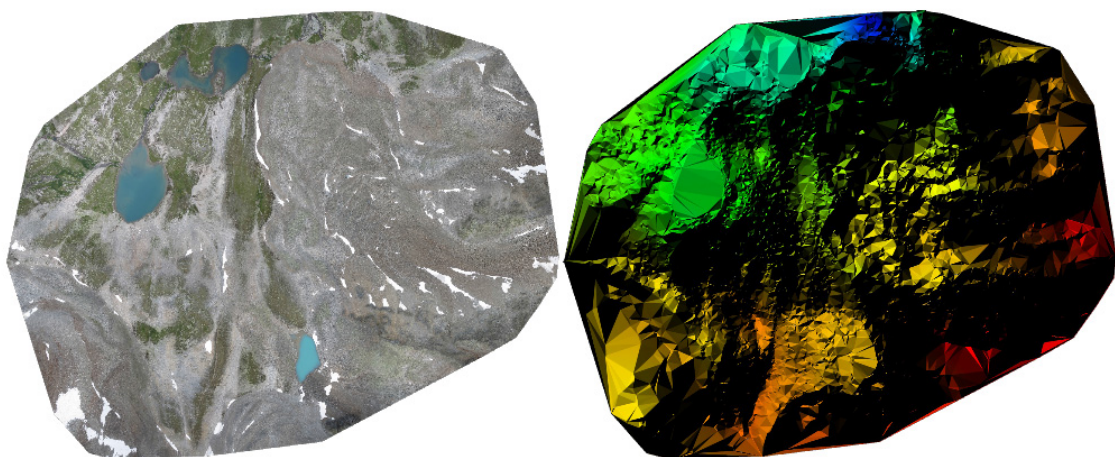


Abbildung 25: Rapid Check Preview Orthophoto (links) und Oberflächenmodell (rechts)

9.2 Datenauswertung im Büro

Nach der Messkampagne konnte in Muttenz die komplette Auswertung der Befliegung mit der Software Postflight Terra 3D durchgeführt werden.

Bündelblockausgleichung

Als erstes musste erneut die Bündelblockausgleichung mit der Option *Full Processing* durchgeführt werden, damit für die Ground Control Points (GCP) Messung der rayCloudEditor zur Verfügung stand. Für die Passpunktmessung musste das Bezugssystem (CH1903+) und der Bezugsrahmen (LV95 / LHN95) ausgewählt werden. Nachdem die Passpunkte (definitive Koordinaten von 2015 aus der GNSS Messungen, siehe Kapitel 7.4.1) eingelesen wurden, konnten im rayCloudEditor die Passpunkte in den Bildern ausgewählt werden (siehe Abbildung 26).

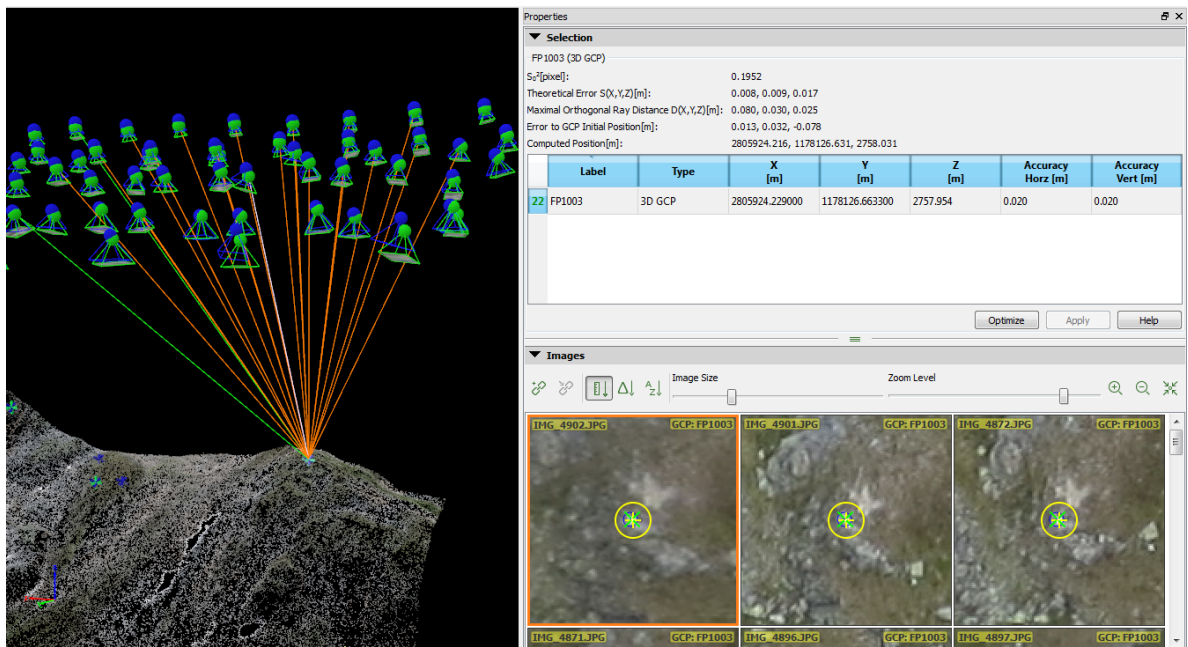


Abbildung 26: rayCloudEditor Passpunktmessung

Nachdem in zwei Bildern ein Passpunkt ausgewählt wurde, berechnete die Software bereits die provisorische Position in den weiteren Bildern. Diese wurde überprüft und gegebenenfalls verbessert. Von den geplanten Passpunkten (siehe Kapitel 6.2.5) waren alle bis auf Punkt FP1007 und FP1010 im Bildperimeter. Somit konnten zehn Passpunkte verwendet werden. Im Durchschnitt konnte jeder Passpunkt in 16 Bildern gemessen werden.

Nach der Passpunktmessung wurde die definitive Bündelblockausgleichung mit der Option *Full Processing* berechnet. Da nun GCP's vorhanden waren, wurde die Georeferenzierung durchgeführt. In Abbildung 27 sind die automatisch generierten Verknüpfungspunkte, die GCP's und die Aufnahmeposition der Bilder dargestellt.

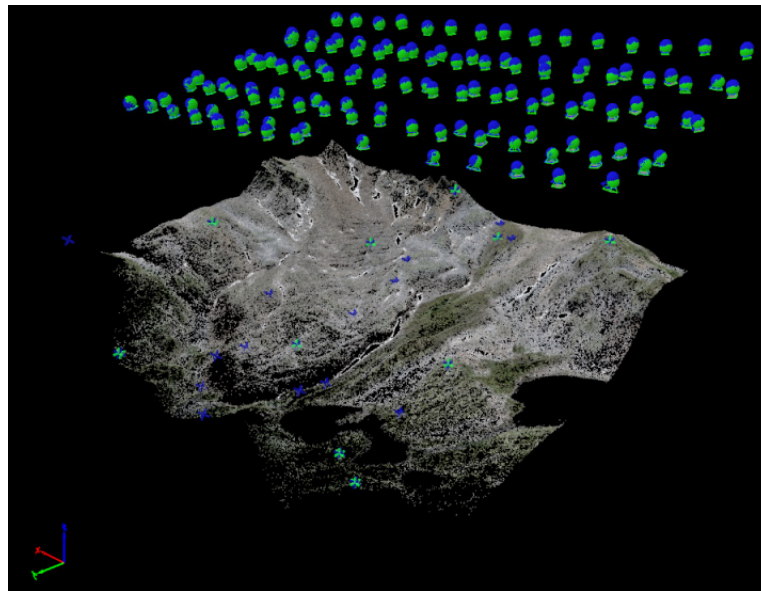


Abbildung 27: Verknüpfungspunkte, GCP, Aufnahmeposition der Bilder

Der Quality Report der Bündelblockausgleichung befindet sich im *Anhang A10 Quality Report der Bündelblockausgleichung UAV*. Die Bodenauflösung hat sich im Vergleich zum Rapid Check (9.88 cm) auf 9.71 cm verbessert. Mit den Bildern konnte nun eine Fläche von 94.8 ha abgedeckt werden. Die Genauigkeiten der Georeferenzierung sind untenstehend aufgelistet:

- Standardabweichung N: 5.2 cm
- Standardabweichung E: 5.1 cm
- Standardabweichung H: 7.1 cm

Dense Matching

Aus dem Dense Matching wurde eine Punktwolke mit mehr als 34 Millionen Punkten berechnet. Durchschnittlich erstellte es 19 Punkte pro m^3 .

Oberflächenmodell- und Orthophotomosaikgenerierung

Aus der generierten Punktwolke und den Bilddaten wurde ein texturiertes Oberflächenmodell gerechnet und ein Orthophoto erstellt (siehe Visualisierungen Kapitel 10.6). Es wurde festgestellt, dass das Oberflächenmodell nicht georeferenziert ist. Daher wurde aus der georeferenzierten Punktwolke mit dem 3DReshaper eine neue Oberfläche analog zu Kapitel 8.3 gerechnet. Die neu gerechnete Oberfläche besass kaum Löcher, die gefüllt werden mussten.

9.3 Höhengenaugigkeit Oberflächenmodell aus UAV Daten

Mit dem neu generierten Oberflächenmodell aus dem 3DReshaper konnte der Höhenvergleich mit den GNSS-Höhen stattfinden. Dabei wurden die Höhen der Kontrollpunkte, welche mit GNSS bestimmt wurden, mit dem Oberflächenmodell aus den UAV-Daten verglichen. Indem im Modell, bei der jeweiligen Lage des Punktes, die Höhe abgegriffen wurde, konnte diese mit den GNSS-Höhen verglichen werden. In Tabelle 16 ist die Höhengenaugigkeit des Oberflächenmodells ersichtlich.

Punktnummer	Höhendifferenz Modell - GNSS [m]
KP03	0.14
KP04	-0.14
KP05	0.00
KP06	-0.14
KP13	-0.22
FP1013	-0.09
Standardabweichung	0.13

Tabelle 16: Höhengenaugigkeit Oberflächenmodell aus UAV Daten

Die erzielte Höhengenaugigkeit des Oberflächenmodells beträgt 13 cm. Wie bereits bei der Genauigkeitsuntersuchung der TLS-Daten ersichtlich ist (siehe Kapitel 8.4.2), glättet der 3DReshaper das Oberflächenmodell zu stark. Es konnte keine bessere Einstellung gefunden werden, die ein detaillierteres Oberflächenmodell generieren lässt.

9.4 Fazit

Die UAV-Auswertung konnte mit den vorhandenen Daten erfolgreich durchgeführt werden. Ein Orthophoto und ein texturiertes Oberflächenmodell konnten erstellt werden. Leider war das automatisch erstellte Oberflächenmodell nicht georeferenziert. Darum musste eine neue Oberfläche mit der Software 3DReshaper gerechnet werden.

Die resultierende Bodenauflösung war mit 10 cm höher, als die in Kapitel 6.2.5 bei der Flugplanung eingestellte Bodenauflösung von 7 cm. Die 3 cm Differenz kommen zu Stande, da in der Befliegung nur ein Teil des Kreuzfluges durchgeführt werden konnten. Die 7 cm Bodenauflösung wären erreicht worden, hätte der ganze Flug wie geplant durchgeführt werden können.

10 Analysen und Visualisierungen

Im folgenden Kapitel sind verschiedenste Analysen und Visualisierungen aus den vorhandenen Grundlagendaten (TLS-Daten 2012, Geländemodell 1939, Luftbildern und ein historisches Foto) und den aufgenommenen Daten während der Messkampagne 2015 dargestellt.

10.1 Fotografischer Vergleich 1923 - 2015

Beim terrestrischen Bildvergleich wurde versucht, zwei Bilder mit gleicher Aufnahmekonstellation zu vergleichen. Dabei handelt es sich beim Bild in Abbildung 28 links um ein Bild aus dem Jahr 1923 von Ed. Frey und beim rechten Bild um eine eigene Aufnahme während der Messkampagne 2015. Das Bild von 1923 wurde vom Fuorcla Val Gondas aufgenommen, welcher 2015 nicht bestiegen werden konnte und daher nur ein perspektivähnliches Bild entstanden ist.



Abbildung 28: Fotografischer Vergleich 1923 (Frey, 1923) (links) – 2015 (rechts)

Aufgrund des nicht genau gleichen Aufnahmestandpunktes, wurde auf weitere Auswertungen der zwei Bilder verzichtet. Bei einer Aufnahme vom gleichen Standpunkt aus, könnten die Bilder übereinander projiziert werden und dabei in beiden Bildern der Blockgletscher digitalisiert werden. Somit dienen die Bilder rein als Illustration und Dokumentation des Gebiets Macun mit einem Zeitunterschied von 92 Jahren.

10.2 Zeitreihen aus Luftbildern 1939 - 1973 - 2000 - 2015

Aus vier Luftbildern zwischen 1939 und 2015 wurde in Abbildung 29 eine Zeitreihe dargestellt. Das Bild von 2015 entstand aus der Befliegung mit der eBee Drohne während der Messkampagne 2015. Dabei handelt es sich um ein Orthophoto (georeferenziert). Beim Bild aus dem Jahr 2000 handelt es sich ebenfalls um ein Orthophoto, welches der SNP zur Verfügung stellte. Damit noch zwei ältere Bilder für den Vergleich zur Verfügung stehen,

wurden über das Luftbild-Informationssystem (LUBIS) von swisstopo ein Luftbild aus dem Jahr 1939 und eines aus 1973 bezogen. Ausschlaggebende Kriterien für die zwei Bilder waren, dass sie zeitlich einige Jahre älter sind als die bereits vorhandenen Bilder und möglichst wenig Schnee auf den Luftbildern zu erkennen ist, was einem Aufnahmezeitpunkt zwischen Juli und September entspricht. Für das Jahr 1973 wurde ein optimales Bild gefunden. Da bei den älteren Bildern nur solche mit Schnee zu finden waren, wurde 1939 als ältester Zeitpunkt gewählt.

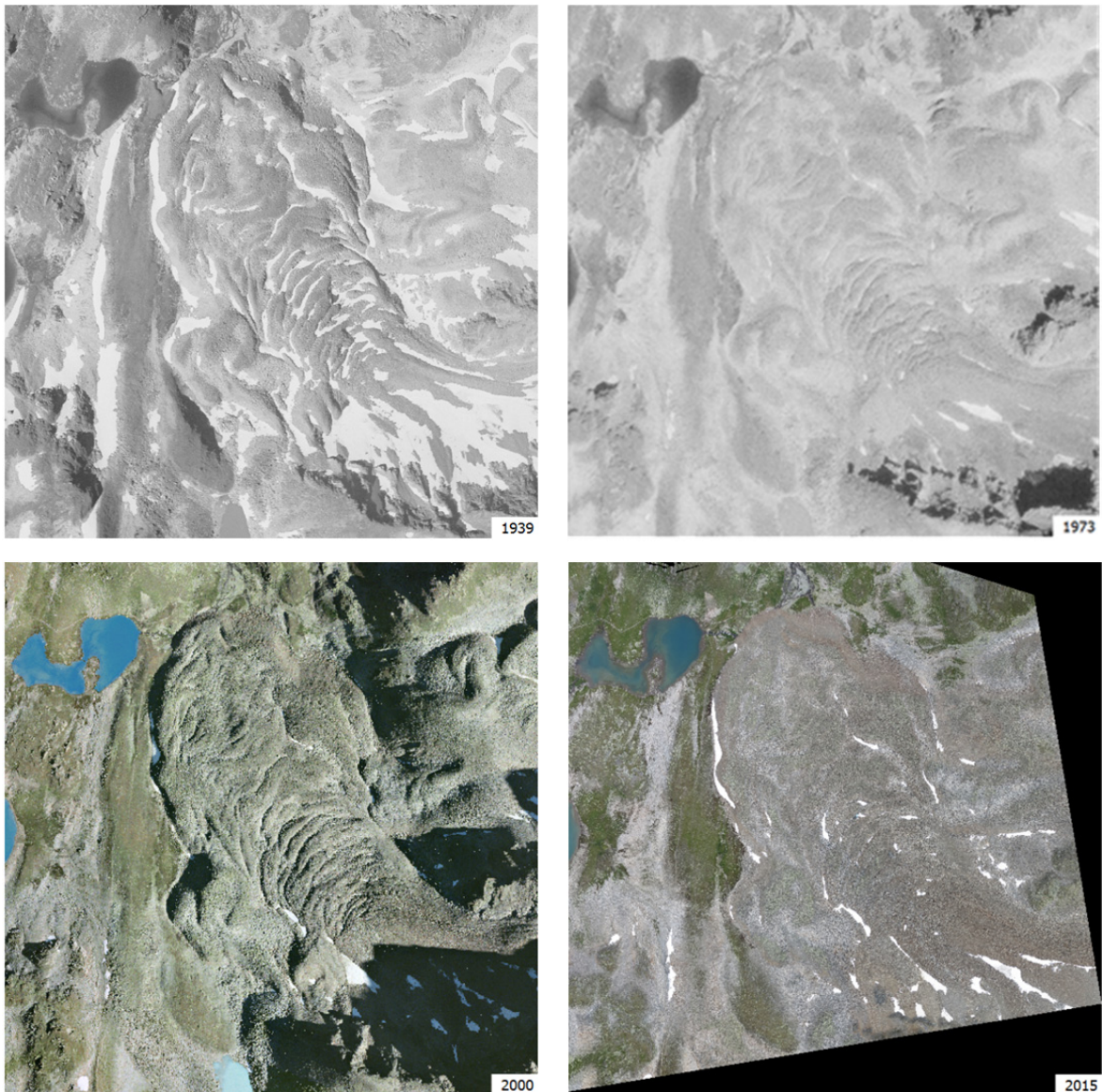


Abbildung 29: Luftbilder 1939, 1973, 2000, 2015

Die Luftbilder aus dem Jahr 1939 und 1973 mussten vorgängig über Passpunkte georeferenziert und entzerrt werden. Dies erfolgte mit dem OpenSource Programm QGIS (Version 2.4.0). Als Referenzbild diente das Orthophoto aus dem Jahr 2000. Über genügend Passpunkte konnten die beiden historischen Luftbilder mit einer Thin-Plate-Spline Transforma-

tion georeferenziert werden. Die Passpunkte waren in beiden Bildern sichtbar und es wurde von ihnen angenommen, dass sie sich im Verlauf der Zeit nicht geändert haben. In allen vier Zeitständen wurde der Blockgletscher digitalisiert. Die erstellten Linien wurden einmal im Luftbild 1939 (siehe Abbildung 30 links) und einmal im Orthophoto 2015 (siehe Abbildung 30 rechts) dargestellt. Es war nicht einfach, die genaue Abgrenzung des Blockgletschers in den Bildern zu erkennen. Vor allem in den älteren Bildern und im Bereich der Front des Blockgletschers stellte sich dies als problematisch heraus.

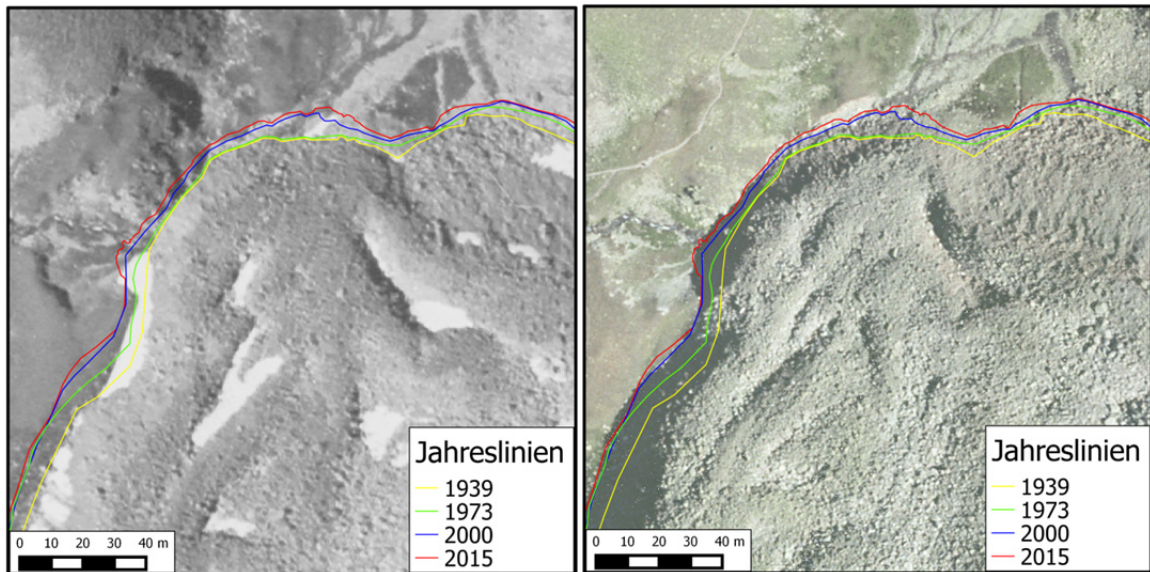


Abbildung 30: Detailansicht digitalisierter Blockgletschergrenze, Hintergrundkarte: 1939 (links) und 2015 (rechts)

In Abbildung 30 ist der Trend der Vorwärtsbewegung des Blockgletschers ersichtlich. Es wurde im Durchschnitt eine Bewegung von zirka 8 cm pro Jahr festgestellt. Dies ergibt eine Bewegung von gut 6 m zwischen 1939 und 2015.

10.3 Vergleich 1939 - 2015 mit Flugbilddaten

Mit den Oberflächenmodellen von 1939 und 2015, welche aus den Befliegungsdaten abgeleitet wurden, konnte eine langjährige Deformationsanalyse berechnet werden.

Aus den Luftbilddaten vom Jahr 1939 wurde vom SNP eine Betaversion einer 3D Punktwolke generiert. Diese Punktwolke wird mit den neuen Ergebnissen der Befliegung 2015 verglichen. Als Erstes wurde aus der Punktwolke 1939 ein Netz (Oberflächenmodell) berechnet.

Als Zweites musste das Netz 1939 in den richtigen Bezugsrahmen gebracht werden. Dies geschah, indem aus den Laserscanningdaten von 2012 die Bereiche ausgeschnitten wurden, welche laut SNP als Fels definiert sind (siehe Abbildung 31). Das Netz 1939 wurde dann mit der Funktion *Bestgeeignete Registrierung* von 3DReshaper in das Netz 2012 (nur Fels) transformiert.



Abbildung 31: Felszonen im Netz 2012

Im hinteren Teil (Wurzelzone) des Oberflächenmodells 1939 wurden einige Löcher gefüllt (siehe Abbildung 32). Das Ergebnis war plausibel und verfälschte das Oberflächenmodell 1939 nicht.

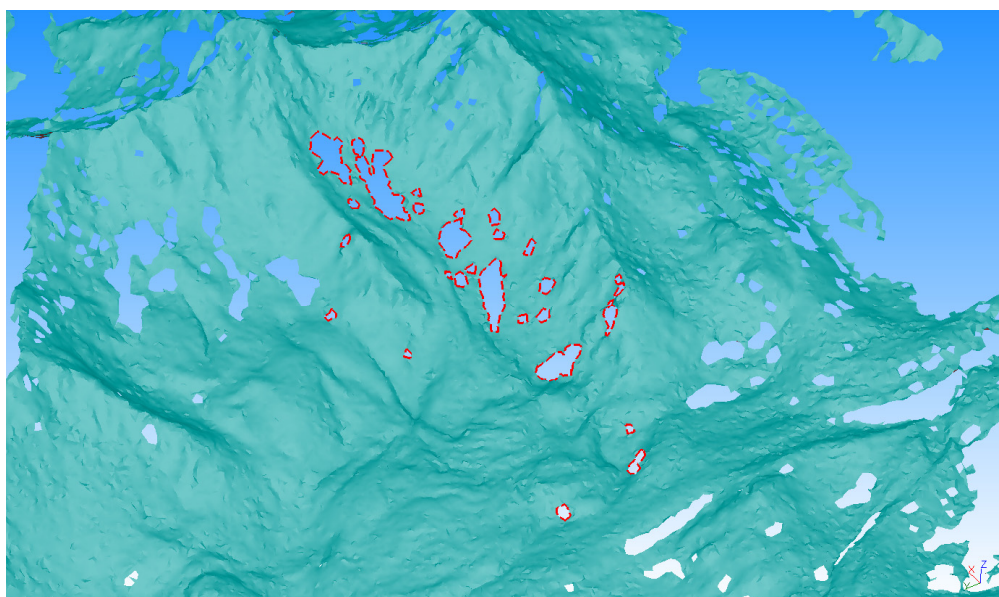


Abbildung 32: Oberflächenmodell 1939, Löcher füllen

Anschliessend konnte mit dem Netz 1939 und dem Netz 2015 eine Deformationsanalyse berechnet und verschiedene Visualisierungen durchgeführt werden.

10.3.1 Oberflächenvergleich aus Flugbilddaten

Für den Vergleich der beiden Oberflächen wurde die Funktion *Vergleichen / Überprüfen* des 3DReshapers benutzt. Damit können zwei Modelle in eine bestimmte Richtung miteinander verglichen werden.

Für eine geeignete Farbwahl, welche bildschirm-, druck-, und farbenblindenfreundlich ist, wurden der Color Brewer 2.0 (Brewer / Harrower / Pennsylvania State University, 2015) verwendet. Damit wurden die Farben in Abbildung 33 ausgewählt. Diese Farben wurden verwendet, um die Deformationstrends zu visualisieren. Dabei steht im Vergleich von 1939 zu 2015 rot für eine Zunahme und blau für eine Abnahme der Geländehöhe. In der Abbildung 34 ist der langjährige Deformationstrend zwischen 1939 und 2015 ersichtlich. Gut zu erkennen ist, dass die Wurzelzone des Blockgletschers im Vergleich zu 1939 bis zu 16 m eingebrochen ist (blau eingefärbt, siehe Detailansicht Abbildung 35 links). Auch ist zu erkennen, wie der Blockgletscher an seiner Front bis zu 12 m durch das Hangabwärtskriechen zugenommen hat (rot eingefärbt, siehe Detailansicht Abbildung 35 rechts). Weiter ist im Osten des Blockgletschers ein Hangrutsch zu erkennen.

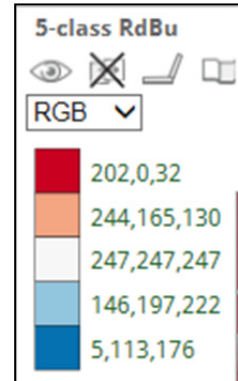


Abbildung 33: Farbwahl für die Visualisierungen (Brewer / Harrower / Pennsylvania State University, 2015)

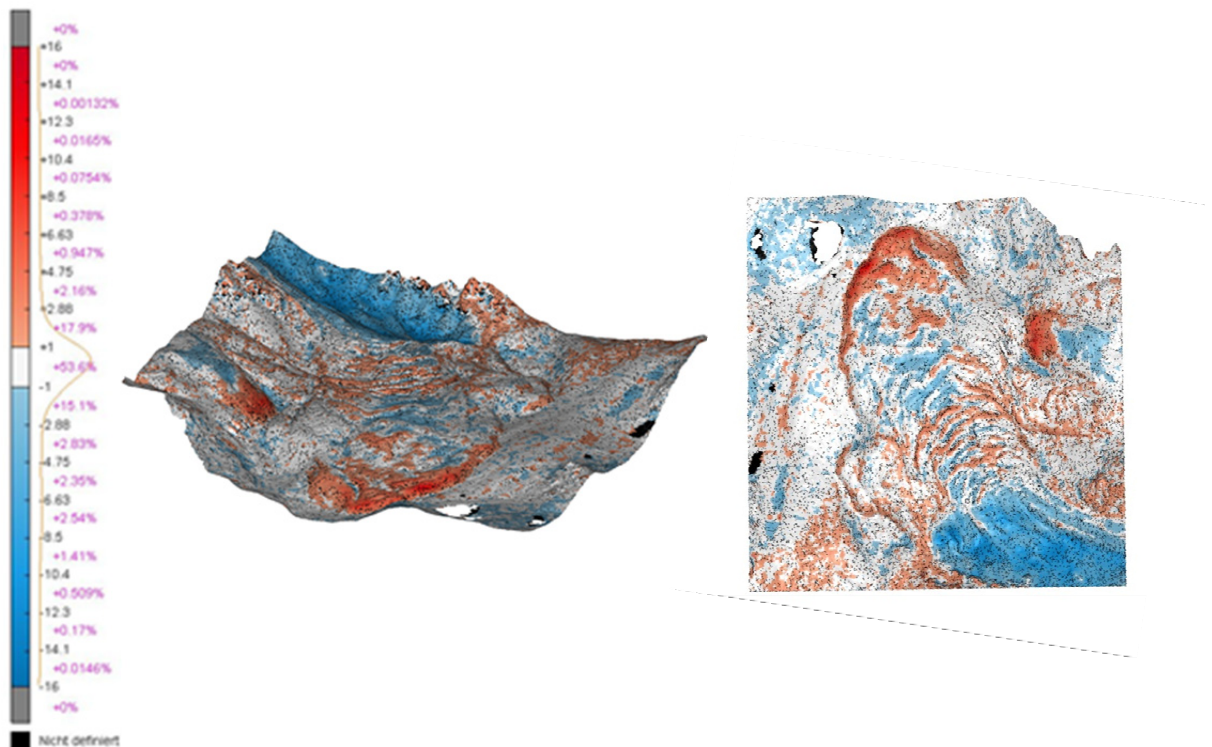


Abbildung 34: Oberflächenvergleich 1939 - 2015, links: Übersicht, rechts: Ansicht von oben

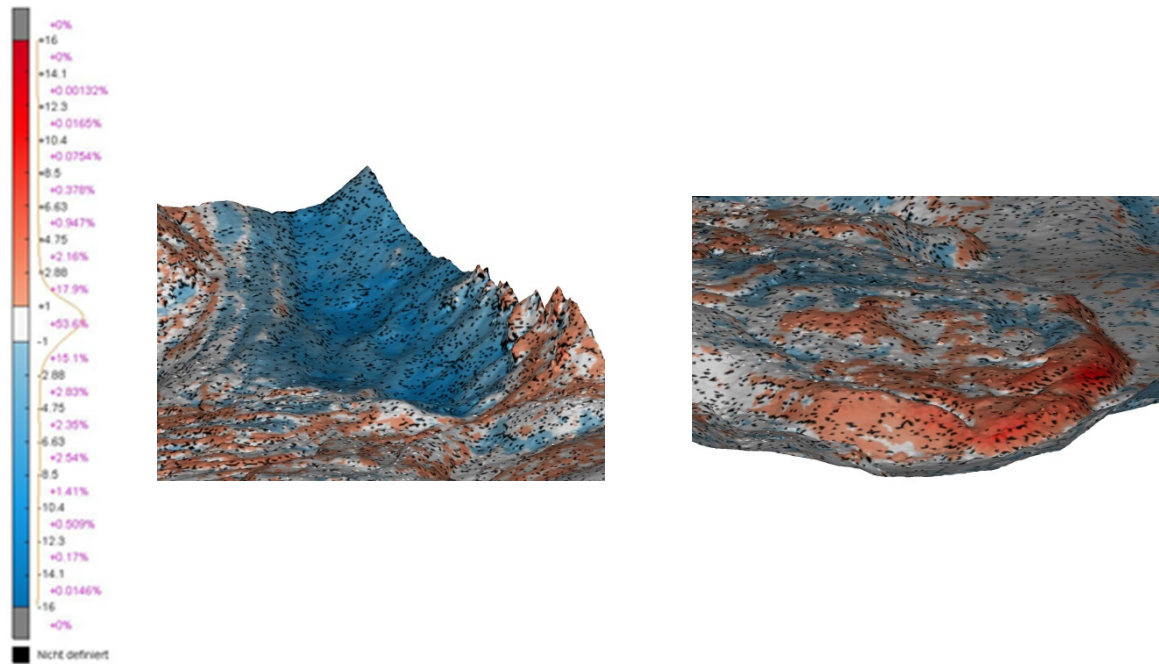


Abbildung 35: Oberflächenvergleich 1939 - 2015, links: Ansicht Wurzelzone, rechts: Ansicht Front

10.3.2 Volumenanalyse aus Luftbilddaten

Mit 3DReshaper ist es möglich von zwei Oberflächenmodellen die Volumen zu berechnen und diese zu vergleichen. Voraussetzung dafür ist, dass die Modelle lückenlos und auf den gleichen Perimeter zugeschnitten sind. Leider war es nicht möglich die beiden Oberflächen auf genau den gleichen Perimeter zu beschneiden, da die Dreiecksvermaschung nicht verändert wurde. Das heisst, dass die Dreiecke am Rand nicht zugeschnitten, sondern lediglich als vollständiges Dreieck gelöscht oder behalten wurden. Somit entstand, je nach Modell, ein unterschiedlicher Rand (siehe Abbildung 36). Die Bezugsebene der Volumenberechnung wurde auf einer Höhe von 2'500 m ü. M. definiert. Der verschiedene Rand wirkt sich stark auf die Volumenberechnung aus, weshalb die Resultate mit grosser Zurückhaltung zu betrachten sind.

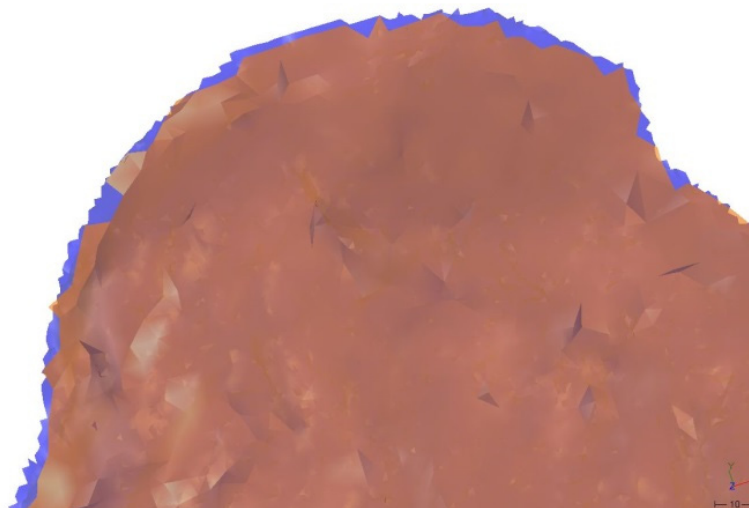


Abbildung 36: Perimeter Volumenvergleich, blau: 2015, orange: 1939

Als Erstes wurde der gesamte Blockgletscher analysiert (siehe Abbildung 37). Über diesen Perimeter wurde eine Volumenzunahme von knapp einer Million Kubikmeter berechnet. Das würde eine durchschnittliche Hebung von über 3 m bedeuten.

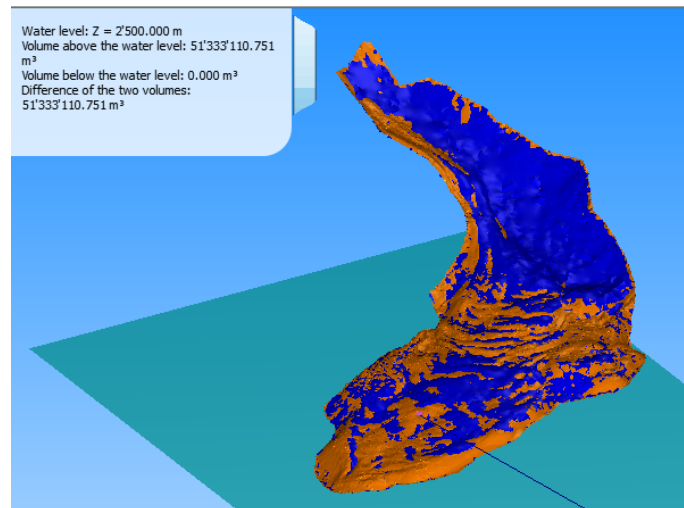


Abbildung 37: Volumenanalyse 1939 - 2015 aus Luftbilddaten gesamter Blockgletscher

In Abbildung 37 ist das Oberflächenmodell von 1939 blau und das von 2015 orange eingefärbt. Es ist leicht zu erkennen, dass dieses Resultat nicht stimmen kann, denn im hinteren Teil ist das Modell von 1939 fast überall höher. Deshalb sollte eher eine Volumenabnahme resultieren. Aus diesem Grund wurden weitere verschiedene Perimeter definiert. Auch die Unterteilung des Blockgletschers in einen vorderen und einen hinteren Teil ergab kein plausibles Ergebnis. Einzig ein verkleinerter Bereich im hinteren Teil ergab eine durchschnittliche Senkung von knapp 15 m.

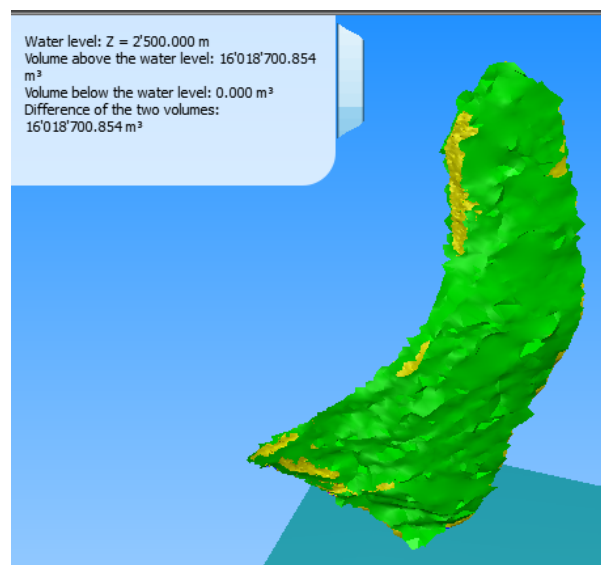


Abbildung 38: Volumenanalyse 1939 - 2015 aus Luftbilddaten im Wurzelbereich

Dies kann mit der Deformationsanalyse von oben verglichen werden. Dort sind maximale Senkungen von 16 m festgestellt worden. Somit ist die berechnete Volumendifferenz von etwa einer Million Kubikmeter etwas zu hoch.

Die unbrauchbaren Resultate entstanden aufgrund der fehlenden Möglichkeit die beiden Oberflächenmodelle auf den exakt gleichen Perimeter zu beschneiden.

10.3.3 Profile aus Luftbilddaten

Eine dritte Möglichkeit zwei Oberflächen miteinander zu vergleichen, besteht in der Erzeugung von Profilen. Dabei können in gezielten Bereichen zwei oder mehrere Jahresstände einander gegenübergestellt werden. Es wurden verschiedene Profile über den Blockgletscher gelegt, welche sich im *Anhang A11 Profile aus Flugbilddaten* befinden. In allen nachfolgenden Abbildungen von Profilen sind die Profillinien von 1939 blau und die von 2015 rot eingefärbt. Für eine Übersicht wurden Profile über die ganze Länge des Blockgletschers erstellt (siehe Abbildung 39).

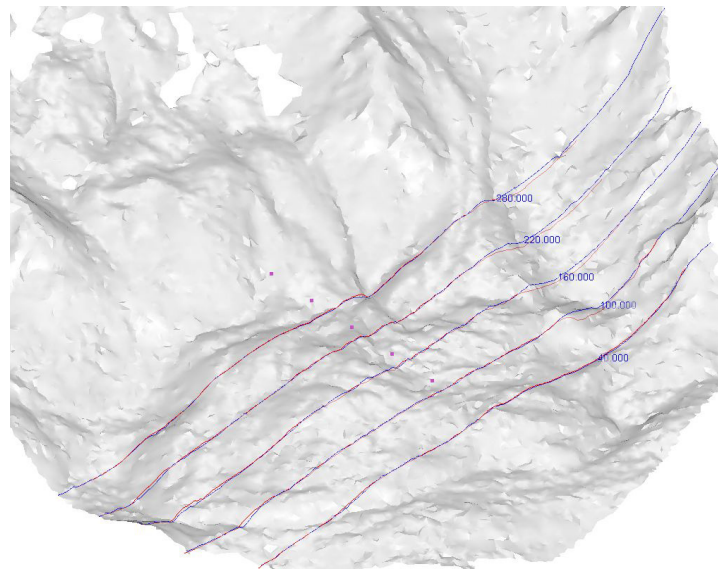


Abbildung 39: Längsprofile 1939 - 2015 aus Luftbilddaten, Übersicht

Im Zungenbereich des Blockgletschers konnten mit den angelegten Profilen eindeutig Bewegungstrends festgestellt werden (siehe Abbildung 40). Das Vorwärtskriechen des Blockgletschers ist klar ersichtlich.

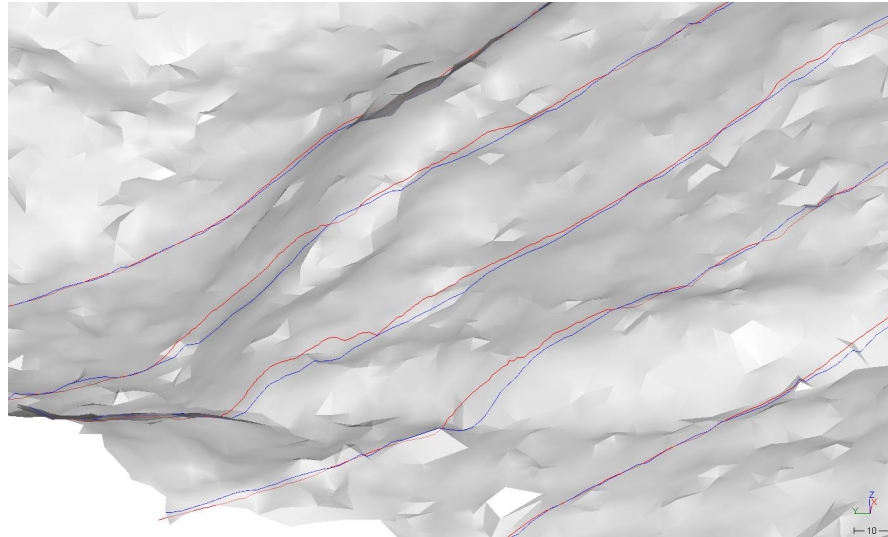


Abbildung 40: Längsprofile 1939 - 2015 aus Luftbilddaten im Frontbereich

Im mittleren Teil des Blockgletschers ist an einigen Stellen die Oberfläche etwas eingebrochen und an anderen Stellen hat sich mehr Gestein angesammelt.

Im Wurzelbereich des Blockgletschers lässt sich ein eindeutiger Trend feststellen (siehe Abbildung 41). Es ist dieses Jahr gegenüber 1939 ein Einbruch bei einigen Profilstellen von bis zu 12 m festzustellen.

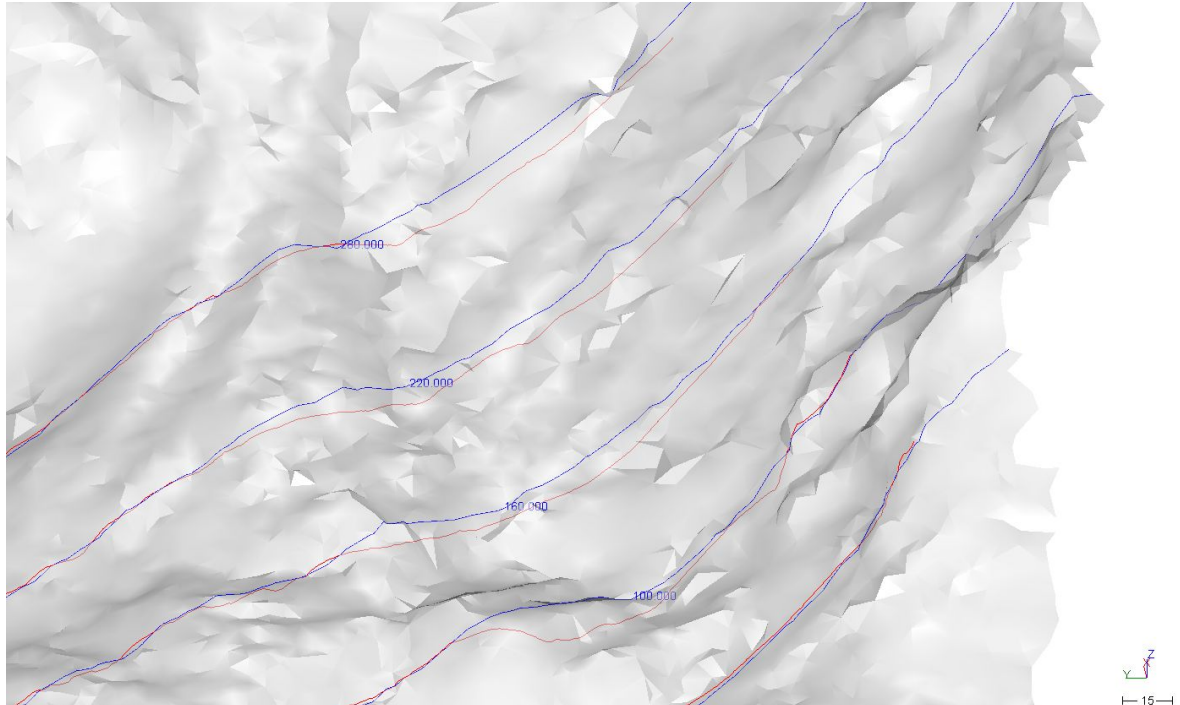


Abbildung 41: Längsprofile 1939 - 2015 aus Luftbilddaten im Wurzelbereich

Neben den oben erläuterten Längsprofilen wurden Detailprofile im Bereich der Gletscherfront und über den Hangrutsch östlich des Blockgletschers erstellt.

Bei den Detailprofilen ist jeweils ein Bewegungstrend des Blockgletschers ersichtlich. In Abbildung 42 ist ein Detailprofil über den Hangrutsch östlich des Blockgletschers abgebildet. Im Vergleich der Profile ist das Profil von 2015 schwarz und das von 1939 grau dargestellt. Die Farbwahl der Detailprofile ist nicht optimal. Sie wurde von der Software 3DReshaper vorgegeben und konnte nicht geändert werden. Es ist deutlich ersichtlich, dass im oberen Teil Material abgetragen wurde, wohingegen sich Material im unteren Teil angesammelt hat.

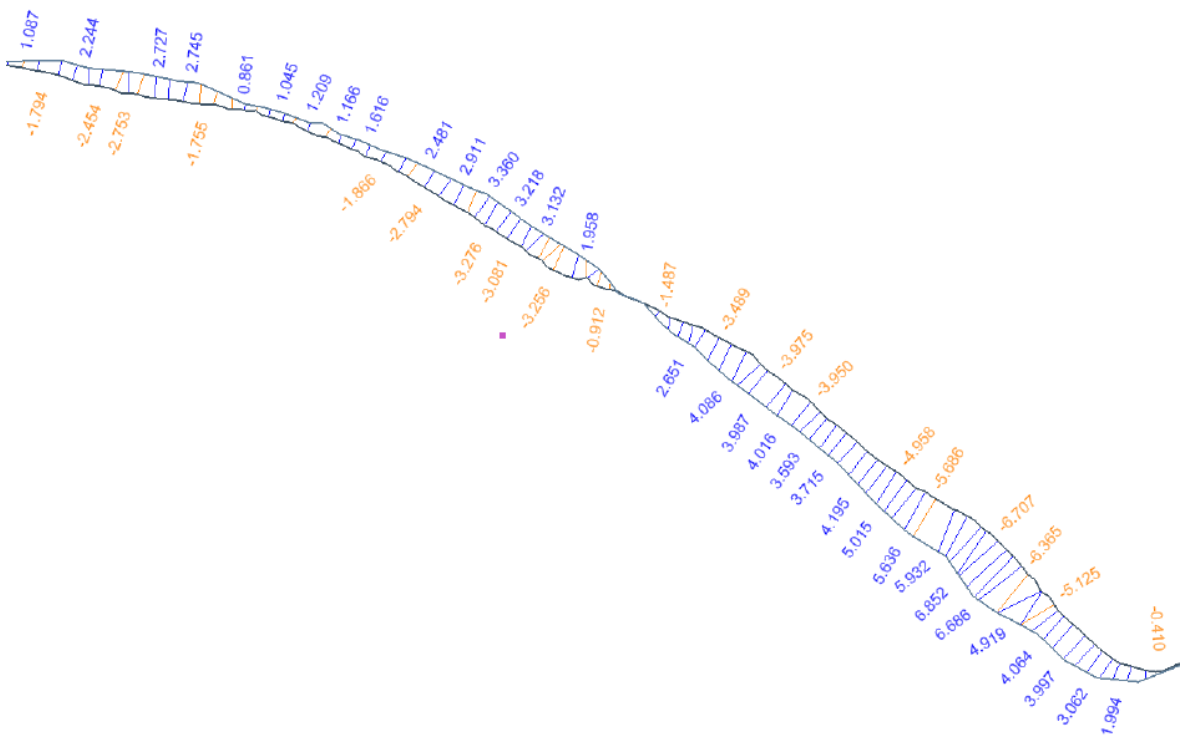


Abbildung 42: Detailprofil 1939 - 2015 aus Luftbilddaten des Hangrutsches

Die vollständigen Profile, sowie die Profile im Bereich der Gletscherfront, sind im *Anhang A11 Profile aus Flugbilddaten* ersichtlich.

10.4 Vergleich 2012 - 2015 mit TLS-Daten

Das erstellte Oberflächenmodell 2015 konnte auch mit den Daten aus dem Jahr 2012 verglichen werden. Aus der Punktwolke von 2012 wurde auf die gleiche Weise wie in Kapitel 8.3 beschrieben, ein Oberflächenmodell erstellt.

10.4.1 Oberflächenvergleiche aus TLS Daten

In Abbildung 43 sind die beiden Oberflächen in Bezug auf ihre Höhe verglichen worden. Aufgrund der Mess- und Auswertungsunsicherheiten wurden die Flächen, welche Bewegungen kleiner als 20 cm vorweisen, weiss dargestellt. Höhenzunahmen wurden rot und Höhenabnahmen blau eingefärbt. Diese Darstellungsvariante wurde für alle nachstehenden Oberflächenvergleiche gewählt.

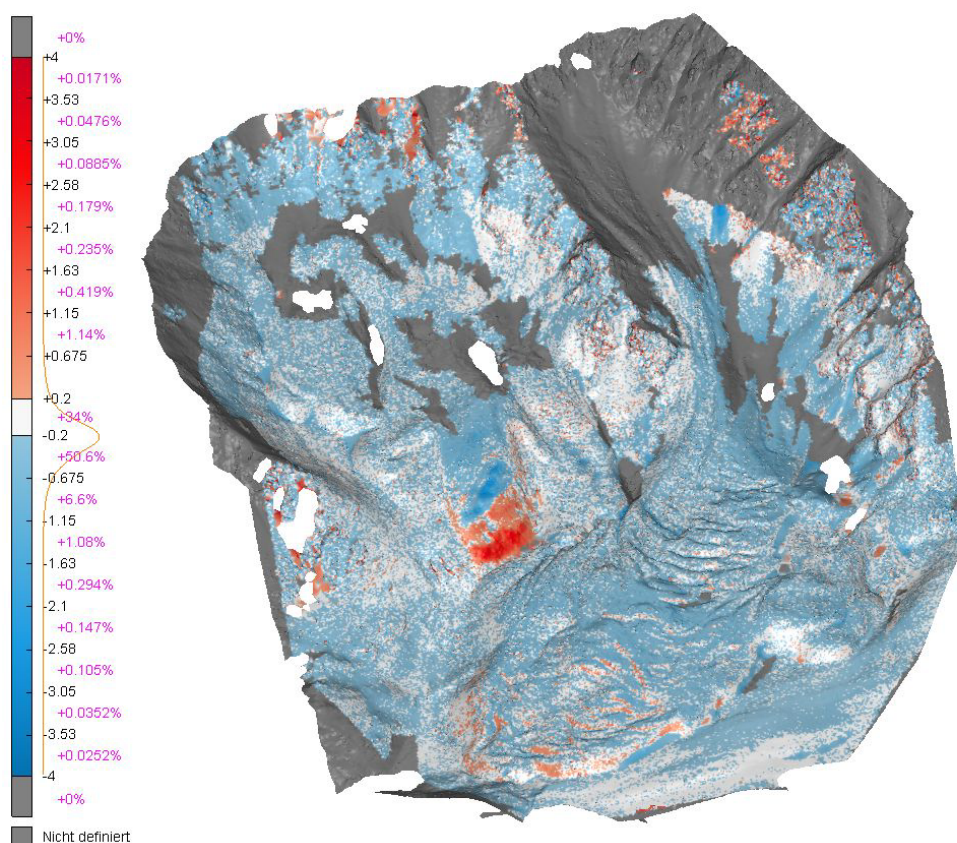


Abbildung 43: Oberflächenvergleich 2012 - 2015 aus TLS-Daten, Übersicht

Dabei ist festzustellen, dass der Blockgletscher an den meisten Orten etwas abgenommen hat. Leider ist der Datensatz 2012 im Wurzelbereich sehr lückenhaft. Die grauen Stellen zeigen Lücken auf, wo keine Daten erfasst wurden. Daher ist nur ansatzweise eine grössere Abnahme in der Wurzelzone bemerkbar (siehe Abbildung 44).

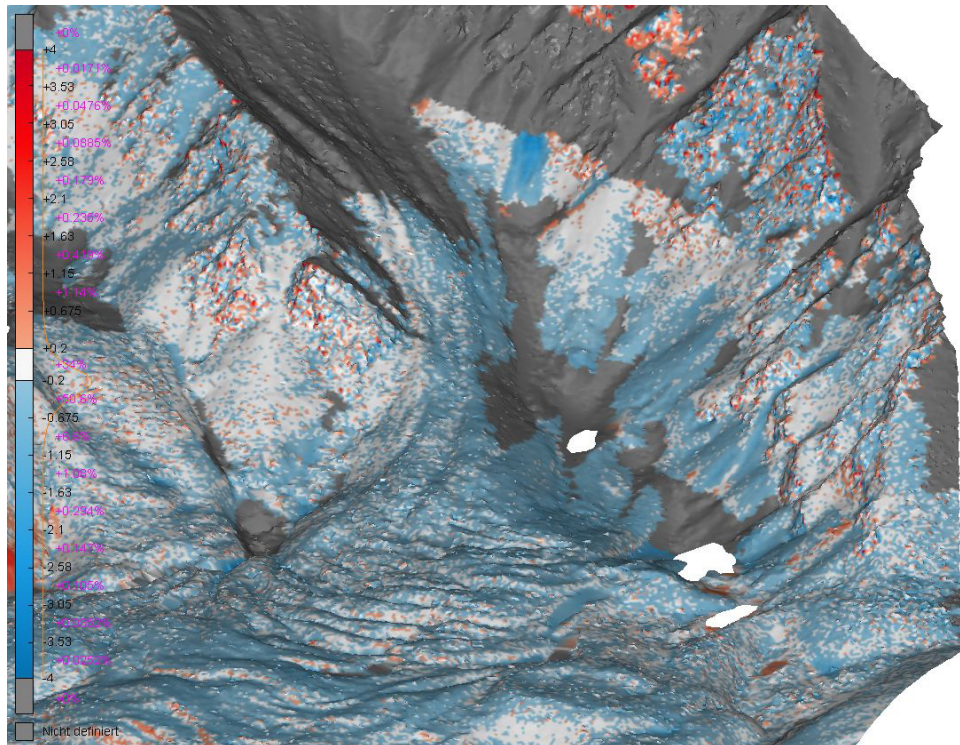


Abbildung 44: Oberflächenvergleich 2012 - 2015 aus TLS-Daten des Wurzelbereiches

Eine signifikante Bewegung ist bei der Blockgletscherzunge feststellbar. Es ist deutlich zu erkennen, wie sich die Front und die Falten in Richtung Tal bewegen (siehe Abbildung 45).

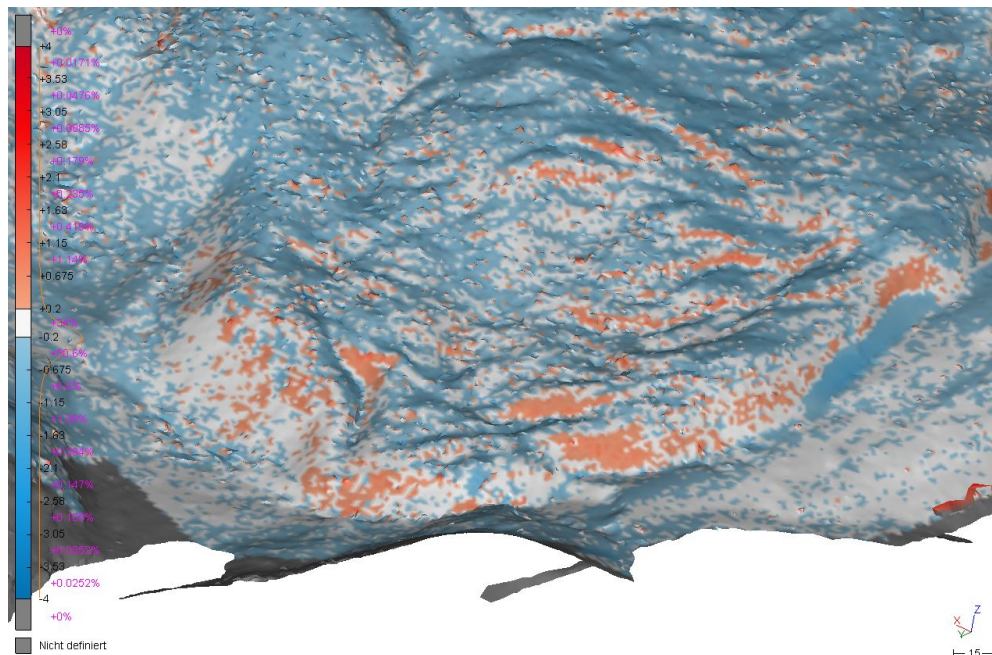


Abbildung 45: Oberflächenvergleich 2012 - 2015 aus TLS-Daten des Zungenbereichs

Wenn man nun die Front nicht in Bezug auf ihre Höhe, sondern auf ihre Fließrichtung vergleicht (siehe Abbildung 46), kann man die Vorwärtsbewegung des Blockgletschers noch etwas besser erkennen. Dabei ist zu beachten, dass auch Bewegungen entgegen der Fließrichtung festgestellt werden können. Dies kann durch ein Abrutschen von grösseren Steinen, welche eine „Lücke“ hinterlassen, entstehen. In Abbildung 46 ist darauf hinzuweisen, dass es sich nicht um Höhenänderungen handelt, sondern um Bewegungen in Fließrichtung.

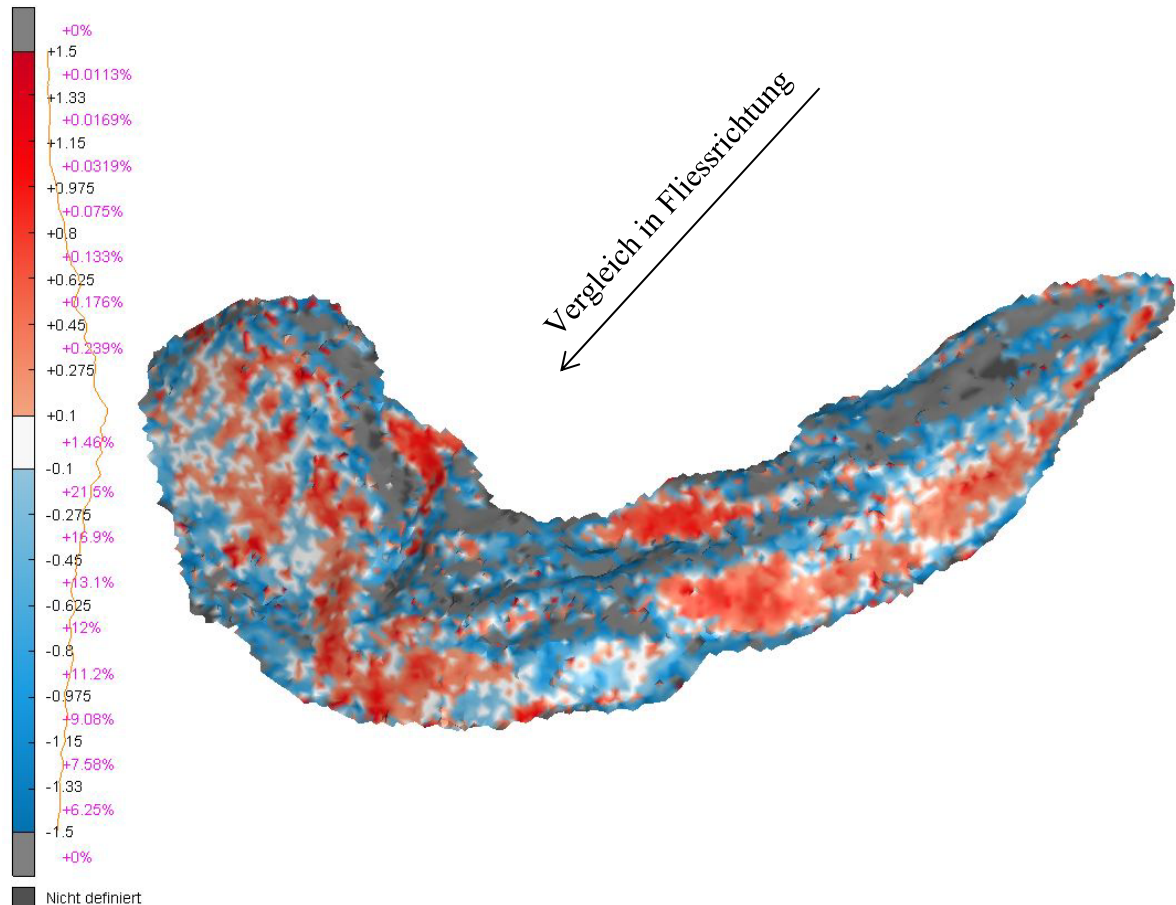


Abbildung 46: Oberflächenvergleich in Fließrichtung 2012 - 2015 aus TLS-Daten der Front

Die auffälligste Stelle befindet sich östlich des Blockgletschers, in der Nähe des Fixpunktes FP1006. Es ist eine starke Höhenänderung von teilweise über 4 m zu verzeichnen (siehe Abbildung 47). An dieser Stelle wird ein grösserer Rutsch von Gesteinsmassen vermutet. Kleine Anzeichen dafür konnten auch im Gelände beobachtet werden. So war das Gestein an dieser Stelle sehr locker und es wurden kleinere Spalten entdeckt.

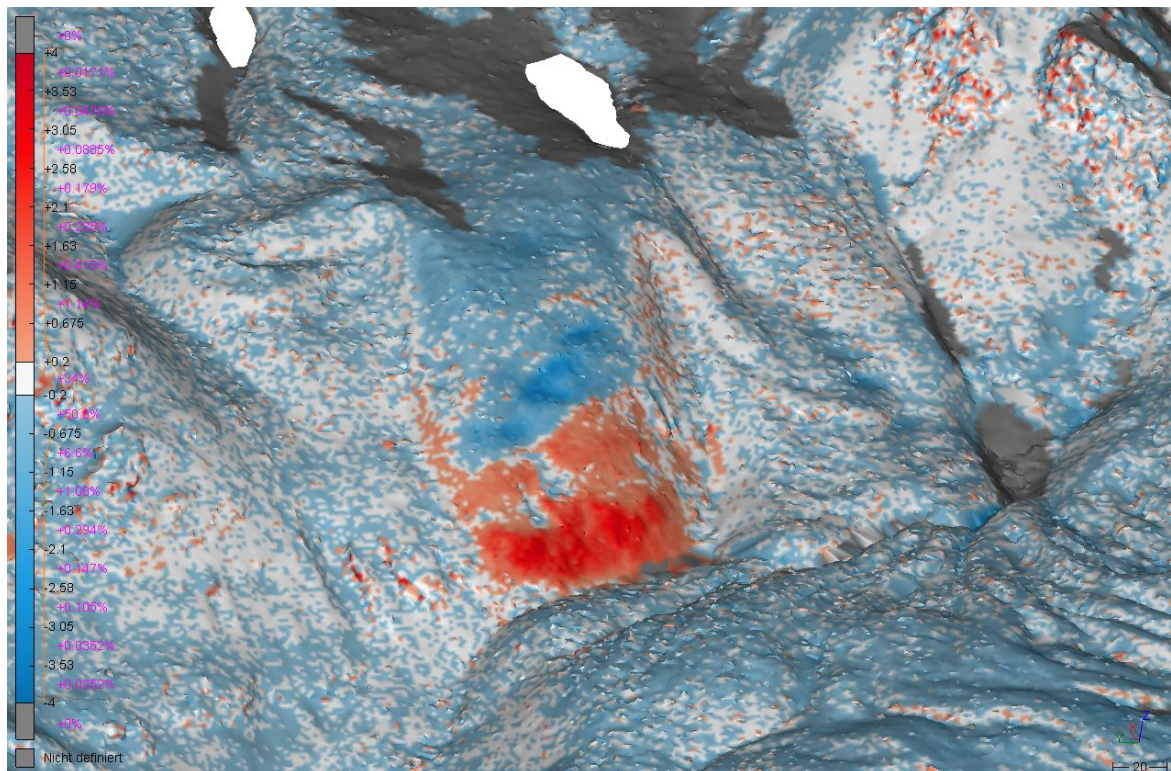


Abbildung 47: Oberflächenvergleich 2012 - 2015 aus TLS-Daten des östlichen Hänggrutsches

10.4.2 Volumenanalysen aus TLS Daten

Bei der Volumenanalyse mit TLS-Daten stellt sich das gleiche Problem wie mit den UAV-Daten. Die Oberflächenmodelle können nicht auf exakt den gleichen Perimeter beschnitten werden. Über das ganze Gebiet des Blockgletschers konnte von 2012 bis 2015 eine ungefähre Abnahme des Volumens von $200'000 \text{ m}^3$ errechnet werden. Diese Abnahme erscheint sehr gross. Auf die Fläche des Blockgletschers berechnet würde das eine durchschnittliche Abnahme von 70 cm bedeuten, was definitiv zu viel ist. Der grosse Volumenunterschied kann auf die unterschiedlichen Perimeter zurückgeführt werden.

10.4.3 Profile aus TLS-Daten

Wie bereits im Kapitel 10.3.3 aus den Luftbilddaten, wurden auch aus den TLS-Daten Profile erstellt. Es wurden dieselben Profile wie mit den Luftbilddaten (Kapitel 10.3.3) erstellt. In allen nachfolgenden Abbildungen von Profilen sind die Profillinien von 2012 blau und die von 2015 rot eingefärbt. Im Zungenbereich des Blockgletschers konnten mit den angelegten Profilen keine eindeutigen Bewegungstrends festgestellt werden (siehe Abbildung 48). Es sind lediglich Bewegungen an einzelnen Orten erkennbar.

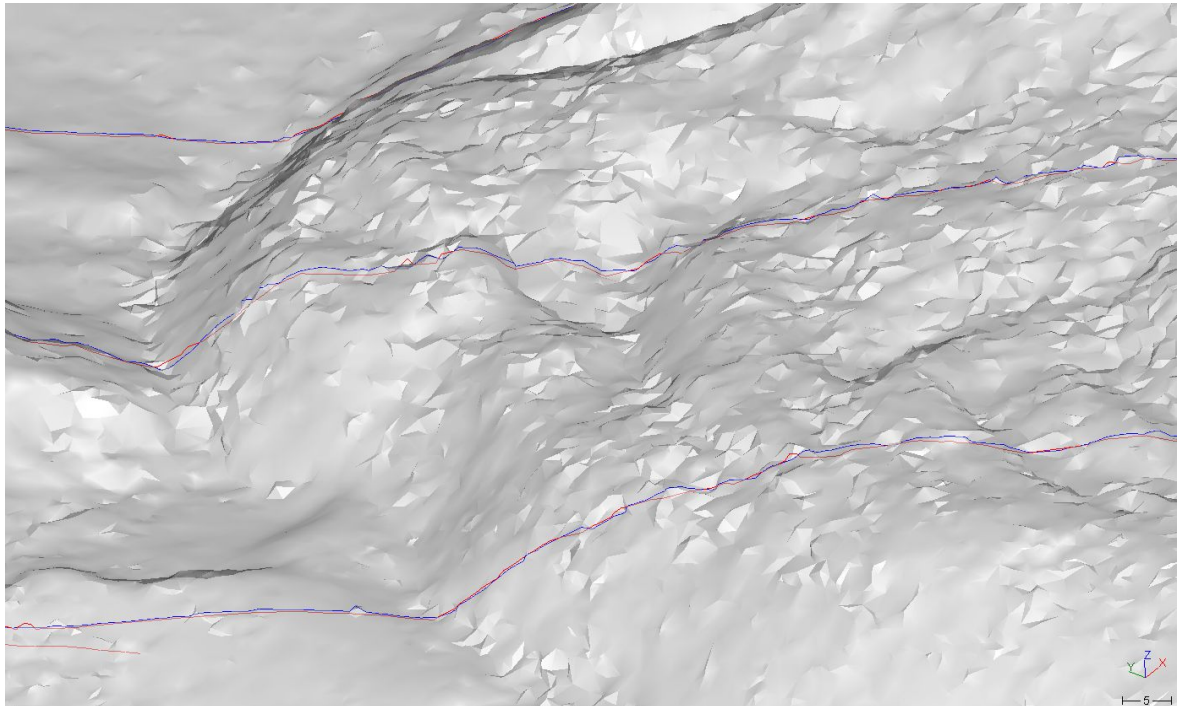


Abbildung 48: Längsprofile 2012 - 2015 aus TLS-Daten im Frontbereich

Im mittleren Teil des Blockgletschers präsentiert sich ein ähnliches Bild. An einigen Stellen ist die Oberfläche eher etwas eingebrochen und an anderen Stellen hat sich etwas mehr Gestein angesammelt.

Im Wurzelbereich des Blockgletschers lässt sich jedoch ein eindeutiger Trend feststellen (siehe Abbildung 49). Es ist gut zu erkennen, dass die roten Profile von 2015 an fast allen Stellen unter den blauen Profilen von 2012 liegen. Die Höhendifferenzen betragen bis zu 80 cm.

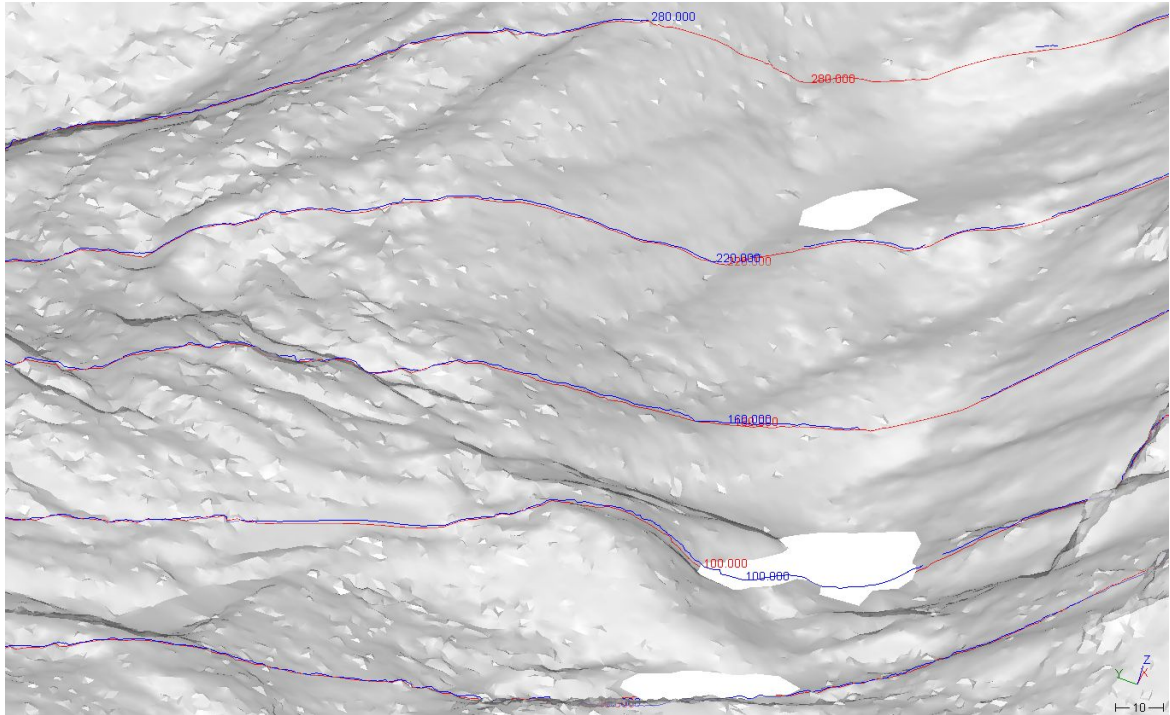


Abbildung 49: Längsprofile 2012 - 2015 aus TLS-Daten im Wurzelbereich

Neben den oben erläuterten Längsprofilen wurden Detailprofile im Bereich der Gletscherfront und über den Hangrutsch im Osten des Blockgletschers erstellt. Bei den Detailprofilen ist teilweise ein Bewegungstrend des Blockgletschers ersichtlich (siehe Abbildung 50). Im Vergleich der Profile ist das Profil von 2015 schwarz und das von 2012 grau dargestellt. Im mittleren Bereich der Abbildung 50 ist eine signifikante Vorwärtsbewegung der Front von bis zu 50 cm erkennbar.

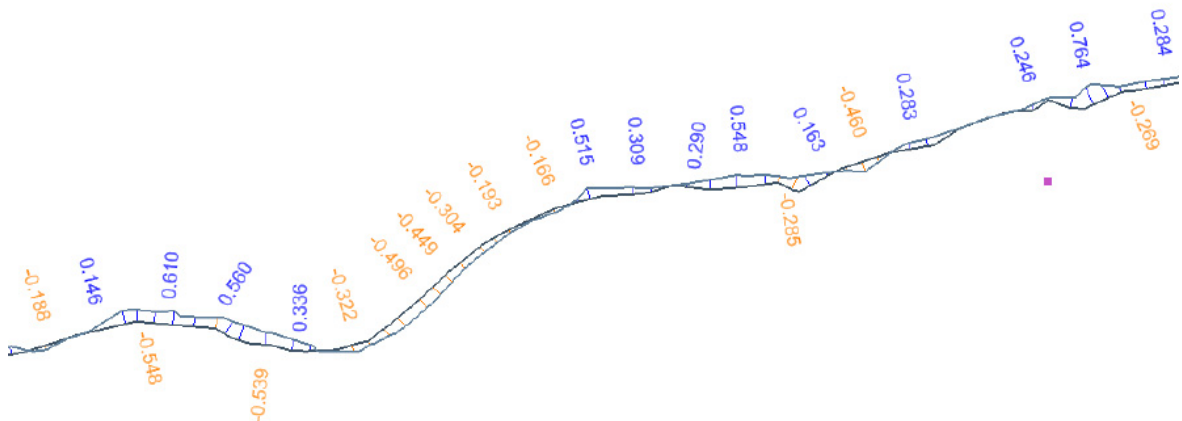


Abbildung 50: Detailprofil 2012 - 2015 aus TLS-Daten an der Blockgletscherfront

Alle erstellten Profile aus den TLS-Daten, sowie die Profilvergleiche sind im *Anhang A12 Profile aus TLS Daten* ersichtlich.

10.5 Verschiebungsplan der Fix- und Kontrollpunkte

Aus den GNSS-Messungen 2012 und 2015 konnte eine punktuelle Verschiebung der Kontrollpunkte auf dem Blockgletscher detektiert werden. Wie bereits in Tabelle 13 zu sehen ist, haben sich die Kontrollpunkte in den letzten drei Jahren bis zu 2 m bewegt. Daraus lässt sich schliessen, dass die Bewegungen auf dem Blockgletscher grösser sind als an der Front. Die Verschiebungen sind in Abbildung 51 ersichtlich. Dabei ist die Senkung in der Höhe rot dargestellt und die Verschiebung in der Lage violett.

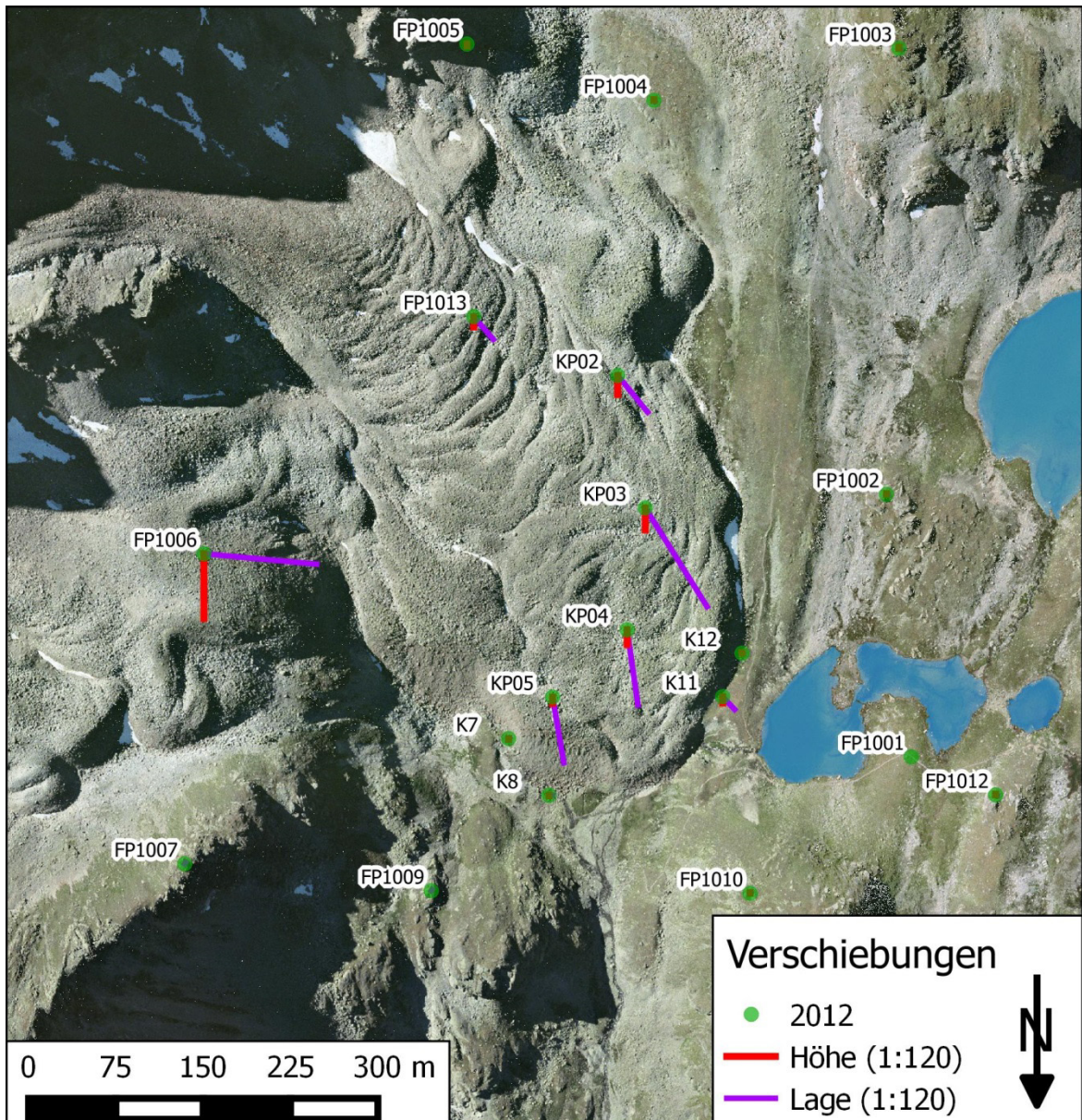


Abbildung 51: GNSS Verschiebungsplan 2012 - 2015

10.6 Visualisierungen der UAV-Daten 2015

Mit der Auswertung der UAV-Daten mit dem Programm PostFlightTerra 3D (siehe Kapitel 9) konnten bereits einige Zusatzprodukte mitgeneriert werden. Zudem wurde die ein oder andere Visualisierung für den SNP erstellt. Die Produkte dienen nur zur Visualisierung des Blockgletschers. Es wurden folgende Produkte erstellt.

Texturiertes Oberflächenmodell

Aus der Punktwolke wurde ein Oberflächenmodell erstellt, welches mit den Bilddaten aus der Befliegung texturiert wurde (siehe Abbildung 52). Das Modell befindet sich im Format *.obj* und kann zum Beispiel mit dem Open Source Programm CloudCompare geöffnet werden. Das Modell zeigt eindrücklich auf, was ausschliesslich aus Befliegungsdaten visualisiert werden kann.

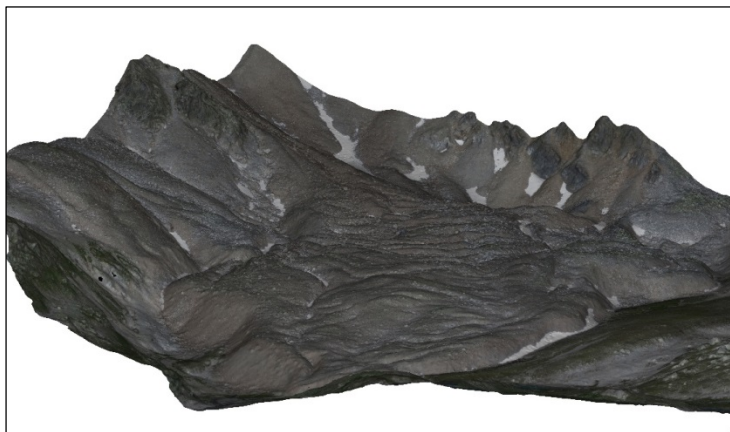


Abbildung 52: Texturiertes Oberflächenmodell

3D PDF des texturierten Oberflächenmodells

Das texturierte Oberflächenmodell wurde auch als 3D-PDF erstellt, welches mit jedem PDF Reader geöffnet werden kann. Eine Vorschau ist in Abbildung 53 ersichtlich.



Abbildung 53: 3D PDF des texturierten Oberflächenmodells

Orthophoto

Das Orthophoto (siehe Abbildung 54) wurde automatisch bei der Auswertung mit Post-Flight Terra 3D miterstellt und wurde im Format GeoTiff abgespeichert.

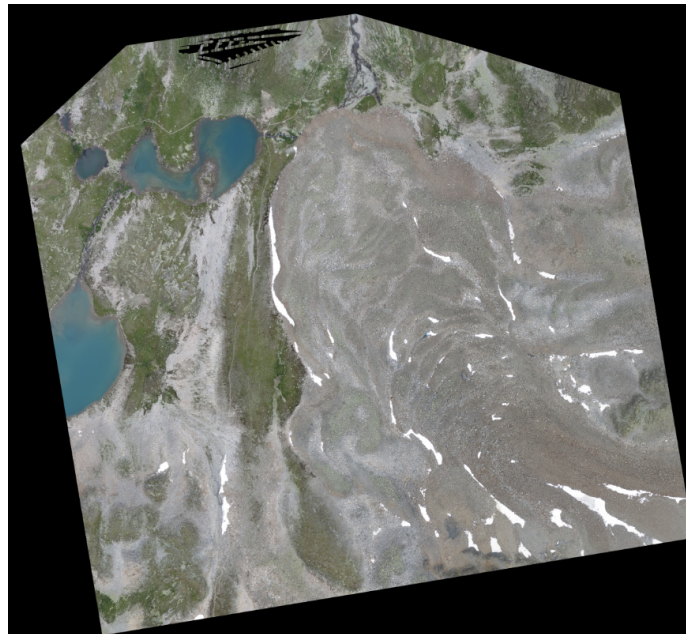


Abbildung 54: Orthophoto Macun

Google Maps & Google Earth

Das generierte Orthophoto kann per Link direkt in Google Maps und das texturierte Oberflächenmodell direkt in Google Earth geöffnet werden. Eine Vorschau ist in Abbildung 55 dargestellt.

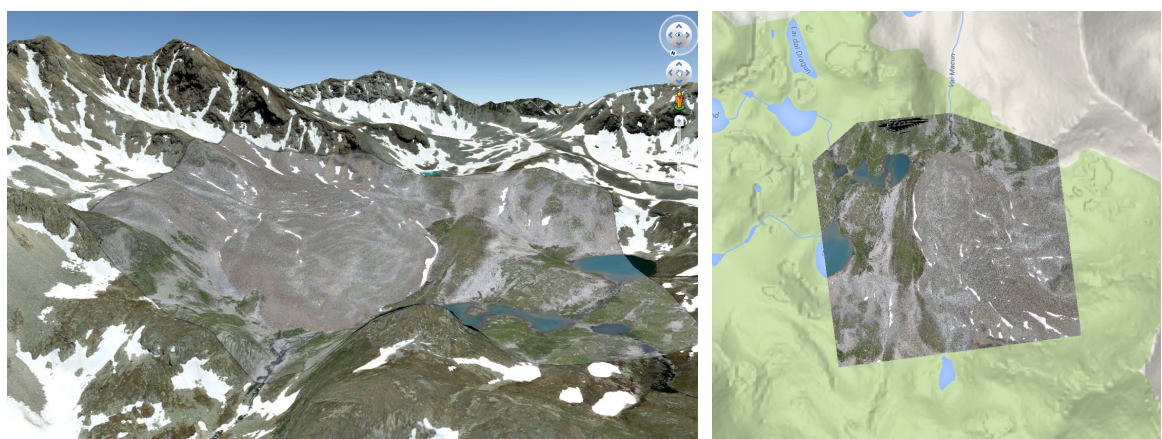


Abbildung 55: links: Oberflächenmodell in Google Earth integriert, rechts: Orthophoto in Google Maps integriert

Höhenlinien

Es wurden Höhenlinien berechnet, welche einerseits als Shape-Datei und andererseits als Karte (siehe Abbildung 56), welche als Hintergrund das Orthophoto 2015 benutzt, zur Verfügung stehen.

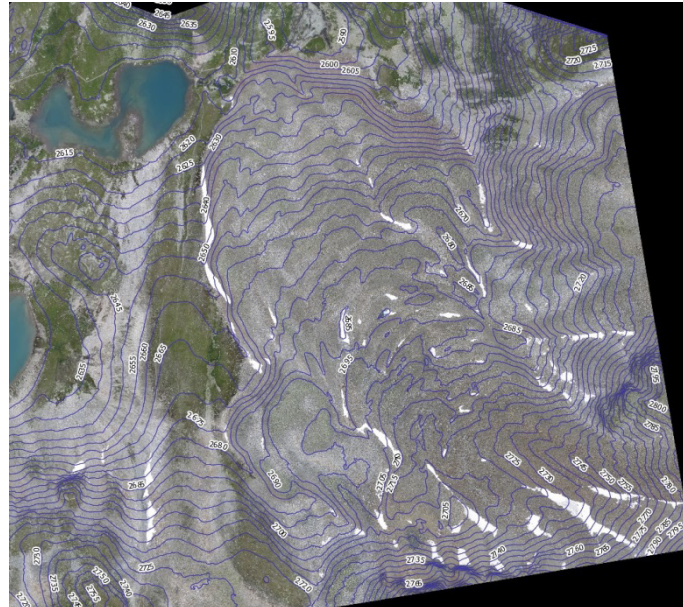


Abbildung 56: Höhenlinienkarte 2015

Gedrucktes 3D Modell

Mit einem 3D Drucker konnte ein stark geglättetes Modell des Blockgletschers gedruckt werden. Es ist etwa 10 auf 10 cm gross und hat eine Höhe von 3 cm. Das Modell wird dem SNP abgegeben. Eine Vorschau ist in Abbildung 57 ersichtlich.



Abbildung 57: Vorschau des gedruckten 3D Modells

Anaglyphenbilder

Die Anaglyphenbilder wurden aus dem texturierten Oberflächenmodell mit dem Programm Agisoft PhotoScan (Version 1.1.6) erstellt. Um bei der Betrachtung den 3D-Effekt wahrzunehmen, braucht es eine Rot-Cyan Brille, welche im *Anhang A13 Rot-Cyan Brille* beigelegt ist. In Abbildung 58 und Abbildung 59 sind zwei Beispiele solcher Anaglyphenbilder dargestellt. In der digitalen Datenabgabe sind noch weitere Anaglyphenbilder beigelegt.

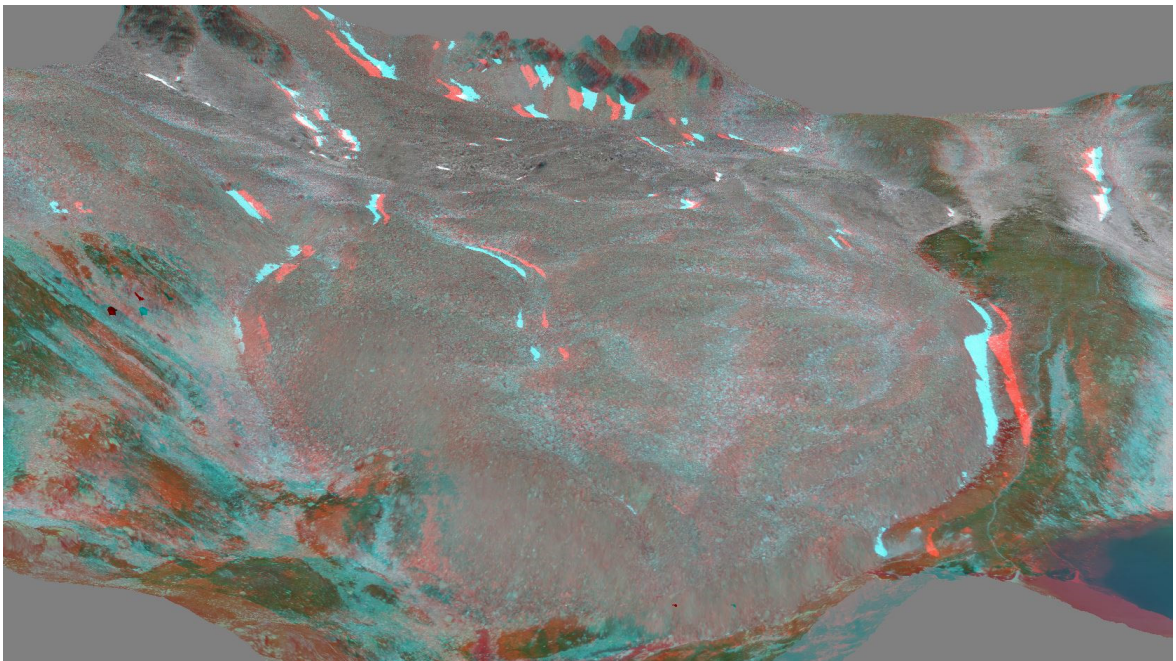


Abbildung 58: Anaglyphenbild Frontansicht

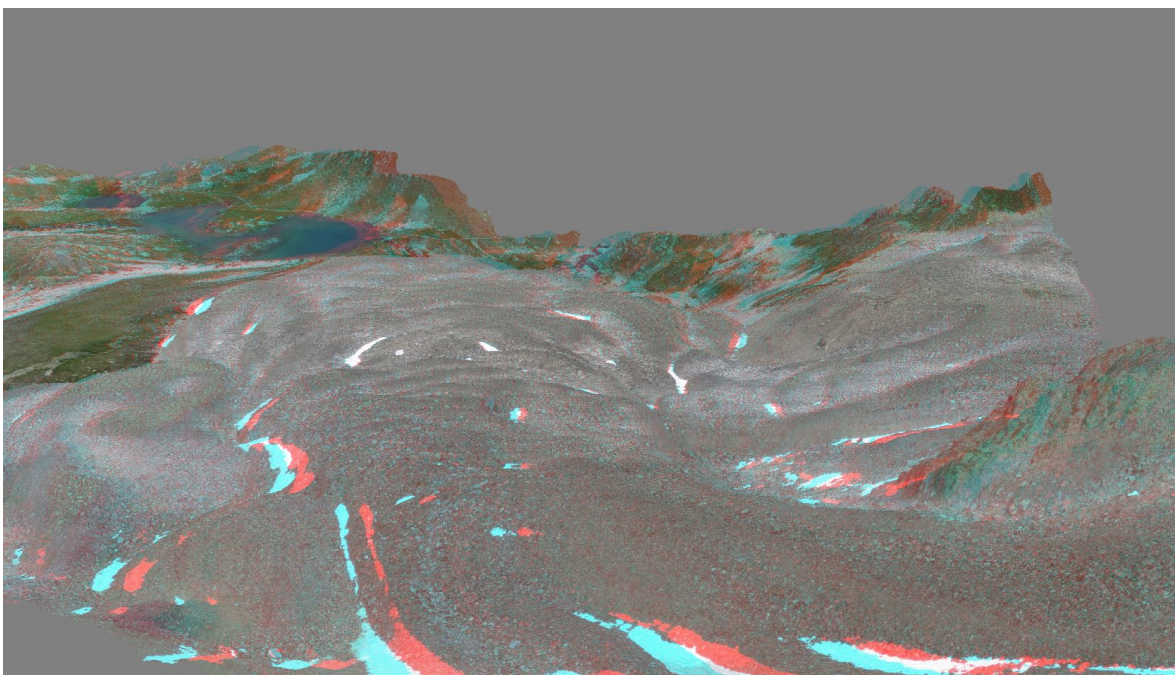


Abbildung 59: Anaglyphenbild Ansicht hinten

10.7 Fazit

Mit den Oberflächenvergleichen konnten ansprechende und aussagekräftige Resultate erzielt werden, vor allem im Vergleich von 1939 zu 2015. Es sind signifikante Bewegungen und Trends erkennbar und es ist möglich sich einen Überblick über die einzelnen Bewegungen des Blockgletschers zu verschaffen.

Die Volumenvergleiche haben zu keinem brauchbaren Resultat geführt. Die fehlende Möglichkeit zwei Oberflächenmodelle auf den exakt gleichen Perimeter zuzuschneiden, erschwerte die Analysen. Aus diesen Gründen sind keine Aussagen zu Volumenveränderungen möglich.

Durch die angelegten Profile sind einzelne Bewegungen und teilweise Trends ersichtlich. Vor allem im Wurzelbereich des Blockgletschers sind signifikante Senkungen erkennbar. Aus den GNSS-Verschiebungen ist ersichtlich, dass sich die Kontrollpunkte auf dem Blockgletscher deutlich schneller bewegen als an der Front.

Aus den Bilddaten konnte die Geschwindigkeit des Blockgletschers eruiert werden. Im Durchschnitt bewegt sich der Blockgletscher um 8 cm pro Jahr vorwärts.

11 Vergleich TLS versus UAV

In diesem Kapitel werden die gewonnenen Daten aus den TLS-Messungen mit den Daten der UAV-Befliegung verglichen. Es werden die erzeugten Oberflächenmodelle einander gegenüber gestellt, sowie eine Kostenschätzung für beide Messmethoden erstellt.

11.1 Oberflächenvergleich TLS - UAV 2015

Die Oberflächen aus den TLS- und UAV-Daten 2015 sind sehr ähnlich (siehe Abbildung 60). Ausser im Zungenbereich und im nördlichen Bereich davor, wo die Flächen rot eingefärbt sind, ist das UAV-Modell etwas höher als das TLS-Modell. Dies ist auf die verschiedenen Aufnahmepositionen und die starke Strukturierung der Blockgletscheroberfläche zurückzuführen. Die UAV-Daten sind an dieser Stelle mehrheitlich von oben und vom Süden her aufgenommen worden, wohingegen die TLS-Messungen eher von Norden her, respektive von den Punkten FP1009 und FP1010 aus durchgeführt wurden. Um diese Unterschiede zu beheben, wären mehr Fluglinien im Norden nötig gewesen. Die Höhengenaugkeit der TLS-Methode beträgt 10 cm (siehe Kapitel 8.4.2) und die Höhengenaugkeit der UAV-Methode beträgt 13 cm (siehe Kapitel 9.3). Daraus lässt sich die 95% Signifikanzgrenze berechnen.

$$\text{Signifikanzgrenze Höhenvergleich (95\%): } \sqrt{(0.10_{\text{TLS}})^2 + (0.13_{\text{UAV}})^2} * 1.96 = 32 \text{ cm}$$

Insgesamt befinden sich 90% aller Abweichungen innerhalb von 32 cm. Wie bereits beschrieben, sind die meisten Abweichungen im nördlichen Teil des Blockgletschers auf die etwas schlechtere Aufnahmeconfiguration der UAV-Daten zurückzuführen. Wenn man jedoch eine erweiterte Befliegung, wie sie geplant gewesen wäre (siehe Kapitel 6.2.5) in Betracht zieht, wären die beiden Modelle in etwa gleichwertig gewesen.

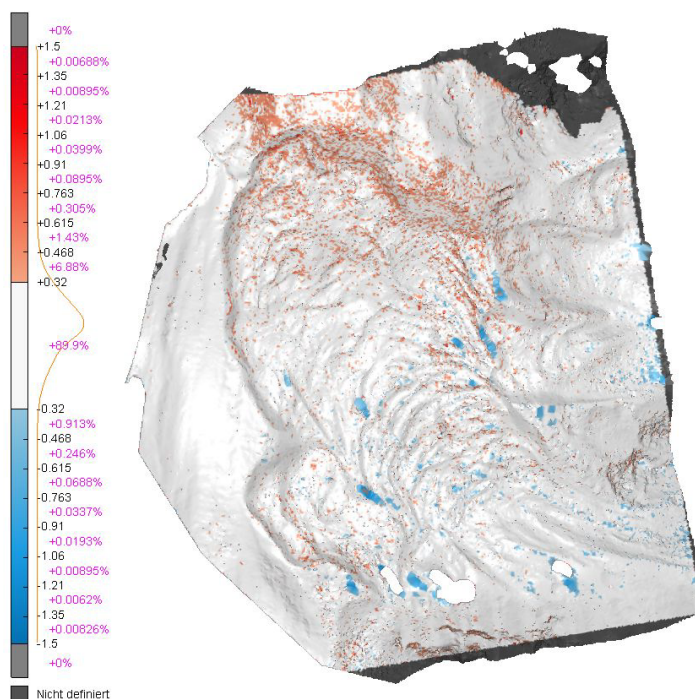


Abbildung 60: Höhendifferenzen zwischen den Oberflächenmodellen UAV und TLS, Nordorientiert

11.2 Zeit- und Kostenschätzung

Die Entscheidung mit welchem Messverfahren ein Blockgletscher aufgenommen wird, würde in der Wirtschaft stark von den Kosten beeinflusst werden. Anhand der Erfahrungen, die während dieser Bachelor-Thesis gemacht wurden, wird versucht die Zeit und Kosten für eine Messkampagne, zum einen nur mit TLS und zum anderen nur mit UAV zu schätzen. Dabei werden die Projektorganisation (Vorbereitungen), Rekognoszierung, Messkampagne und Datenauswertung bis zur Punktwolke betrachtet. Allfällige Analysen und Visualisierungen, die mit den Punktwolken erstellt werden können, werden in dieser Kostenschätzung nicht betrachtet. Ausserdem werden auch die Nebenkosten nicht berücksichtigt, da es sich wahrscheinlich zweimal um den gleichen Betrag handeln würde. Die Ansätze in den untenstehenden Tabellen richten sich nach den Ansätzen der *Koordination der Bau- und Liegenschaftsorgane des Bundes (KBOB)* 2015. Dabei kann für einen Vermessungsingenieur FH (Ing) ein Stundenansatz von 133.00 Franken verrechnet werden und für einen Geomatiker (Geo) ein Stundenansatz von 111.00 Franken. Zusätzlich wird auf die Gesamte Anzahl Personenstunden ein Zuschlag von 15% für die Büroleitung berechnet, welche mit 168.50 Franken verrechnet wird (KBOB, 2015).

Eine Messkampagne mit TLS würde 27'064.15 Franken kosten (siehe Tabelle 17). Dabei wird angenommen, dass die Scans mit einem Riegl VZ-4000 Scanner oder einem vergleichbaren Scanner durchgeführt werden. Würden die Messungen mit einem Scanner mit langsamerer Geschwindigkeit durchgeführt, würden Zeit und Kosten der Messkampagne mit TLS steigen.

Arbeitsbeschreibung	Personen	Stunden	Ansatz	Franken
Projektorganisation, Vorbereitung, Messplanung, Organisation und Logistik	1x Ing	42.00	133.00	5'586.00
Rekognoszierung	1x Ing	12.00	133.00	1'596.00
	1x Geo	12.00	111.00	1'332.00
Messkampagne: GNSS	1x Ing	16.00	133.00	2'128.00
	1x Geo	16.00	111.00	1'776.00
Messkampagne: TLS	1x Ing	20.00	133.00	2'660.00
	1x Geo	20.00	111.00	2'220.00
Auswertung: GNSS	1x Ing	9.00	133.00	1'197.00
Auswertung: TLS	1x Ing	18.00	133.00	2'394.00
Zuschlag Büroleitung / Administration (15%)		24.75	168.50	4'170.40
Netto				25'059.40
Mehrwertsteuer 8%				2'004.75
Brutto				27'064.15

Tabelle 17: Zeit- und Kostenschätzung TLS

Die Zeit gliedert sich in eine Woche Vorbereitung, einen langen Tag Rekognoszierung, zwei Tage GNSS-Messungen und zwei lange Tage TLS-Messungen. Somit würde eine Messkampagne von vier Tagen reichen, vorausgesetzt das Wetter lässt die TLS-Messungen zu. Für die GNSS-Auswertung wird ein Tag berechnet und für die TLS-Auswertung zwei Tage.

Die Messkampagne nur mit UAV würde 20'241.20 Franken kosten (siehe Tabelle 18). Dabei wird angenommen, dass die Befliegung wieder mit einer eBee Drohne durchgeführt wird. Die Zeit gliedert sich in eine Woche Vorbereitung, einen langen Tag Rekognoszierung, zwei Tage GNSS-Messungen und einen halben Tag für die UAV-Befliegung. Somit würde eine Messkampagne von drei Tagen reichen, vorausgesetzt das Wetter (Wind, Regen, Nebel) lässt die UAV-Befliegung zu. Für die GNSS-Auswertung wird ein Tag berechnet und für die UAV-Auswertung werden sechs Stunden berechnet. Es ist festzuhalten, dass die UAV-Auswertung mit der Software PostFlight Terra 3D stark automatisiert möglich ist und daher die Auswertezeit um einiges geringer ausfällt, als bei der TLS-Auswertung.

Arbeitsbeschreibung	Personen	Stunden	Ansatz	Franken
Projektorganisation, Vorbereitung, Messplanung, Organisation und Logistik	1x Ing	42.00	133.00	5'586.00
Rekognoszierung	1x Ing	12.00	133.00	1'596.00
	1x Geo	12.00	111.00	1'332.00
Messkampagne: GNSS	1x Ing	16.00	133.00	2'128.00
	1x Geo	16.00	111.00	1'776.00
Messkampagne: UAV	1x Ing	5.00	133.00	665.00
	1x Geo	5.00	111.00	555.00
Auswertung: GNSS	1x Ing	9.00	133.00	1'197.00
Auswertung: UAV	1x Ing	6.00	133.00	798.00
Zuschlag Büroleitung / Administration (15%)		18.45	168.50	3'108.85
Netto				18'741.85
Mehrwertsteuer 8%				1'499.35
Brutto				20'241.20

Tabelle 18: Zeit- und Kostenschätzung UAV

Aus Kostensicht würde eine weitere Folgemessung mit der UAV-Methode Sinn machen.

11.3 Fazit

Die erzielten Resultate der TLS- und UAV-Aufnahmen sind fast gleichwertig, wobei die TLS-Daten etwas besser sind. Wäre die UAV-Befliegung im Norden erweitert gewesen, könnten die beiden Modelle wahrscheinlich als gleichwertig betrachtet werden. Der Aufwand für die Aufnahmen war bei den TLS-Messungen fast viermal höher als bei der UAV-Befliegung.

Die Kostenschätzung zeigt auf, dass die Erfassung mit der UAV-Methode vor allem günstiger ausfällt, weil die Mess- und Auswertezeiten kürzer sind.

Abschliessend kann festgestellt werden, dass mit einer UAV-Befliegung ein gleich gutes aber günstigeres Resultat, als mit TLS-Messungen, erzielt werden kann.

12 Diskussion

In diesem Kapitel werden die gewonnenen Erkenntnisse und Resultate nochmals aufgenommen und diskutiert.

Die Untersuchung der Scanfunktion der Totalstation MS50 brachte ein eindeutiges Resultat hervor. Für die Messkampagne in Macun mit Zielweiten bis zu 700 m ist dieses Gerät unbrauchbar. Es war nicht möglich über eine Distanz von 400 m zu scannen. Auch die Messgeschwindigkeit lässt kein effizientes Scannen des Blockgletschers zu.

Die GNSS-Messungen konnten mit einer durchschnittlichen Genauigkeit in der Lage in Ost- oder Nordrichtung von 5.7 mm durchgeführt werden. Die durchschnittliche Höhen-genauigkeit beträgt 13.3 mm. Mit diesen Resultaten konnte ein gutes Grundlagenetz für die TLS-Messungen bereitgestellt werden. Um weitere Zeit während der Messkampagne zu sparen, müsste überprüft werden, ob zwei GNSS-Sessionen ausreichend wären.

Die TLS-Messungen konnten erfolgreich durchgeführt werden. Die erzielten Genauigkeiten sind etwas enttäuschend. Es konnte eine Höhen-genauigkeit des Laserscanners von 8 cm (siehe Kapitel 8.4.3) und eine Höhen-genauigkeit des Oberflächenmodells von 10 cm (siehe Kapitel 8.4.2) geschätzt werden. Diese Genauigkeiten liegen im Bereich der ersten Folgemessung, in welcher eine Höhen-genauigkeit von 9 cm erreicht wurde (Arpagaus / Joss, 2012: 62). Aufgrund dieser Genauigkeiten kann eine Höhenverschiebung erst ab 25 cm als signifikant (2σ , 95%) angesehen werden. Die Genauigkeiten der Punktwolken (siehe Kapitel 8.4.1) sind um einiges besser als beim Oberflächenmodell. Es wäre wichtig eine geeignetere Software für die Oberflächenberechnungen zu eruieren, welche nicht so stark glättet. Ansonsten kann die Genauigkeit der Punktwolke nicht ausgenützt werden.

Es stellte sich als schwierig heraus, den TLS-Daten eine zahlenmässige Aussage zu der Vorwärtsbewegung des Blockgletschers zu entnehmen. Diese konnte besser aus den Luftbildern extrahiert werden. Dabei wurde aus verschiedenen Zeitständen die Blockgletschergrenze digitalisiert. Anhand mehrerer Differenzen, welche zwischen den verschiedenen Jahren ermittelt wurde, konnte eine durchschnittliche Fliessgeschwindigkeit an der Front von 8 cm pro Jahr festgestellt werden. Diese Erkenntnis bestätigt die Annahmen des SNP (siehe *Anhang A1 Aufgabenstellung*), welcher mit 7 bis 25 cm pro Jahr rechnet. Aus den GNSS-Verschiebungen ist ersichtlich, dass sich der Blockgletscher auf der Zunge schneller fortbewegt als an der Front. Es konnten punktuelle Verschiebungen der Kontrollpunkte von bis zu 2 m in der Lage und 38 cm in der Höhe festgestellt werden.

Weiter konnte der Blockgletscher das erste Mal aus der Luft aufgenommen werden. Aus der Befliegung liessen sich ansprechende Resultate, wie das Orthophoto und das texturierte Oberflächenmodell generieren. Die UAV-Methode ist bei Blockgletschervermessungen

sicherlich eine ernst zu nehmende Konkurrenz für die TLS-Methode. Die Genauigkeit des Oberflächenmodells liegt im gleichen Bereich, wie bei den TLS-Messungen. Das Problem des Oberflächenmodells aus der Drohnenbefliegung war, dass das automatisch aus Postflight Terra 3D erstellte Modell nicht georeferenziert war. Somit musste mit dem 3DReshaper aus der georeferenzierten Punktwolke ein neues Oberflächenmodell berechnet werden. Das 3D-Modell aus Postflight Terra 3D sieht um einiges detaillierter aus, als das aus dem 3DReshaper.

Mit Hilfe eines Geländemodells aus dem Jahr 1939 konnte erstmals eine langjährige Deformationsanalyse berechnet werden. Die Resultate waren eindrucklich. Der Blockgletscher brach in der Wurzelzone bis zu 16 m ein. Dies bestätigt die Annahmen von Herrn Haller des SNP, dass das Eis unterhalb der Wurzelzone stark geschmolzen ist. Auch an der Front wurde an manchen Stellen eine Aufschüttung von bis zu 12 m festgestellt.

Der Vergleich zwischen TLS und UAV zeigt leichte Vorteile für die UAV-Methode. Zum einen ist sie günstiger als die TLS-Methode und zum anderen lässt sich aus der Luft der ganze Blockgletscher aufnehmen, ohne dass aufgrund Sichthindernissen Löcher in der Punktwolke entstehen. Aus diesen Gründen wird von einer Anschaffung eines Longrange-Scanners abgeraten.

Die in dieser Bachelor-Thesis erzeugten Resultate und Visualisierungen sind umfangreich und vielseitig. Sie dienen den Fachleuten des SNP als Grundlage für weitere Interpretationen und Schlussfolgerungen. Es konnte jedoch aufgrund der begrenzten Zeit nicht jede Thematik bis ins letzte Detail vertieft werden.

13 Empfehlungen

Ein Teil dieser Arbeit besteht aus Empfehlungen für die nächste Folgemessung, sowie allgemein für die Überwachung von Blockgletschern. Nachstehend sind die erarbeiteten Ratschläge aufgeführt.

13.1 Empfehlungen für die dritte Folgemessung

Aufgrund der Erkenntnisse dieser Bachelor-Thesis macht eine dritte Folgemessung frühestens in drei Jahren Sinn. Für Untersuchungszwecke im Rahmen einer Bachelor-Thesis könnte die nächste Folgemessung wieder mit TLS und UAV durchgeführt werden. Auch könnte sich die dritte Folgemessung auf nur eine dieser Methoden beschränken. Untenstehend sind Empfehlungen für die dritte Folgemessung aufgelistet.

Vorbereitung

Es ist wichtig, früh genug eine geeignete Software für die spätere Auswertung und Visualisierung zu evaluieren. Die Software sollte vorgängig geprüft werden, um allfällige Lizenzprobleme vorab zu beheben. Wichtig ist auch zu überprüfen, ob die vorhandenen Datenformate mit der ausgewählten Software geöffnet werden können oder, ob vorgängig die Daten in ein anderes Format transformiert werden müssen.

Rekognoszierung

Mit der Rekognoszierung kann der geplante Messablauf vor Ort überprüft werden. Ausserdem werden alle Punkte aufgesucht. Mithilfe der Fixpunktkrokis von Arpagaus und Joss (Erste Folgemessung, Bachelor-Thesis 2012) können die Fixpunkte ohne Probleme aufgefunden werden. Mehr Probleme bereiten die Kontrollpunkte auf dem Blockgletscher. Sie zu finden, stellte sich als schwieriger heraus. Im Jahr 2015 wurden alle Kontrollpunkte mit gelber Farbe markiert, welche länger als eine Spraymarkierung halten sollte. Dies sollte das Auffinden erleichtern. Zudem würde es Sinn machen, die Messpunkte der Universität Karlsruhe im Rekognoszierungsplan darzustellen. Es befinden sich sehr viele dieser Punkte auf dem Blockgletscher. Sie sind mit roter Farbe gekennzeichnet (siehe Abbildung 61) und würden die Orientierung auf dem Blockgletscher stark erleichtern. Es sollte genügend Zeit für die Rekognoszierung eingeplant werden. Eine Überschreitung von Zernez nach Lavin ist ein schönes Erlebnis, aber nicht unbedingt notwendig. Falls die Überschreitung nicht gemacht werden will, besteht die Möglichkeit mit dem Auto auf die Alp Zeznina zu fahren (Fahrbewilligung nötig).



Abbildung 61: Ein Punkt der Universität Karlsruhe auf dem Blockgletscher

Messplanung

Die Messplanung muss dem Wetter angepasst werden. Falls die ganze Woche gutes Wetter vorhergesagt ist, macht es Sinn die Befliegung nach der ersten GNSS-Session durchzuführen. Denn dann können während der ersten GNSS-Session alle UAV-Passpunkte signalisiert werden. Falls das Wetter in der Messwoche nicht gut ausfällt, sollten vorgängig die Prioritäten der verschiedenen Aktivitäten festgelegt werden, so dass zumindest das Minimalnetz gemessen werden kann.

Messwoche Allgemein

Von den Diplomanden wird eine gewisse Bergerfahrung, Trittsicherheit und Grundkondition für die Messwoche gefordert. Speziell fordert der Punkt FP1005 auch Schwindelfreiheit.

GNSS-Messungen

Im Gebiet Macun ist kein GSM-Empfang vorhanden. Die Punkte müssen mit der Methode Rapid-Static gemessen werden. Drei GNSS-Sessionen haben sich auch bei der zweiten Folgemessung bewährt. Die Messung mit einem Strebenstativ reicht für die geforderte Genauigkeit aus.

TLS-Messungen

Wenn vorgängig ein Scanner ausgeliehen wird, sollte darauf geachtet werden, dass der Akku der Batterie genügend lange hält, beziehungsweise ein Ersatzakku vorhanden ist. Ausserdem macht es Sinn die Scanauflösung geschickt zu wählen, damit sich die Datenmenge in Grenzen hält. Zu grosse Datenmengen können Probleme bei der Auswertung verursachen und die Punktwolke muss dann zuerst ausgedünnt werden.

UAV-Befliegung

Falls die dritte Folgemessung wieder mit einer Drohne (zum Beispiel eBee) stattfindet, sollten genügend Akkus vorhanden sein, denn sobald es etwas windet, verbraucht sich der Akku schneller. Zudem ist die Ladedauer der eBee-Akkus sehr lange. Am besten eignet sich eine Befliegung am Vormittag um zirka Elf Uhr, denn dann ist normalerweise der Wind noch nicht so stark und der Sonnenstand optimal (wenig Schatten). Wichtig ist für die Flugplanung, dass das vorhandene Geländemodell und die Hintergrundkarte im eMotion2 bereits in den Cache geladen wurden. Als Start- und Landeplatz eignet sich die Zone westlich des Blockgletschers auf der Wiese zwischen Wanderweg und Blockgletscher (siehe Abbildung 62, rot dargestellt).



Abbildung 62: Start- und Landezone der UAV-Befliegung

Auswertung und Visualisierung

Im Voraus sollte klar sein, was für Visualisierungen man machen will und wie diese dargestellt werden sollen. Nach der Messkampagne steht wenig Zeit zur Verfügung, um alle Visualisierungen zu tätigen und den Bericht zu schreiben. Falls vorgängig genügend Zeit zur Verfügung steht, sollten die Visualisierungen bereits einmal "durchgespielt" werden, um bereits mögliche Probleme zu erkennen. Die Software 3DReshaper eignet sich gut für die Visualisierung. Es wurde jedoch festgestellt, dass die Oberflächen im Verhältnis zur Punktmenge doch etwas zu stark geglättet werden. So können keine hochkomplexen und detaillierten Oberflächen berechnet werden.

13.2 Empfehlungen zur generellen Überwachung von Blockgletschern

Für die Überwachung eines Blockgletschers können verschiedene Ansätze gewählt werden. Für eine minimale Kontrolle reichen einige Kontrollpunkte auf dem Blockgletscher aus, welche mit GNSS gemessen werden können. Mit diesem Ansatz können jedoch nur Aussagen über diskrete Punkte getroffen werden. Dies wird deswegen nur bei einem sehr kleinen Budget empfohlen.

Für ein flächenhaftes Monitoring eines Blockgletschers muss eine aufwändigere Methode gewählt werden. Zum einen kann dies die Vermessung mit einer UAV-Drohne, zum anderen mit der TLS-Methode sein. Wie im Kapitel 11 Vergleich TLS versus UAV aufgeführt wurde, besteht ein leichter Vorteil bei der Aufnahme mit einer Drohne. Diese ist kostengünstiger, da der Aufwand geringer ist. Eine Voraussetzung besteht in der Start- und Landemöglichkeit der Drohne. Diese muss in unmittelbarer Nähe des Blockgletschers vorhanden sein. Für sehr detaillierte Aufnahmen von Teilgebieten ist wiederum die TLS-Methode besser geeignet.

Bei sehr schnellen Bewegungen des Blockgletschers oder bei Gefahren für die Umwelt kann auch eine permanente Überwachung in Betracht gezogen werden.

14 Ausblick

Wie bereits im Kapitel 13.1 beschrieben, ist eine nächste Folgemessung frühestens in drei Jahren zu empfehlen. Beide verwendeten Methoden, TLS und UAV, eignen sich für die Blockgletschervermessung und könnten als mögliche Verfahren für die nächste Folgemessung verwendet und weiter untersucht werden. Zum Beispiel könnte ein optimaler Punkt-Abstand (TLS) für eine Blockgletscheroberfläche ermittelt werden.

Als alternative Erfassungsmethode für eine weitere Folgemessung könnte die terrestrische Photogrammetrie geprüft werden (siehe Kapitel 4.1: Terrestrische Photogrammetrie). Mit verschiedenen neuen Softwares konnten in letzter Zeit vielversprechende Resultate erzielt werden (Piermattei / Carturan / Guarnieri, 2015).

Ein Defizit ergab sich bei der Berechnung des Oberflächenmodells. Für bessere Resultate, welche der komplexen Oberflächenstruktur eines Blockgletschers gerecht werden würden, könnte in einer weiterführenden Arbeit eine geeignete Software evaluiert werden.

Mit den erfassten Daten wären weiterführende und vor allem animierte Visualisierungen möglich. Zusätzlich könnten die Daten von der Universität Karlsruhe für langjährige Analysen beigezogen werden. Eventuell kann dies im Rahmen des Vertiefungsprojekts *Visuelle Analyse von Blockgletscher - Veränderungen am Beispiel Macun* des Masterstudiengangs (*Master of Science in Engineering mit Vertiefung in Geomatics*) an der Fachhochschule Nordwestschweiz aufgenommen werden.

Ausserdem wären weiterführende Genauigkeitsuntersuchungen mit den Punktwolken und Oberflächenmodellen interessant. Zusätzlich könnte eine Untersuchung zeigen, ob ein Mehrwert entsteht, wenn die TLS- und UAV-Punktwolken kombiniert werden.

Mit den gewonnenen Daten besteht noch viel Potential für weitere spannende Visualisierungen und Interpretationen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Voraussetzungen eines Blockgletschers (Frauenfelder / Roer, 2007), überarbeitet von Arpagaus / Joss (2012).....	4
Abbildung 2: Aufbau eines Blockgletschers (Frauenfelder / Roer, 2007)	5
Abbildung 3: Gebiet des Schweizerischen Nationalparks (Microsoft, 2015), (SNP, 2015 B)	6
Abbildung 4: Standort Blockgletscher Macun (Microsoft, 2015), (SNP, 2015 B)	7
Abbildung 5: a) Längsschnitt durch einen Inklinometer in dem Führungsrohr; b) Querschnitt durch ein PVC-Rohr mit den Führungsrillen nach (Arenson / Hoelzle / Springman, 2002: 123)	11
Abbildung 6: Testmessungen Lachmatt (Microsoft, 2015).....	14
Abbildung 7: Grundlagennetz 2012 (nicht massstäblich) (Arpagaus / Joss, 2012: 51).....	18
Abbildung 8: Schneesituation auf Macun während der Rekognoszierung am 05.07.2015 .	19
Abbildung 9: Grundlagennetz 2015.....	20
Abbildung 10: Leica Viva GS14, CS15 (FLT Geosystems, 2015)	22
Abbildung 11: GNSS-Messung mit Strebenstativ	23
Abbildung 12: Ionosphärenindex 29.07.2015 (links) und 30.07.2015 (rechts) (swisstopo, 2015)	24
Abbildung 13: Riegl VZ4000 Scanner (C. R. Kennedy & Co, 2015).....	24
Abbildung 14: eBee Drohne von senseFly (Geomares Publishing, 2015)	25
Abbildung 15: Geflogene Fluglinien	25
Abbildung 16: Passpunktsignalisation für UAV	25
Abbildung 17: Auswertekonzept GNSS	27
Abbildung 18: Test der Festpunkte, Helmerttransformation	32
Abbildung 19: Test der Festpunkte, Höhentransformation	32
Abbildung 20: Auswertekonzept TLS	37
Abbildung 21: Dritte Iteration der Multi Station Adjustment in RiSCAN.....	39
Abbildung 22: Netz 2015 mit den rot markierten und geschlossenen Lücken.....	40
Abbildung 23: Genauigkeitsabschätzung durch einen Vergleich von zwei Oberflächen ...	43
Abbildung 24: Auswertekonzept UAV.....	44
Abbildung 25: Rapid Check Preview Orthophoto (links) und Oberflächenmodell (rechts)	45
Abbildung 26: rayCloudEditor Passpunktmessung	46
Abbildung 27: Verknüpfungspunkte, GCP, Aufnahmeposition der Bilder.....	47
Abbildung 28: Fotografischer Vergleich 1923 (Frey, 1923) (links) – 2015 (rechts)	49
Abbildung 29: Luftbilder 1939, 1973, 2000, 2015	50
Abbildung 30: Detailansicht digitalisierter Blockgletschergrenze, Hintergrundkarte: 1939 (links) und 2015 (rechts).....	51
Abbildung 31: Felszonen im Netz 2012	52
Abbildung 32: Oberflächenmodell 1939, Löcher füllen.....	52

Abbildung 33: Farbwahl für die Visualisierungen (Brewer / Harrower / Pennsylvania State University, 2015)	53
Abbildung 34: Oberflächenvergleich 1939 - 2015, links: Übersicht, rechts: Ansicht von oben.....	53
Abbildung 35: Oberflächenvergleich 1939 - 2015, links: Ansicht Wurzelzone, rechts: Ansicht Front	54
Abbildung 36: Perimeter Volumenvergleich, blau: 2015, orange: 1939	54
Abbildung 37: Volumenanalyse 1939 - 2015 aus Luftbilddaten gesamter Blockgletscher	55
Abbildung 38: Volumenanalyse 1939 - 2015 aus Luftbilddaten im Wurzelbereich	55
Abbildung 39: Längsprofile 1939 - 2015 aus Luftbilddaten, Übersicht.....	56
Abbildung 40: Längsprofile 1939 - 2015 aus Luftbilddaten im Frontbereich.....	57
Abbildung 41: Längsprofile 1939 - 2015 aus Luftbilddaten im Wurzelbereich.....	57
Abbildung 42: Detailprofil 1939 - 2015 aus Luftbilddaten des Hangrutsches	58
Abbildung 43: Oberflächenvergleich 2012 - 2015 aus TLS-Daten, Übersicht	59
Abbildung 44: Oberflächenvergleich 2012 - 2015 aus TLS-Daten des Wurzelbereiches...	60
Abbildung 45: Oberflächenvergleich 2012 - 2015 aus TLS-Daten des Zungenbereichs	60
Abbildung 46: Oberflächenvergleich in Fliessrichtung 2012 - 2015 aus TLS-Daten der Front.....	61
Abbildung 47: Oberflächenvergleich 2012 - 2015 aus TLS-Daten des östlichen Hangrutsches.....	62
Abbildung 48: Längsprofile 2012 - 2015 aus TLS-Daten im Frontbereich	63
Abbildung 49: Längsprofile 2012 - 2015 aus TLS-Daten im Wurzelbereich	64
Abbildung 50: Detailprofil 2012 - 2015 aus TLS-Daten an der Blockgletscherfront	64
Abbildung 51: GNSS Verschiebungsplan 2012 - 2015	65
Abbildung 52: Texturiertes Oberflächenmodell	66
Abbildung 53: 3D PDF des texturierten Oberflächenmodells.....	66
Abbildung 54: Orthophoto Macun.....	67
Abbildung 55: links: Oberflächenmodell in Google Earth integriert, rechts: Orthophoto in Google Maps integriert	67
Abbildung 56: Höhenlinienkarte 2015	68
Abbildung 57: Vorschau des gedruckten 3D Modells.....	68
Abbildung 58: Anaglyphenbild Frontansicht	69
Abbildung 59: Anaglyphenbild Ansicht hinten	69
Abbildung 60: Höhendifferenzen zwischen den Oberflächenmodellen UAV und TLS, Nordorientiert.....	71
Abbildung 61: Ein Punkt der Universität Karlsruhe auf dem Blockgletscher.....	77
Abbildung 62: Start- und Landezone der UAV-Befliegung.....	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Durchgeführte Scans mit der MS50 in Lachmatt	15
Tabelle 2: Durchgeführte Scans auf dem Dach der FHNW	16
Tabelle 3: Übersicht Verwendungszweck der Punkte 2012 und 2015	21
Tabelle 4: Messablauf 2015	22
Tabelle 5: Überprüfung der Höhenmassstäbe.....	29
Tabelle 6: Überprüfung Dreh- und Massstabsparameter	30
Tabelle 7: Test der normierten Verbesserungen	30
Tabelle 8: Globaler Modelltest	31
Tabelle 9: Test der Festpunkte, Signifikanzgrenze Lage.....	31
Tabelle 10: Test der Festpunkte, Signifikanzgrenze Höhe.....	31
Tabelle 11: Genauigkeiten des definitiv frei gelagerten Netzes	33
Tabelle 12: Koordinaten 2015	34
Tabelle 13: Verschiebungsanalyse 2012 - 2015	35
Tabelle 14: Differenzen der Target-Koordinaten: Punktwolke - GNSS.....	41
Tabelle 15: Höhendifferenzen des Oberflächenmodells zu den Kontrollpunkten.....	42
Tabelle 16: Höhengenaugigkeit Oberflächenmodell aus UAV Daten.....	48
Tabelle 17: Zeit- und Kostenschätzung TLS	72
Tabelle 18: Zeit- und Kostenschätzung UAV.....	73

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AGNES	Automatisches GPS-Netz Schweiz
ALS	Airborne Laser Scanning
cm	Zentimeter
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DTM	Digitales Terrainmodell
etc.	et cetera, Bedeutung: und die übrigen Dinge
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
GCP	Ground Control Point (= Passpunkt)
GIF	graphics interchange format
GLONASS	Globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
IMU	Inertial Measuring Unit
IGP	Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
m	Meter
m ³	Kubikmeter
min	Minute
mm	Millimeter
m ü. M.	Meter über Meer
PCV	phase center variations
PDF	portable document format
ppm	Parts per million
pt/s	Punkte pro Sekunde
RMS	Root Mean Square
RTK	Real Time Kinematic
SNP	Schweizerische Nationalpark
TLS	Terrestrisches Laser Scanning
UAV	unmanned aerial vehicles
VRS	Virtuelle Referenzstation
WGS84	World Geodetic System 1984

Literaturverzeichnis

- Arenson, Lukas / Hoelzle, Martin / Springman, Sarah (2002): *Borehole Deformation Measurements and Internal Structure of Some Rock Glaciers in Switzerland*. In: *Permafrost and Periglacial Processes* 13: S. 117 - 135.
- Arpagaus, Thomas / Joss, Samuel (2012): *Bewegungsmessungen am Blockgletscher Macun (SNP) mit TLS – 1. Folgemessung*. MuttENZ: Institut für Vermessung und Geoinformation, Fachhochschule Nordwestschweiz.
- Barsch, Dietrich (1992): *Permafrost Creep and Rockglaciers*. In: *Permafrost and Periglacial Processes* 3: S. 175-188.
- Brewer, Cynthia / Harrower, Mark / Pennsylvania State University (2015): *Color Brewer 2.0*. URL: <http://colorbrewer2.org/> [Stand: 17. August 2015].
- C. R. Kennedy & Co (2015): *Riegl VZ-4000*. URL: <http://survey.crkennedy.com.au/products/3d-laser-scanning/riegl-laser-scanners/riegl-vz-4000> [Stand: 12. August 2015].
- Debella-Gilo, Misganu / Käab, Andreas (2012): *Measurement of Surface Displacement and Deformation of Mass Movements Using Least Squares Matching of Repeat High Resolution Satellite and Aerial Images*. In: *Remote Sensing* 4: S. 43-67.
- Eisenbeiss, Henri (2009): *UAV Photogrammetry*. Zürich: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie ETH Zürich.
- Favey, Etienne (2001): *Investigation and Improvement of Airborne Laser Scanning Technique for Monitoring Surface Elevation Changes of Glaciers*. Zürich: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie ETH Zürich.
- FLT Geosystems (2015): *Leica Viva GS14 GNSS RTK rover (ea)*. URL: <http://www.fltgeosystems.com/gps-systems/survey-grade-gps/leica-viva-gs14-gnss-rtk-rover-lca-gs14/> [Stand: 12. August 2015].
- Frauenfelder, R / Roer, I (2007): *Permafrostindikatoren der besonderen Art: was Blockgletscher bewegt*. In: *Die Alpen = Les Alpes* 9: S. 34-37.
- Frey, Ed. (1923): *ETH Bibliothek*. URL: http://www.e-pics.ethz.ch/index/ethbib.bildarchiv/ETHBIB.Bildarchiv_Dia_282-6501_64941.html [Stand: 17. August 2015].
- Geomares Publishing (2015): *Geo-matching.com, eBee*. URL: <http://www.geo-matching.com/products/id2184-eeb.html> [Stand: 12. August 2015].
- Heim, Luca (2014): *Application and Analysis of Terrestrial Laser Scanning in a Periglacial High Mountain Area*. Zürich: Geographisches Institut, Universität Zürich.
- Inderbitzin, Lukas / Pointner, Eric (2001): *Geologie von Macun*. Diplomarbeit Geologie. Bern, Universität Bern.
- Jäckli, Heinrich (1978): *Der Blockstrom in der Val da l'Acqua*. In: *Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft*. S. 213-221.

- Käab, A (2007): *Rock Glaciers and Protalus Forms*. In: *PERIGLACIAL LANDFORMS, ROCK FORMS/Rock Glaciers and Protalus Forms*: S. 2236-2242.
- Kaufmann, Viktor / Ladstädter, Richard / Kienast, Gerhard (2007): *10 YEARS OF MONITORING OF THE DOESEN ROCK GLACIER (ANKOGEL GROUP, AUSTRIA) - A REVIEW OF THE RESEARCH ACTIVITIES FOR THE TIME PERIOD 1995-2005.*, Graz University of Technology.
- KBOB (2015): *Verträge mit Architekten und Ingenieuren - Empfehlungen zur Honorierung*. Bern, Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren.
- Ladstädter, Richard / Kaufmann, Viktor (2005): *Terrestrisch-photogrammetrische Dokumentation des Blockgletschers im Äußeren Hochebenkar*. Graz: Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, Technische Universität Graz.
- Landtwing, Stephan (2005): *Airborne Laser Scanning - Genauigkeitsinformationen für den Auswertungsprozess*. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Leica Geosystems (2013): *Leica Nova MS50, Datenblatt*. URL: http://www.leica-geosystems.ch/downloads123/zz/tps/nova_ms50/brochures-datasheet/Leica_Nova_MS50_DAT_de.pdf [Stand: 08. August 2015].
- Lerch, Thomas / Wüthrich, Marco (2010): *Bewegungsmessungen am Blockgletscher Macun mit terrestrischem Laserscanning*. Muttenz: Institut für Vermessung und Geoinformation, Fachhochschule Nordwestschweiz.
- Lozza, Hans (2000): *Geheimnisvolles Macun*. In: *Cratschla I*: S. 18-25.
- Lozza, Hans et. al. (2012 A): *BLOCKGLETSCHER - GIGANTISCHE TATZELWÜRMER*. In: *Cratschla*: S. 4-5.
- Lozza, Hans et. al. (2012 B): *DER DYNAMISCHE: BLOCKGLETSCHER VAL DA L'ACQUA*. In: *Cratschla I*: S. 8-9.
- Lozza, Hans et. al. (2012 C): *LÄNGSTER BLOCKGLETSCHER DER SCHWEIZ: VAL SASSA*. In: *Cratschla I*: S. 6-7.
- Mautz, Rainer et. al. (2010): *Bestimmung der Fliessgeschwindigkeiten von Blockgletschern*. In: *Geomatik Schweiz* 6, Juni 2010: S. 264-268.
- Microsoft (2015): *Bing Maps*. URL: <http://www.bing.com/maps/?mkt=de-de> [Stand: 11. August 2015].
- Piermattei, Livia / Carturan, Luca / Guarnieri, Alberto (2015): *Use of terrestrial photogrammetry based on structure-from-motion for mass balance estimation of a small glacier in the Italian alps*. In: *Earth Surface, Processes and Landforms*.
- Rangecroft, Sally et. al. (2014): *A First Rock Glacier Inventory for the Bolivian Andes*. In: *Permafrost and Periglacial Processes*: S. 333-343.
- Sanjose, J. et. al. (2014): *Geomatics Techniques Applied To Glaciers, Rock Glaciers, And Ice Patches In Spain.*, Swedish Society for Anthropology and Geography.

- senseFly Ltd (2014): *eBee senseFly, Datenblatt*. URL:
https://www.sensefly.com/fileadmin/user_upload/documents/brochures/eBee-de.pdf [Stand: 21. August 2015].
- Sievers, Beat (2009): *GNSS- ionosphärische und troposphärische Refraktion; Mapping-Funktionen*. Script Vermessung und Geodäsie. Muttenz, Institut Vermessung und Geoinformation.
- SNP (2008): *Schweizerische Nationalpark Leitbild*. URL:
<http://www.nationalpark.ch/de/about/ueber-uns/institution/ziele/> [Stand: 10. August 2015].
- SNP (2015 A): *Schweizerische Nationalpark*. URL: <http://www.nationalpark.ch> [Stand: 10. August 2015].
- SNP (2015 B): *SNP Datenbank*. [12. August 2015 B].
- Spencer, C (1900): *A peculiar form of talus*. In: *Science* 11/ 266: S. 188.
- Staiger, Rudolf (2003): *Terrestrial Laser Scanning - Technology, Systems and Applications*. In: *2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco*.
- swisstopo (2015): *swipos*. URL: <http://www.swipos.ch/Network/Ionosphere.aspx> [Stand: 15. August 2015].
- Terradata AG (2014): *Fotogrammetrie / 3D-Modell Steinbock*. URL:
http://www.terradata.ch/src/pdf/80858106-fotogrammetrie__3dmodellsteinbock.pdf?lang=d [Stand: 19. August 2015].
- Wehr, Aloysius / Lohr, Uwe (1999): *Airborne laser scanning - an introduction and overview*. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: S. 68-82.

Anhang

- A1 Aufgabenstellung
- A2 Projektmanagement
- A3 Terminplan
- A4 Datenorganisations- und Datensicherungskonzept
- A5 Materialliste der Messwoche
- A6 Feldprotokolle
- A7 Mathematisches Modell GNSS
- A8 Berechnungsprotokolle Basislinienauswertung GNSS
- A9 Berechnungsprotokoll Definitiv frei gelagertes Netz GNSS
- A10 Quality Report der Bündelblockausgleichung UAV
- A11 Profile aus Flugbilddaten
- A12 Profile aus TLS Daten
- A13 Rot-Cyan Brille