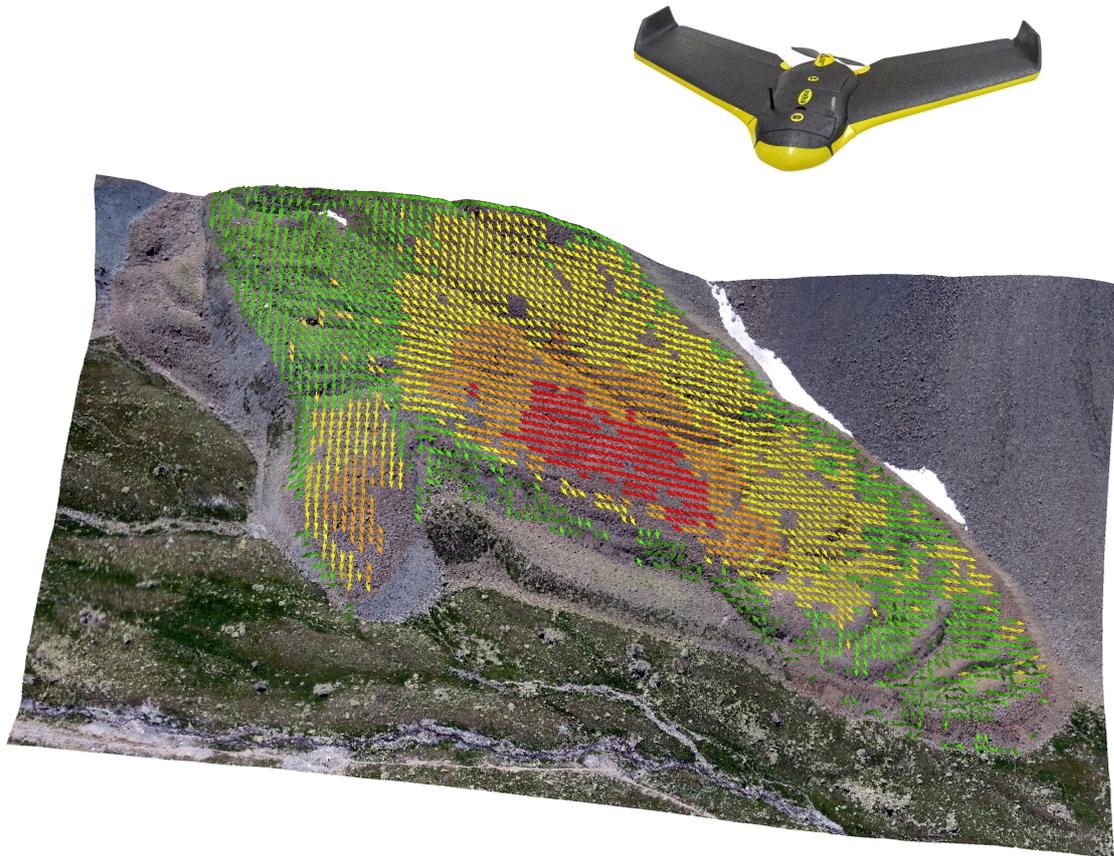


GEO 511 Masterarbeit

Auswertung und Anwendung UAS-generierter digitaler Höhenmodelle in periglazialer Umgebung

Am Beispiel des Blockgletschers Muragl, Oberengadin



Eingereicht von Dominik Stamm 07-907-603

Betreut durch: Johann Müller
Fakultätsmitglied: Prof. Dr. Andreas Vieli

September 2015

Geografisches Institut der Universität Zürich

Vorwort

Die Vielfalt und Schönheit der Landschaften, welche ich in meiner Heimat und auf Reisen kennenlernte, die Neugierde, wie deren Formen entstehen und sich verändern, sowie die Tatsache, die Umwelt an sich besser verstehen zu können, waren es, welche mich zum Geografiestudium hinzogen. Mit grossem Interesse verfolgte ich zudem die technischen Entwicklungen, welche die Beobachtung der Erde auf bemerkenswerte Art und Weise ermöglichen. Daher war es ideal für mich, diese Interessen in der vorliegenden Masterarbeit kombinieren zu können. Die Feldarbeit mit der Drohne, welche eindrucksvolle Luftbilder lieferte, den Prozess von der Datenerhebung bis hin zur Anwendung kennen zu lernen und einen Einblick in die Untersuchung von Blockgletschern als imposante Landschaftsformen zu erhalten, waren Höhenpunkte meines Studiums. Dafür möchte ich mich gerne bei Johann Müller bedanken, welcher mich durch dieser Arbeit hindurch betreute und mir zu jeder Zeit mit Rat und Tat zur Seite stand. Die gute Zeit im Feld und die teils abenteuerlichen Flüge mit der Drohne werde ich so schnell nicht vergessen.

Zusammenfassung

Unbemannte Flugobjekte (UAS) haben sich in den letzten Jahrzehnten als Alternative und Ergänzung zur Flugzeug- und Satelliten-gestützter Fernerkundung etabliert. Die Flexibilität und die geringen Kosten bei der Anwendung sowie die hohe räumliche und zeitliche Auflösung sprechen für deren Verwendung. Die Untersuchung von Gebirgslandschaften durch UAS ist noch wenig erforscht, obwohl das Potential durch die oben genannten Vorteile ersichtlich ist. Die vorliegende Arbeit setzt an diesem Punkt an und untersucht für das Gebiet um den Blockgletscher Muragl im Oberengadin einerseits die Genauigkeiten UAS-generierter digitaler Höhenmodelle, andererseits die Anwendung dieser Höhenmodelle für eine Deformationsanalyse des Blockgletschers über zehn Monate hinweg.

Die Genauigkeit der digitalen Höhenmodelle wurde anhand von 20 Tachymeter Messpunkten sowie eines terrestrischen Laserscans beurteilt. Dabei wurden herkömmliche und statistisch robuste Messgrößen zur Beschreibung der Genauigkeit verwendet. Die Resultate zeigen eine vertikale Genauigkeit von $RMSE = 23$ cm (mit Kontrollpunkten) bei einer Auflösung um die sieben Zentimeter. Wurden keine Kontrollpunkte verwendet, ist die Genauigkeit wesentlich geringer ($RMSE = 1.24$ m bzw. 2.93 m). Die räumliche Verteilung der Abweichung zeigt systematische Fehler gegen den Randbereich der Höhenmodelle hin, welche durch die Verwendung von Kontrollpunkten minimiert werden können. Zudem nimmt die Genauigkeit mit zunehmender Hangneigung stark ab.

In der Deformationsanalyse zeigt der Blockgletscher Muragl für den Zeitraum von zehn Monaten verschiedene Bereiche, welche sich durch unterschiedliche Beträge der Oberflächenverschiebungen auszeichnen und das Resultat interner und externer Faktoren sind. Für die Deformationsanalyse wurde die horizontale und dreidimensionale Oberflächenverschiebung sowie die vertikale Höhenänderung betrachtet. Im Durchschnitt betragen die dreidimensionalen Oberflächenverschiebungen 0.75 Meter, während maximale Werte bis 2.26 Meter erreicht werden, wobei die Plausibilität der Verschiebungen anhand von Tachymeter Messungen verifiziert wurde. Die vertikale Höhenänderung zeigt eine geringe durchschnittliche Abnahme von -0.03 Zentimetern, woraus kein Trend bezüglich einer Höhenänderung ersichtlich wird.

Diese Arbeit konnte zeigen, dass UAS für die Anwendung in periglazialer Umgebung geeignet sind, wobei die flächendeckenden Daten bei hoher Auflösung und Genauigkeit die nennenswertesten Eigenschaften sind, welche für eine Anwendung sprechen.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Zusammenfassung.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis.....	X
1 Einleitung.....	1
1.1 Hintergrund und Motivation.....	1
1.2 Idee und Aufbau der Arbeit.....	2
2 Grundlagen.....	3
2.1 Fernerkundung.....	3
2.1.1 Erhebungsmethoden.....	5
2.1.2 Auswertung von Luft- und Satellitenbildern.....	8
2.1.3 Digitale Höhenmodelle.....	10
2.2 Beurteilung der Genauigkeit digitaler Höhenmodelle.....	11
2.2.1 Auswertung von Messungen.....	11
2.2.2 Auswertung digitaler Höhenmodelle.....	13
2.3 Blockgletscher.....	15
2.3.1 Definitionen.....	15
2.3.2 Eigenschaften von Blockgletscher.....	15
2.4 Deformationsanalyse von Blockgletschern.....	19
2.4.1 Dreidimensionale Oberflächenverschiebung.....	19
2.4.2 Erhebung und Berechnung	20
3 Forschungsfragen.....	21
4 Untersuchungsgebiet.....	22
4.1 Oberengadin und Val Muragl.....	22
4.1.1 Geomorphologische Situation.....	23
4.1.2 Meteorologische Situation.....	24
4.2 Blockgletscher Muragl.....	24
4.2.1 Eigenschaften.....	24

4.2.2	Untersuchungen am Blockgletscher Muragl.....	25
5	Daten und Methoden.....	27
5.1	eBee Kartografie-Drohne.....	27
5.1.1	Technische Eigenschaften.....	28
5.1.2	Funktionsweise.....	29
5.2	Referenzdaten.....	31
5.2.1	Elektronischer Tachymeter.....	31
5.2.2	Terrestrischer Laserscanner.....	32
5.2.3	Differential Global Positioning System.....	34
5.3	Daten der eBee Kartografie-Drohne.....	35
5.3.1	Datenerhebung.....	35
5.3.2	Prozessierung.....	35
5.3.3	Eigenschaften der digitalen Höhenmodelle.....	36
5.3.4	Eigenschaften der Orthofotos.....	37
5.4	Beurteilung der Genauigkeit.....	38
5.4.1	Beurteilung durch Tachymeter	38
5.4.2	Beurteilung durch terrestrischen Laserscanner.....	39
5.4.3	Räumliche Verteilung der Höhendifferenzen.....	40
5.5	Deformationsanalyse.....	41
5.5.1	Dreidimensionale Oberflächenverschiebung.....	41
5.5.2	Vertikale Höhenänderung.....	44
6	Resultate.....	45
6.1	Genauigkeit der eBee Höhenmodelle.....	45
6.1.1	Genauigkeit beurteilt durch Tachymeter.....	45
6.1.2	Genauigkeit beurteilt durch terrestrischen Laserscanner.....	47
6.1.3	Räumlich Verteilung der Höhendifferenzen.....	52
6.2	Deformationsanalyse anhand der eBee Höhenmodelle.....	56
6.2.1	Horizontale Oberflächenverschiebung.....	56
6.2.2	Dreidimensionale Oberflächenverschiebung.....	62
6.2.3	Vertikale Höhenänderung.....	64
7	Diskussion.....	66
7.1	Diskussion der Genauigkeit.....	66
7.1.1	Genauigkeit beurteilt durch Tachymeter.....	66
7.1.2	Genauigkeit beurteilt durch terrestrischen Laserscanner.....	67
7.1.3	Räumliche Verteilung der Höhendifferenzen.....	71

7.2 Diskussion der Deformationsanalyse.....	73
7.2.1 Horizontale Oberflächenverschiebungen.....	74
7.2.2 Dreidimensionale Oberflächenverschiebung.....	78
7.2.3 Vertikale Höhenänderung.....	79
7.3 UAS im Kontext der Fernerkundung.....	80
7.3.1 UAS im Vergleich zu anderen Erhebungsmethoden.....	81
7.3.2 Zukünftige Entwicklungen im Bereich der UAS.....	83
8 Erkenntnis.....	84
Literaturverzeichnis.....	87

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Elektromagnetisches Spektrum.....	4
Abbildung 2.2: Umlaufbahn der Landsat-Satelliten.....	6
Abbildung 2.3: Bildebene.....	9
Abbildung 2.4: Grundprinzip der Bündelblockausgleichung.....	9
Abbildung 2.5: Entstehungsschritte eines Blockgletschers.....	16
Abbildung 2.6: Blockgletscher im Val da l' Acqua.....	17
Abbildung 4.1: Übersicht des Untersuchungsgebietes.....	22
Abbildung 4.2: Geomorphologische Karte.....	23
Abbildung 4.3: Blockgletscher Muragl.....	25
Abbildung 4.4: Standorte der Bohrlöcher auf dem Blockgletscher Muragl.....	26
Abbildung 5.1: eBee Kartografie-Drohne.....	27
Abbildung 5.2: Spektrale Eigenschaften der verwendeten Kameras.....	29
Abbildung 5.3: Mittels elektronischem Tachymeter eingemessene Punkte.....	32
Abbildung 5.4: Punktwolke des terrestrischen Laserscanners.....	33
Abbildung 5.5: Einmessen der Kontrollpunkte mittels DGPS.....	34
Abbildung 5.6: Flugplan und Überlappung der einzelnen Luftbilder.....	35
Abbildung 5.7: Schattiertes eBee Höhenmodell mit Randeffekten.....	37
Abbildung 5.8: Prinzip der CIAS Bild-Korrelationssoftware.....	42
Abbildung 6.1: Räumliche Verteilung zwischen den Höhendifferenzen Δz	48
Abbildung 6.2: Die jeweils obere Reihe zeigt die Δz Verteilung.....	50
Abbildung 6.3: Abhängigkeit der Höhendifferenzen bezüglich der Hangneigung.....	52
Abbildung 6.4: Abhängigkeit der Höhendifferenzen bezüglich der Beleuchtung.....	55
Abbildung 6.5: Horizontale Verschiebungen über zehn Monate hinweg.....	61
Abbildung 6.6: Beträge der vertikalen Verschiebungen.....	63

Abbildung 6.7: Vertikale Höhenänderung des Blockgletschers Muragl.....65

Abbildung 7.1: Dreiecksnetze des terrestrischen Laserscanners70

Abbildung 7.2: Horizontale Oberflächenverschiebung.....76

Abbildung 7.3: Vertikale Höhenänderung anhand der beiden RGB_KP Höhenmodelle.....79

Abbildung 7.4: Verfügbare Techniken, Sensoren und Systeme der Geomatik.....81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messgrößen zur Beurteilung der Genauigkeit bei gegebener Normalverteilung..	13
Tabelle 2: Verwendete Robuste Messgrößen.....	14
Tabelle 3: Technische Daten der eBee Kartografie-Drohne.....	28
Tabelle 4: Eigenschaften der Orthofotos und digitalen Höhenmodelle.....	36
Tabelle 5: Beurteilung der Genauigkeit durch 20 Tachymeter Messpunkte.....	45
Tabelle 6: Beurteilung der Genauigkeit durch 20 Tachymeter Messpunkte.....	46
Tabelle 7: Beurteilung der eBee Höhenmodelle durch terrestrischen Laserscan.....	47
Tabelle 8: Beurteilung der Genauigkeit durch den terrestrischen Laserscan.....	51
Tabelle 9: Abhängigkeit der Höhendifferenzen.....	53
Tabelle 10: Abhängigkeit der Höhendifferenzen bezüglich Oberflächenbeschaffenheit.....	54
Tabelle 11: Abhängigkeit der Höhendifferenzen bezüglich der Beleuchtung.....	55
Tabelle 12: Anzahl Verschiebungen, welche die Auswahlkriterien erfüllen.....	57
Tabelle 13: Die Grösse des Referenzblocks.....	58
Tabelle 14: Unterschied zwischen einem schattierten und Graustufen Höhenmodell.....	58
Tabelle 15: Die Daten stammen aus den zwei angegebenen digitalen Höhenmodellen.....	59
Tabelle 16: Eigenschaften der horizontalen Verschiebungen über zehn Monate hinweg.....	60
Tabelle 17: Die vertikale Verschiebung.....	62
Tabelle 18: Vertikale Höhenänderung des Blockgletschers Muragl.....	64
Tabelle 19: Vergleich der Werte mit und ohne Ausreisser.....	68
Tabelle 20: Vergleich von statistischen und statistisch robusten Messgrößen.....	68
Tabelle 21: Statistische Werte aufgrund der Beleuchtung.....	73
Tabelle 22: Einige Vor- und Nachteile von unbemannten Flugsystemen.....	82

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Gebirgslandschaften sind einzigartige Ökosysteme, welche weltweit in allen Klimazonen vorzufinden sind. Sie wurden als hoch diverse und reiche Ökosysteme erkannt und sind ein Schlüsselement des globalen Geosphären-Biosphären-Systems (Diaz et al. 2003). Gebirgslandschaften bedecken gegen einen Fünftel der kontinentalen Erdoberfläche (Haeberli und Beniston 1998) und bieten direkte Lebensgrundlage für einen Viertel der Weltbevölkerung (Diaz et al. 2003). Gleichzeitig reagieren sie hochsensibel auf den gegenwärtigen Klimawandel und sind auch zukünftigen klimatischen Veränderungen stark ausgesetzt (Settele et al. 2014). In diesem Kontext spielen glaziale und periglaziale Erscheinungsformen durch ihre Temperatur bedingte Abhängigkeit eine wichtige Rolle als Indikatoren des Klimawandels (Haeberli et al. 2007; Roer et al. 2008). Blockgletscher sind von besonderem Interesse, da sie mit ihrem Alter von bis zu 10'000 Jahren wichtige Faktoren der Landschaftsentwicklung in periglazialer Umgebung und nützliche Geo-Indikatoren für Gebirgspermafrost und damit verbundene Klimabedingungen sind (Kääb et al. 2007). Da mit den klimabedingten Veränderungen auch mit einer neuen Risiko- und Naturgefahrensituation zu rechnen ist, empfiehlt es sich, Veränderungen systematische zu erfassen, um Gebirgsprozesse und deren Interaktion mit der Umwelt zu verstehen (Stoffel und Huggel 2012).

Aufgrund der oftmals schwer zugänglichen Standorte sowie der räumlich grossflächigen Ausdehnung haben sich Methoden der Fernerkundung als ein nützliches Werkzeug erwiesen, um Gebirgsprozesse zu erforschen (Kääb 2002). Aktuelle und räumlich genaue digitale Höhenmodelle sind dabei essenziell für das numerische Modellieren von Massenbewegungen oder Kartieren und Quantifizieren von Geländeänderungen (Bühler et al. 2012). Dabei ist es von grosser Wichtigkeit die Genauigkeit der verwendeten digitalen Höhenmodelle zu kennen, da diese die Anwendung und Interpretation stark beeinflusst (Müller et al. 2014). Trotz technischer Entwicklungen und Möglichkeiten im Bereich der Satelliten- und Flugzeuggestützten Fernerkundung (Kääb et al. 2005) sind Auflösung und Genauigkeit der erhobenen Daten sowie Verfügbarkeit und Kosteneffizienz für gewisse Anwendungen ungenügend (Niethammer et al. 2012). Unbemannte Flugobjekte (UAS; engl. Unmanned Aircraft Systems) können hier durch Generieren von hoch aufgelösten Orthofotos (geometrisch korrigierte Bilder) und digitalen Höhenmodellen sowie Flexibilität in der Anwendung und geringen Erhebungskosten ein nützliches Werkzeug im Bereich der Glaziologie und Geomorphologie sein (Immer-

zeel et al. 2014; Niethammer et al. 2012). Die Anwendung und Nützlichkeit von UAS in periglazialen Umgebungen sind jedoch noch wenig erforscht, obwohl ihnen dort ein grosses Potenzial zugeschrieben wird (Immerzeel et al. 2014; Whitehead et al. 2013).

1.2 Idee und Aufbau der Arbeit

Anhand des Blockgletschers Muragl werden in dieser Arbeit mittels UAS-basierten digitalen Höhenmodellen dreidimensionale Verschiebungen sowie vertikale Höhenänderungen über den Zeitraum eines Jahres berechnet. Dazu wird die Bild-Korrelationssoftware CIAS (Kääb und Vollmer 2000) sowie das Softwareprodukt ArcGIS verwendet. Ziel ist es herauszufinden, ob sich UAS für eine solche Untersuchung eignen und falls ja, welche zusätzlichen Erkenntnisse im Vergleich zu anderen Untersuchungsmethoden gewonnen werden können. Um diesbezüglich Aussagen treffen zu können werden in einem ersten Schritt die UAS-generierten digitalen Höhenmodelle anhand terrestrischer Laserscans sowie geodätischer Messungen ausgewertet. Dabei wird aufgezeigt, welche Genauigkeiten von UAS-basierten digitalen Höhenmodellen in periglazialer Umgebung erwartet werden können und wie sich diese Genauigkeiten räumlich verhalten. Durch die Erfahrung im Feld und unter Beizug externer Literatur wird anschliessend ein Vergleich zu anderen Methoden zur Erhebung von Höhendaten und Orthofotos gezogen. Die Veränderungen über ein Jahr hinweg werden im Kontext der seit der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts angehenden wissenschaftlichen Untersuchungen des Blockgletschers Muragl betrachtet, um aufzuzeigen, wie sich der Blockgletscher zum gegenwärtigen Klima verhält und welche zukünftigen Entwicklungen zu erwarten sind.

Der Einleitung folgend werden im Kapitel 2 die Grundlagen dieser Arbeit vertieft vermittelt. Nach einer kurzen Einführung in die Fernerkundung folgt ein Unterkapitel zur Auswertung von Messungen und schlussendlich werden die Grundlagen über Blockgletscher und deren Eigenschaften vermittelt. In Kapitel 3 werden die Ziele dieser Arbeit anhand von Forschungsfragen definiert. Gefolgt wird dieses Kapitel von der Beschreibung des Untersuchungsgebietes in Kapitel 4. Im 5. Kapitel werden die Methoden erläutert, welche es erlauben, die einzelnen Arbeitsschritte dieser Arbeit nach zu vollziehen. Darauf folgen die Resultate in Kapitel 6 und deren Diskussion in Kapitel 7. Im 8. Kapitel werden schlussendlich die Erkenntnisse dieser Arbeit dargelegt und die Forschungsfragen beantwortet.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen, welche für das Verständnis dieser Arbeit notwendig sind, vermittelt. Nach einem kurzen Einblick in die Fernerkundung folgt eine Einführung in das Auswerten von Messungen und die Beurteilung von digitalen Höhenmodellen. Zum Schluss werden Blockgletscher sowie ihre Eigenschaften thematisiert und es wird erklärt, wie man die Deformation von Blockgletscher anhand von digitalen Höhenmodellen berechnen kann.

2.1 Fernerkundung

Um den Zustand der Umwelt sowie deren Veränderung festzuhalten benötigen wir Informationen. Handelt es sich um Informationen, welche den physikalischen Zustand der Umwelt beschreiben, können diese im Prinzip auf drei verschiedene Arten gemessen werden: Durch eine direkte Messung, bei der sich das Messgerät am Ort der Messung befindet, durch eine Fernmessung, bei der sich das Messgerät zwar am Ort der Messung befindet, das Resultat der Messung jedoch entfernt davon angezeigt wird und durch Fernerkundung, bei welcher sich das Messgerät entfernt vom Messobjekt befindet und die zu messende Grösse aus dem vom Messobjekt reflektierten oder emittierten physikalischen Wert abgeleitet wird (Albertz 2007). Im weitesten Sinne beinhaltet die Fernerkundung somit ein Vielzahl möglicher Verfahren zur Gewinnung von Information durch berührungsfreie Messungen. Diese breite Definition, zu welcher auch Verfahren gezählt werden, wie sie in der Astronomie, der medizinischen Bildgebung oder der Bildgebung durch Sonar zur Anwendung kommen (Schott 2007), soll für die vorliegende Arbeit präzisiert werden. Unter Fernerkundung werden in dieser Arbeit daher Verfahren verstanden, bei welchen, nach Albertz 2007,

- die Informationsgewinnung durch das Messen der vom Messobjekt reflektierten oder emittierten elektromagnetischen Strahlung geschieht,
- die Empfangseinrichtungen in Luft- bzw. Raumfahrzeugen (UAS, Flugzeuge, Satelliten) mitgeführt werden,
- die Erdoberfläche inklusive die darauf befindlichen Objekte sowie die Atmosphäre untersucht wird.

Zurück geht die Fernerkundung auf erste Beobachtungen und Fotografien aus der Luft mit Hilfe von Ballonen um die Mitte des 19. Jahrhunderts. Mit dem Aufkommen von Flugzeugen und später Satelliten, den Fortschritten im Bereich der Fotografie sowie anderen Aufnahme-

und Auswertungstechniken erlebte die Fernerkundung einen grossen Aufschwung im Verlauf des 20. Jahrhunderts. Heutzutage bildet die Fernerkundung eine wichtige Grundlage in vielen Bereichen wie zum Beispiel der Raumplanung, des Umweltschutzes oder der Versorgungswirtschaft (Albertz 2007). Die verschiedenen Fernerkundungssysteme können grob nach der Quelle der empfangenen elektromagnetischen Strahlung (aktive und passive Systeme) sowie nach deren Wellenbereich und der Art des Strahlungsempfängers unterschieden werden. Während passive Systeme die in der Natur vorhandene elektromagnetische Strahlung benutzen, wie zum Beispiel die Sonnenstrahlung oder Thermalstrahlung, benutzen aktive Systeme eine eigene Energiequelle, welche die Erdoberfläche bestrahlt. Die daraus reflektierte Strahlung wird dann für das Auswertungsverfahren benutzt. Ein Beispiel für ein aktives System sind Radarverfahren. Diese Verfahren bedienen sich der Mikrowellen, welche kaum durch die Atmosphäre beeinflusst werden (vgl. Abb. 2.1) und daher Wetter unabhängig betrieben werden können. Des weiteren bringen aktive Systeme den Vorteil mit sich, auch in der Nacht operieren zu können. Weiter werden die Systeme nach ihrem verwendeten Wellenbereich der elektromagnetischen Strahlung unterschieden. Der abgedeckte Spektralbereich wird als Kanal bezeichnet. Werden gleichzeitig mehrere Kanäle aufgezeichnet, spricht man von einem Multispektralsystem (Albertz 2007). Häufig verwendet werden Sensoren, welche Kanäle im Bereich des sichtbaren Lichtes sowie des nahen Infrarot besitzen (vgl. Abb 2.1) (Schott 2007). Eine letzte Gliederung ergibt sich anhand der Art des verwendeten Strahlungsempfängers. Hier werden vor allem zwischen fotografischen, digitalen und Mikrowellensysteme unterschieden (Albertz 2007).

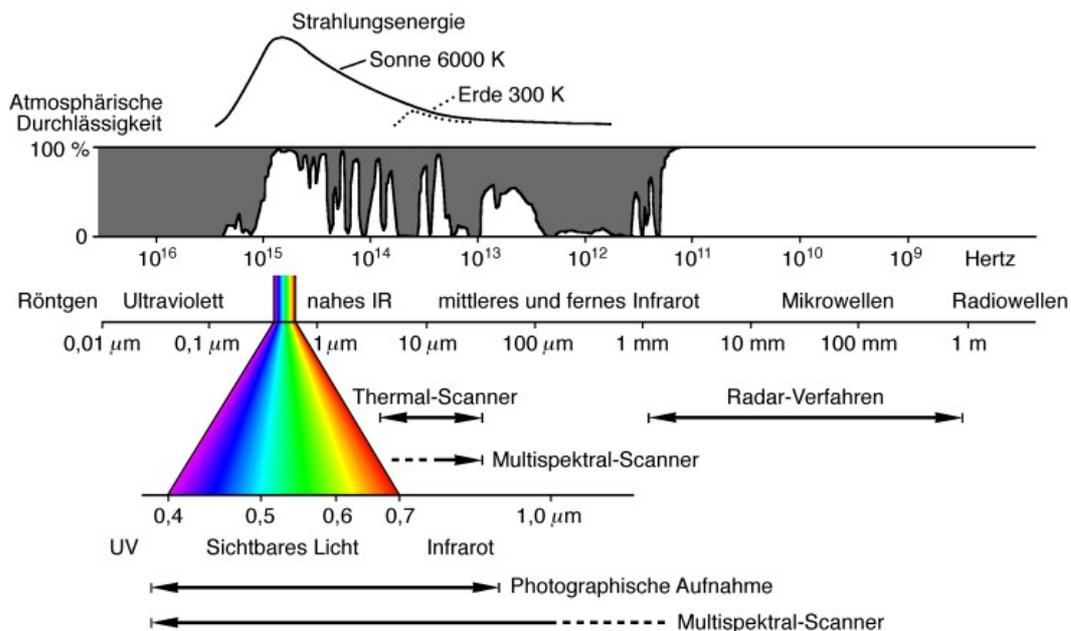


Abbildung 2.1: Elektromagnetisches Spektrum und die Bereiche verschiedener Sensoren (Albertz 2007).

Die Fernerkundung gibt uns die Möglichkeit, die Erde aus einem anderen Blickwinkel zu betrachten. Dieser differenzierte Blickwinkel beinhaltet oftmals wichtige zusätzliche Informationen, welche aus einer anderen Perspektive nicht hätten gewonnen werden können. Diese Perspektive erlaubt es uns, im grossen Umfang Dinge zu überblicken, Interaktionen und Trends zu erkennen und dient als nützliche Grundlage für das Interpolieren beziehungsweise Extrapolieren von aus erforschten Bodenstandorten bekannten Werten (Schott 2007). Im Bereich der Geomorphologie dient die Fernerkundung häufig als eine wichtige Grundlage zur Erhebung von Daten. Aufgrund der oftmals schwer zugänglichen Standorte sowie der räumlich grossflächigen Ausdehnung eignet sich die Fernerkundung für die Untersuchung von Gebirgslandschaften und den darin ablaufenden Prozessen, was aus einer Vielzahl von Studien ersichtlich wird (Abermann et al. 2010; Bühler et al. 2012; Käab et al. 2005).

2.1.1 Erhebungsmethoden

Folgend werden die gebräuchlichsten Erhebungsmethoden und ihre Eigenschaften thematisiert. Dabei ist zu beachten, dass die digitale Aufnahmetechnik stark an Bedeutung gewinnt, fotografische Verfahren weltweit jedoch noch in grossem Umfang angewendet werden. Die Aufnahmetechnik mittels Radarsystemen behält in der Fernerkundung aufgrund der Eigenschaften des aktiven Verfahrens sowie des verwendeten Spektralbereiches, welcher kaum von der Atmosphäre beeinflusst wird, einen speziellen Stellenwert. Daneben existieren weitere Fernerkundungssensoren, wie zum Beispiel abbildende Spektrometer, welche eine Vielzahl an engen Spektralkanälen besitzen und damit über weite Bereiche des elektromagnetischen Spektrums die Reflexionscharakteristik quasi kontinuierlich erfassen können, oder Laserscanner, welche punktweise durch aktives Aussenden von Laserstrahlen die Distanzen zur Geländeoberfläche messen (Albertz 2007). Die meisten Aufnahmetechniken werden Satelliten- oder Flugzeug gestützt verwendet, wobei UAS vorwiegend die digitale Aufnahmetechnik verwenden. Für eine vereinfachte Übersicht erfolgt hier eine Unterteilung in Satelliten-, Flugzeug- und UAS gestützte Erhebungsmethoden.

Satellitensysteme

Seit dem Start des ersten Erderkundungssatelliten Landsat 1 im Jahre 1972 haben Satellitensysteme zur Erdbeobachtung stark an Bedeutung gewonnen. Sie erlauben es, grossflächig und in regelmässigen zeitlichen Intervallen Daten und Informationen über die Beschaffenheit und Dynamik der Erdoberfläche und Atmosphäre zu erheben (Albertz 2007; Taubenböck 2015). Um praktisch die ganze Erdoberfläche beobachten zu können, werden für viele Erdbeobachtungssatelliten vom Satelliten aus kreisförmige, polnahe und sonnensynchrone (die Satelliten überqueren den Äquator stets zur gleichen Ortszeit) Umlaufbahnen gewählt. Die Sa-

tellitenbahn behält ihre Lage im Raum bei, aber durch die Erdrotation wandert die Erdoberfläche unter der Bahn hindurch. Die Bodenspuren der aufeinander folgenden Umläufe sind deshalb leicht gegeneinander versetzt. Die Bahnparameter sind so gewählt, dass nach und nach die gesamte Erdoberfläche aufgenommen werden kann und sich der Vorgang je nach Satellit nach circa ein bis drei Wochen wiederholt (Albertz 2007).

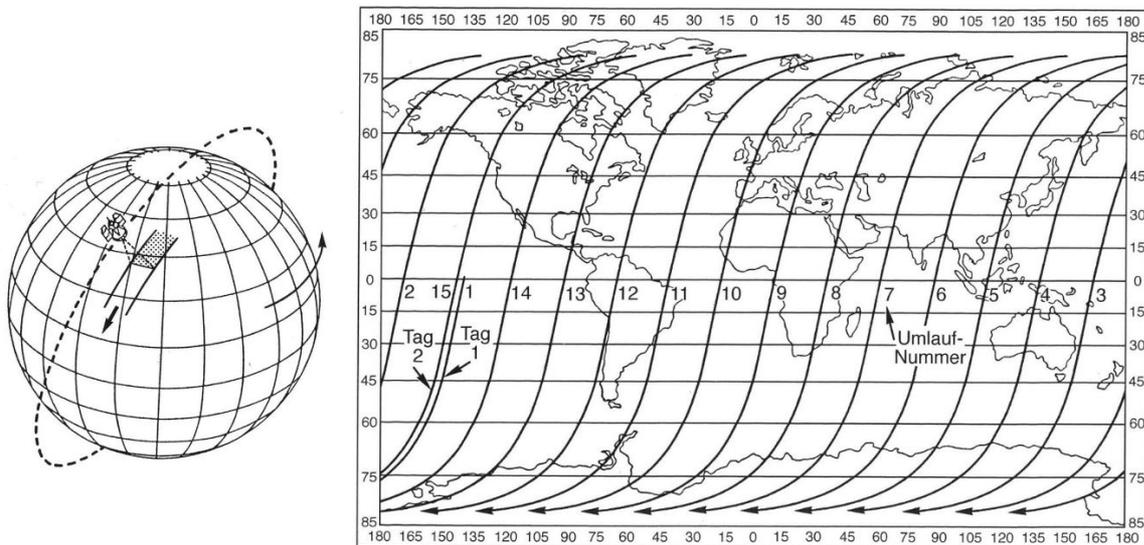


Abbildung 2.2: Umlaufbahn der Landsat-Satelliten. Sie umrunden die Erde 14 mal täglich. Dargestellt sind die auf der Tagseite verlaufenden Hälften der Bahnen. Nach 18 Tagen wiederholen sich die Bodenspuren (Albertz 2007).

Die meisten Erdbeobachtungssatelliten verfügen über eine multispektrale Auflösung von circa 10-30 Metern, hochauflösende Satelliten bis 3 Meter, wobei die panchromatische Auflösung sogar unter einem Meter liegen kann. Die Streifenbreite der Aufnahme einer Umlaufbahn liegt bei den meisten Erdbeobachtungssatelliten im Bereich von 100 Kilometern, wobei diese je nach Satellit stark variieren kann. Die Wiederholrate der gleichen Umlaufbahn beträgt je nach Satellit einige Tage bis mehrere Wochen, was heißt, dass ein Gebiet nur zu bestimmten Zeitpunkten beobachtet werden kann. Gleichzeitig müssen für passive Systeme die meteorologischen Bedingungen gegeben sein, so dass Wolkenbedeckung oder Dunst keine limitierende Faktoren bei der Datenerhebung darstellen. Zudem ist die Datenerhebung nur tagsüber möglich. Der Empfang, die Aufbereitung sowie der Vertrieb der Bilddaten ist primär die Sache der Satellitenbetreiber, welche häufig auch Eigentümer der Satelliten sind. Von Anfang an waren die Landsat Daten allgemein zugänglich. Diesem Beispiel folgten viele Satellitenmissionen, weshalb heutzutage Satellitendaten von jeder Person käuflich erworben wer-

den können. Angeboten werden Satellitenbilddaten in digitaler Form oder auch als fotografische Produkte. Dabei variieren die Preise sehr stark, da sie von einer Vielzahl Faktoren abhängig sind. Ältere Daten werden jedoch oft recht preiswert angeboten (Albertz 2007).

Flugzeugsysteme

Seit Anfang des 20. Jahrhunderts, mit der Entwicklung der Flugzeuge, hat sich das Luftbildwesen stark verbreitet. Insbesondere für militärische, forstliche, archäologische und geographische Zwecke sowie für grossräumige Erkundungen wurden Luftbilder eingesetzt. Für die topografische Kartierung wurde die Luftbildmessung zum Standardverfahren. Mittels Flugzeug gestützter Laserscanner und Radarsystemen (Radarinterferometrie) wurden weitere Möglichkeiten für die Erhebung von genauen topografischen Informationen geschaffen. Für die Erhebung der Daten sind oftmals die Landesvermessungsämter zuständig, welche auch über entsprechende Archive verfügen. Die Bildflüge selber werden meist durch private Firmen durchgeführt (Albertz 2007). In der Schweiz wird das Orthofotomosaik, welches aus einzelnen geometrisch korrigierten Farbluftbildern zusammengesetzt ist, alle drei Jahre nachgeführt. Es besitzt je nach Region eine Auflösung von 0.25, 0.5 oder 2.5 Metern und kann bei swisstopo erworben werden (swisstopo 2015a). Mittels Laserscanning erhobene Höheninformationen mit einer Auflösung von 2m für alle Gebiete der Schweiz unter 2000 Meter über Meer sind ebenfalls erhältlich (swisstopo 2015b). Über 2000 Meter über Meer sind Höheninformationen mit einer Auflösung von 25 Metern verfügbar (swisstopo 2015c).

Unmanned Aircraft Systems

Ende der 1970er wurden erstmals ferngesteuerte Kleinflugzeuge für Bildflüge benutzt (Przybilla und Wester-Ebbinghaus 1979). Es dauerte jedoch ein weiteres Vierteljahrhundert, bis 2005 das erste hoch aufgelöste digitale Höhenmodell durch einen autonom gesteuerten Minihelikopter entstand (Eisenbeiss et al. 2005). Mittlerweile gibt es eine Vielzahl von verschiedenen unbemannten Flugobjekten, welche unter dem englischen Begriff Unmanned Aircraft Systems (UAS) zusammengefasst werden (ICAO 2011). Darunter befinden sich unterschiedlichste Fluggeräte wie motorisierte Paragliders (Jütte 2008), Prallluftschiffe (Gomez-Lahoz und Gonzalez-Aguilera 2009), Fesseldrachen (Aber et al. 2002), Ballone (Fotinopoulos 2004) sowie Minihelikopter und Kleinflugzeuge, welche für zahlreiche Studien verwendet wurden (Niethammer et al. 2012; Immerzeel et al. 2014). Eine Einteilung gestaltet sich aufgrund der unterschiedlichen UAS-Typen schwierig. Die Grösse, das Gewicht, die Flugzeit oder Flughöhe sind gängige Kriterien. Weiter werden motorisierte und nicht motorisierte UAS unterschieden. Eine dritte Möglichkeit ist die Einteilung aufgrund der aerodynamischen Eigenschaften (Nex und Remondino 2014). Neuere Modelle von UAS führen neben einer Digitalkamera auch ein Global Positioning System (GPS) mit sich, welches zu jedem Luftbild die Lagedaten

des UAS erhebt. Fotogrammetrische Verfahren erlauben anschliessend die Generation von hoch aufgelösten Orthofotomosaiks und digitalen Höhenmodellen. Die Auflösung solcher Produkte ist abhängig von den Sensoreigenschaften der Kamera sowie der Flughöhe des UAS, liegt bei vielen Studien aber im Bereich von einigen Zentimetern (Immerzeel et al. 2014). Durch ihre flexible Anwendung sowie hohe räumliche und mögliche zeitliche Auflösung hat die Fernerkundung mittels UAS in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen (Niethammer et al. 2012).

2.1.2 Auswertung von Luft- und Satellitenbildern

Die systematische Auswertung von Luft- und Satellitenbildern kann in die geometrisch orientierte Fotogrammetrie sowie die inhaltlich orientierte Interpretation unterteilt werden. Wobei man unter Fotogrammetrie die Ausmessung der Bilder, zum Beispiel zur Herstellung von topografischen Karten, versteht. Die inhaltliche Interpretation dagegen befasst sich mit den Eigenschaften der Erdoberfläche sowie den darauf befindlichen Objekten, welche für die Geowissenschaften im weitesten Sinne von grosser Bedeutung sind (Albertz 2007).

Fotogrammetrie

Wie bereits erwähnt, befasst sich die Fotogrammetrie mit der Rekonstruktion von Lage und Form von Objekten aus Bildern, vorwiegend zur Herstellung von topographischen Karten und Orthofotokarten. Im folgenden soll von der Situation ausgegangen werden, dass mehrere digitale Luftbilder (Messbilder), bei welchen die Bildlage mittels GPS während des Fluges erhoben wurde, für eine fotogrammetrische Auswertung zur Verfügung stehen. Zur Rekonstruktion eines räumlichen Objekts benötigt man mindestens zwei Messbilder des jeweiligen Objektes. Sind innere und äussere Orientierung der Messbilder bekannt, kann mittels fotogrammetrischer Verfahren genaue räumliche Information gewonnen werden. Die innere Orientierung beschreibt dabei das Projektionszentrum $O(X_o, Y_o, Z_o)$ des räumlichen Strahlenbündels im Bezug zur Bildebene (vgl. Abb. 2.3) und wird üblicherweise vom Kamerahersteller im Labor bestimmt. Die äussere Orientierung beschreibt die Lage des Bildes im Objektkoordinatensystem. Sie kann bei Luftbildern mittels genauem GPS während der Bilderhebung bestimmt werden (Kraus 2004).

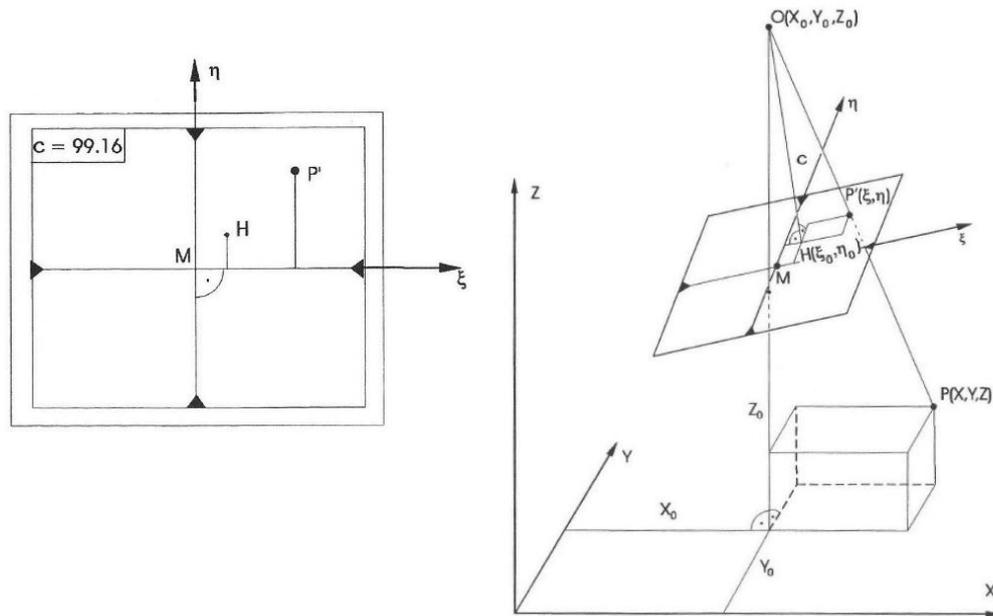


Abbildung 2.3: Bildebene (links) mit Bildmittelpunkt M, Bildhauptpunkt H und Objektpunkt P. Der Bildhauptpunkt und die Kamerakonstante c sind die Elemente der inneren Orientierung. Die Objektkoordinaten X_0 , Y_0 , Z_0 sowie die Drehung des Bildes um deren Achsen definieren die äussere Orientierung (Kraus 2004).

Für die Rekonstruktion von Lage und Raum eines Objektes werden durch ein Korrelationsverfahren gleiche Bildpunkte in mehreren Messbildern erkannt. Mittels Aerotriangulation können dabei den gefundenen Punkten Koordinaten des Objektkoordinatensystems, meist entspricht dies dem Landeskoordinatensystem, zugewiesen werden. Der Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten wird durch die Bündelblockausgleichung hergestellt, welche in diesem Fall die Strahlenbündel der Messbilder sowie die GPS-Daten gemeinsam verarbeitet (vgl. Abb. 2.4) (Kraus 2004).

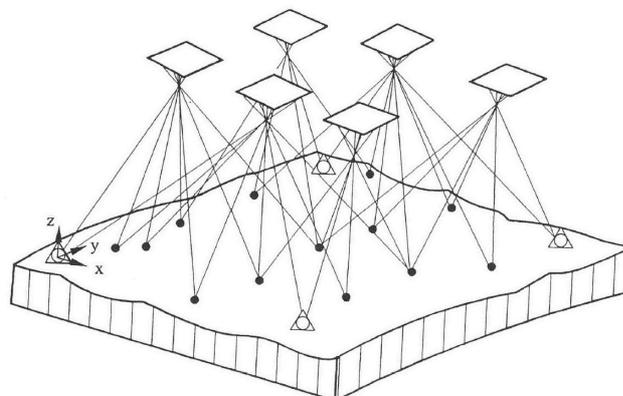


Abbildung 2.4: Grundprinzip der Bündelblockausgleichung (Kraus 2004).

Voraussetzung für eine erfolgreiche Triangulation ist die genügende Überlappung der einzelnen Messbilder sowie eine ausreichende heterogene Struktur der Geländeoberfläche zur Erkennung gleicher Bildpunkte in unterschiedlichen Messbildern. Sich schnell bewegende oder verändernde Objekte können zudem nicht erfasst werden und stören das Ergebnis. Heutzutage verläuft der gesamte Prozess der Aerotriangulation mehrheitlich automatisch mittels geeigneter Softwareprodukte (Kraus 2004). Weitere Informationen bezüglich fotogrammetrischer Auswertungsverfahren sind beispielsweise in Kraus (2004) zu finden.

Inhaltliche Interpretation

Luft- und Satellitenbilder können visuell wie auch digital ausgewertet und für die inhaltliche Interpretation verwendet werden. Bei der visuellen Auswertung wird von der menschlichen Fähigkeit Gebrauch gemacht Bildinhalte wahrzunehmen, sich bewusst zu machen und daraus Schlüsse zu ziehen. Die digitale Auswertung erlaubt dagegen die Verwendung der vielfältigen Möglichkeiten der rechnerischen Verarbeitung der Informationen, welche in Bilddaten vorliegen. Ein Beispiel dazu wäre die oft angewendete Klassierung von Objektklassen wie Boden, Vegetation und Wasser aufgrund ihrer unterschiedlicher spektralen Eigenschaften (Albertz 2007).

2.1.3 Digitale Höhenmodelle

Digitale Höhenmodelle (DHM) werden grundsätzlich in digitale Oberflächenmodelle (DOM) und digitale Terrainmodelle (DTM) eingeteilt (Bühler et al. 2012). Während digitale Oberflächenmodelle auch Objekte, welche sich auf dem Terrain befinden (Bäume, Häuser usw.) wiedergeben, können diese durch geeignete Filter entfernt und so digitale Terrainmodelle erstellt werden, in welchen die reine Geländeoberfläche enthalten ist. Für diese Arbeit ist zu beachten, dass ein digitales Oberflächenmodell in periglazialer Umgebung aufgrund fehlender künstlicher Objekte (Häuser etc.) und vernachlässigbarer niedriger Vegetation bereits einem digitalen Terrainmodell entspricht. Einzig schneebedeckte Gebiete entsprechen dieser Annahme nicht, da sie von Jahr zu Jahr variieren und nicht die Geländeoberfläche wiedergeben. Daher werden diese in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Wenn nicht anders erwähnt, wird in dieser Arbeit daher der Ausdruck der digitalen Höhenmodelle verwendet. Meist wird für digitale Höhenmodelle ein regelmässiges Gitterraster angestrebt, welches zu jedem Pixel einen Höhenwert liefert. Zur Herstellung von digitalen Höhenmodellen eignen sich neben fotogrammetrischen Verfahren auch anderen Fernerkundungsverfahren wie Laserscanning oder Radarverfahren (Albertz 2007). Im Gegensatz zu den anderen Verfahren erlaubt aber der fotogrammetrischer Ansatz neben dem Generieren von Höheninformationen auch die Bildinterpretation, was ein wesentlicher Vorteil sein kann (Kääb et al. 2005). Digitale

Höhenmodelle werden für viele Anwendungen wie Terraincharakterisierung (Hangneigung, Exposition, Krümmung), dem Berechnen geophysikalischer Parameter (Einstrahlungsstärke, potenzielle Erosion) oder der Orthorektifizierung und radiometrischen Korrektur von Fernerkundungsdaten verwendet. Zudem sind digitale Höhenmodelle oftmals Grundlage für das numerische Modellieren von Massenbewegungsprozessen sowie für hydrologische Modellierungen. Für viele dieser Anwendungen sind genaue und hoch aufgelöste digitale Höhenmodelle notwendig (Bühler et al. 2012). Die Genauigkeit von digitalen Höhenmodellen kann jedoch aus mehreren Gründen beeinträchtigt werden: Filtermechanismen können fehlerhaft, Geländeoberflächen für fotogrammetrische Verfahren zu homogen oder ungünstig beleuchtet sein, komplexe Topografie kann Schattierungen verursachen, Lageungenauigkeit verursacht Höhenfehler in steilem Gelände und Laserstrahlen werden nicht immer direkt reflektiert. Zudem nimmt mit zunehmender Hangneigung die Genauigkeit von digitalen Höhenmodellen tendenziell ab, was insbesondere in Gebirgslandschaften ein wichtiger Faktor sein kann. Die Genauigkeit der jeweiligen digitalen Höhenmodelle zu kennen ist daher von grosser Wichtigkeit, da diese die Anwendbarkeit und Interpretation stark beeinflusst (Höhle und Höhle 2009; Käab 2000; Müller et al. 2014).

2.2 Beurteilung der Genauigkeit digitaler Höhenmodelle

Wie aus Kapitel 2.1.3 ersichtlich wird, ist bei der Arbeit mit digitalen Höhenmodellen das Kennen der Genauigkeit für aussagekräftige Resultate vonnöten. Die Genauigkeit selber wird durch verschiedenste Faktoren beeinflusst (vgl. Kapitel 2.1.3). In der Fernerkundung unterscheidet man grundsätzlich zwei Arten von Genauigkeit: Die Positionsgenauigkeit beschreibt, wie genau ein Objekt in einem Koordinatensystem liegt und die thematische Genauigkeit gibt wieder, ob ein Objekt auf einer Karte richtig erkannt und beschriftet wurde; nämlich als das, was es in der Realität ist (Congalton und Green 2009). Zur Beurteilung von digitalen Höhenmodellen betrachten wir die Positionsgenauigkeit, genauer gesagt nur die Höhenkomponente (Z-Wert), was heisst, dass man davon ausgeht, dass die horizontale Genauigkeit (X- und Y-Werte) ausreichend genau ist. Dieses Unterkapitel soll nun einen Einblick in die Auswertung von Messungen sowie die Beurteilung der Genauigkeit digitaler Höhenmodelle geben.

2.2.1 Auswertung von Messungen

In der Vermessung entspricht eine Messung der Bestimmung einer Messgrösse an einem Messobjekt im Verhältnis zur entsprechenden Masseinheit. Das Messergebnis ist ein aus den Messwerten ermittelter Schätzwert für den wahren unbekanntem Wert der Messgrösse. Auf-

grund der Unvollkommenheit der Messgeräte, der Bedingungen des Messraumes sowie der Herangehensweise des Beobachters gelingt es trotz grösster Sorgfalt nicht, den wahren Wert einer gesuchten Grösse durch Messungen zu bestimmen. Alle Messungen sind daher mit Messfehlern behaftet, welche man in drei Arten unterteilen kann (Möser 2012):

- **Grobe Fehler** liegen dann vor, wenn die Abweichung des Messwerts wesentlich grösser ist, als zu erwarten war. Sie stehen nicht im Zusammenhang mit der Messgenauigkeit und können durch Messkontrollen vermieden werden.
- **Systematische Fehler** beeinflussen das Messergebnis immer mit gleichem Vorzeichen und können durch geeignete Messanordnung, kalibrierte Messgeräte sowie korrigierte Messwerte eliminiert werden.
- **Zufällige Fehler** sind dann noch vorhanden, wenn das Messergebnis von groben und systematischen Fehlern befreit ist. Da sie sowohl mit positivem als auch negativem Vorzeichen auftreten, kann deren Einfluss durch Wiederholungsmessungen und Mittelbildung minimiert werden.

Da der wahre Wert einer Messgrösse unbekannt ist, so lange er nicht aus theoretischen Überlegungen hergeleitet werden kann, ist das Messergebnis ein Schätzwert des wahren Wertes. Durch Wiederholung der Messung kann aus dem arithmetischen Mittel der einzelnen Messungen ein neuer, meist genauerer Schätzwert bestimmt werden. Aufgrund der zufälligen Fehler unterscheiden sich die einzelnen Messungen leicht und führen zu einer Streuung um deren Mittelwert. Je kleiner die Streuung um den Mittelwert, desto präziser ist die Messung. Ein Mass für die Streuung bietet die empirische Standardabweichung. Je näher der Mittelwert beim wahren Wert liegt, desto genauer ist die Messung. Da der wahre Wert jedoch meist nicht bekannt ist, sollte der Begriff der Messgenauigkeit bei Genauigkeitsangaben vermieden werden. Anstelle dessen hat sich der Begriff der Messunsicherheit zur Beurteilung der Messgenauigkeit allgemein durchgesetzt. Ein Messergebnis y wird so als Produkt des Mittelwerts \bar{x} mit Angabe einer unteren und oberen Grenze für das dazugehörige Konfidenzintervall in der Form $y = \bar{x} \pm u$ angegeben. Die Messunsicherheit u entspricht dabei der Differenz zwischen oberer beziehungsweise unterer Intervallgrenze und dem Mittelwert und bedeutet, dass der wahre Wert zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, meist 95%, innerhalb des angegebenen Bereiches liegt (Möser 2012).

2.2.2 Auswertung digitaler Höhenmodelle

Um aussagekräftige Schlüsse aus digitalen Höhenmodellen ziehen zu können, sollten diese ausreichend genau sein oder man sollte zumindest deren Genauigkeit kennen. Oftmals kann eine Auswertung bezüglich der Genauigkeit auch aufschlussreiche Informationen über Art und Ursprung von Fehlern liefern und so zur Verbesserung des Produktes führen. Auch für Analysen, Vergleiche mit anderen Erhebungstechniken oder bei der Entscheidungsunterstützung werden Angaben zur Genauigkeit häufig verlangt. Es gibt kein allgemeingültiger Vorgang, die Genauigkeit auszuwerten, jedoch kann der gesamte Prozess in folgende drei Teilbereiche unterteilt werden: Planung der Datenerhebung, Datenerhebung und Analyse der Resultate (Congalton und Green 2009). Dies gilt sowohl für die Daten, welche ausgewertet werden sollen wie auch für die Referenzdaten. Referenzdaten liegen meist in Form von einzelnen, sogenannten Kontrollpunkten vor, welche von höherer Genauigkeit sind. Dabei sollte die Genauigkeit der Referenzdaten mindestens dreimal höher als die der auszuwertenden Daten sein (Höhle und Höhle 2009; Maune 2007). Bei der Planung der Datenerhebung sollte darauf geachtet werden, dass die Kontrollpunkte zufällig über das Untersuchungsgebiet verteilt sind, repräsentative Standorte vertreten und ihre Anzahl der Grösse des Untersuchungsgebiets entspricht (Höhle und Höhle 2009). Zudem sollte bei der Datenerhebung der zeitliche Abstand zwischen Erhebung der Test- und Referenzdaten möglichst klein und die Umweltbedingungen möglichst gleich sein (Maune 2007). Für die Beurteilung der Genauigkeit wird jeweils die Höhendifferenz Δz zwischen Test- und Referenzdaten betrachtet. Dabei wird angenommen, dass die Referenzdaten den wahren Höhenwert wiedergegeben (Congalton und Green 2009). Zur Analyse der Resultate werden die Δz Werte mit geeigneten statistischen Messgrößen beschrieben. Sind die Δz Werte normalverteilt und liegen keine Ausreisser vor, reichen folgende Messgrößen zur Beurteilung der Genauigkeit (Höhle und Höhle 2009):

Root mean square error	$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta z_i^2}$
Mittlerer Fehler	$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta z_i$
Standardabweichung	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta z_i - \hat{\mu})^2}$

Tabelle 1: Messgrößen zur Beurteilung der Genauigkeit bei gegebener Normalverteilung.

Dabei beschreibt Δz_i die Differenz zwischen Test- und Referenzdaten für einen Punkt i und n die Anzahl der getesteten Punkte. Die Normalverteilung der Differenzen Δz_i ist jedoch aufgrund von Fehlern beispielsweise durch Filterung oder Interpolation selten gegeben und oft verfälschen Ausreisser das Resultat (Höhle und Höhle 2009). Eine Möglichkeit Ausreisser zu eliminieren ist die Wahl eines Grenzwertes, welcher alle Δz_i als Ausreisser identifiziert, deren Betrag grösser als der gewählte Grenzwert ist. Gängige Grenzwerte sind $3 \cdot \text{RMSE}$ (Höhle und Potuckova 2006) oder $3 \cdot \sigma$ (Maune 2007). Trotz dieser Massnahmen können nicht alle Ausreisser identifiziert und eliminiert werden, was zu einer Verfälschung der statistischen Messgrössen führt. Um trotzdem digitale Höhenmodelle, welche mit Ausreisser behaftet und deren Höhendifferenzen zu einem Referenzdatensatz nicht normalverteilt sind, auswerten zu können, werden statistisch robuste Messgrössen verwendet, welche Ausreisser weniger stark gewichten und keine Normalverteilung voraussetzen (Höhle und Potuckova 2006). Tabelle 2 gibt eine Übersicht der verwendeten Messgrössen:

Messgrösse	Schreibweise
Median (50% Quantil)	$\hat{Q}_{\Delta z}(0.5) = m_{\Delta z}$
Normalized median absolut deviation	$\text{NMAD} = 1.4826 * \text{median}_j (\Delta z_j - m_{\Delta z})$
68.3% Quantil	$\hat{Q}_{ \Delta z }(0.683)$
95% Quantil	$\hat{Q}_{ \Delta z }(0.95)$

Tabelle 2: Verwendete Robuste Messgrössen

Die Quantile beschreiben den Prozentsatz an Werten, welche am nächsten beim wahren Wert beziehungsweise Referenzwert liegen und geben dabei die maximale vorgefundene Höhendifferenz Δz wieder. Beim 95% Quantil befinden sich also 95% der Höhendifferenzen zwischen Null und dem angegebenen Wert. Die Verteilung der Werte beeinflusst das Ergebnis nicht, wie auch die restlichen 5% keinen Einfluss auf das Ergebnis haben. Der NMAD entspricht der absoluten Abweichung des normalisierten Medians und kann als eine Schätzung der Standardabweichung angesehen werden, ist jedoch resistenter gegen Ausreisser (Höhle und Höhle 2009). Weiter ist zu beachten, dass zur Beschreibung der Genauigkeit von digitalen Höhenmodellen oftmals nur ein Parameter verwendet wird. Da dieser aber signifikant mit Geländeeigenschaften korrelieren kann, sollte stets die räumliche Verteilung der Fehler in Betracht gezogen werden (Kraus et al. 2006). In der vorliegenden Arbeit werden digitale Höhenmodelle des Blockgletschers Muragl ausgewertet. Um zu verstehen, was die Höhenmodelle wiedergeben, folgt im nächsten Abschnitt die Thematisierung der Blockgletscher.

2.3 Blockgletscher

Alpiner Permafrost wurde bis vor wenigen Jahrzehnten noch nicht allgemein als Phänomen des periglazialen Raumes anerkannt (Barsch 1992). Heutzutage sind die Erscheinungsformen besser untersucht und deren Wichtigkeit in Bezug zur klimatischen Veränderung wurde erkannt (Haerberli et al. 2006; Haerberli et al. 2007). Blockgletscher als ein typisches Element des alpinen Permafrostes werden hier vorgestellt.

2.3.1 Definitionen

Als Permafrost wird ein Boden verstanden, dessen Temperatur für mindestens zwei aufeinander folgende Jahre unter 0° C liegt. Dabei schliesst die Definition a priori gewisse Eisformen wie zum Beispiel Gletscher aus (Dobinski 2011). Solche Bedingungen ermöglichen die Bildung und Konservierung typischer periglazialer Erscheinungsformen (Haerberli et al. 2006), wobei Blockgletscher ein extremes Beispiel von kriechendem Permafrost darstellen (French 2007).

Blockgletscher sind gelappte oder zungenförmige Körper, welche aus gefrorenem Schutt mit eingeschlossenem Eis oder Eislinsen bestehen und sich hangabwärts oder talwärts durch die Verformung des beinhalteten Eises bewegen (French 2007).

Über die genaue Definition, was ein Blockgletscher ist, wurde lange Zeit diskutiert. Das Spektrum reichte dabei von Schutt bedeckten Gletschern bis hin zu kriechenden, gefrorenen, eisreichen Schutthalden in nicht vergletscherten Berghängen, wobei letzteres auf die oben genannte Definition zutrifft. Nicht immer kann jedoch genau zwischen den einzelnen Eisformen unterschieden werden da oft komplexe Mischformen vorliegen. In solchen Fällen sind enge Definitionen irreführend und sollten durch ein flexibles Konzept ersetzt werden, welches für jeden einzelnen Fall das vorhandene Material, die thermalen Bedingungen sowie die Zeitperiode und räumliche Skala miteinbezieht (Haerberli et al. 2006).

2.3.2 Eigenschaften von Blockgletscher

Entstehung

Blockgletscher können in den meisten Hochgebirgen der Welt vorgefunden werden. Die Grundbedingungen sind ausreichender Eintrag von Schutt sowie Permafrost-Bedingungen (French 2007). Grossskalig betrachtet reicht dafür eine mittlere jährliche Lufttemperatur von unter -1°C bis -2°C sowie ein Niederschlag von weniger als 2500 Millimetern (Haerberli 1985). Jedoch sind auf lokaler Ebene die topographischen und meteorologischen Bedingungen, wel-

che zur Entstehung und zum Wachstum der Blockgletscher führen, noch nicht im Detail bekannt (Humlum 2000). Blockgletscher befinden sich üblicherweise am Fusse von Felswänden oder unterhalb von Moränen. Dabei wird zwischen gelappten und zungenförmigen Blockgletschern, aufgrund ihres Länge-Breite-Verhältnis, unterschieden (Barsch 1996). Obwohl mehrere Einteilungsmöglichkeiten existieren (Barsch 1996) und die Vorgänge bei der Entstehung von Blockgletschern nicht vollständig bekannt sind (Humlum 2000), soll hier die Entstehung von Blockgletschern nach Kääh (2013) dargestellt werden (vgl. Abb. 2.5). Die Abbildungen zeigen die Entwicklung einer ganzjährig gefrorenen Schutthalde (Talus) zu einem Protalus Rampart und schliesslich zu einem Blockgletscher. Entlang des Talus werden die einzelnen Geröllstücke aufgrund gravitativer Prozesse der Grösse nach sortiert (Szene 1). Durch den hohen Feinanteil im oberen Bereich entsteht eine Eisübersättigung, im unteren Bereich aufgrund des gröberen Materials jedoch weniger. Die Kriechgeschwindigkeit ist daher im oberen Bereich höher als im tieferen (Szene 2). Gleichzeitig lagert sich eingetragenes Geröll auf dem entstandenen Protalus Rampart ab und wird durch das Kriechen des Permafrostes talwärts transportiert. Dort fallen die Blöcke vor die Front des entstandenen Blockgletschers, der sich über die Blöcke bewegt und sie so seiner basalen Schicht hinzufügt (Szene 3). Im steilen Gelände gelangen die Blöcke nicht mehr unter den Blockgletscher, sondern werden direkt talwärts abgelagert (Szene 4).

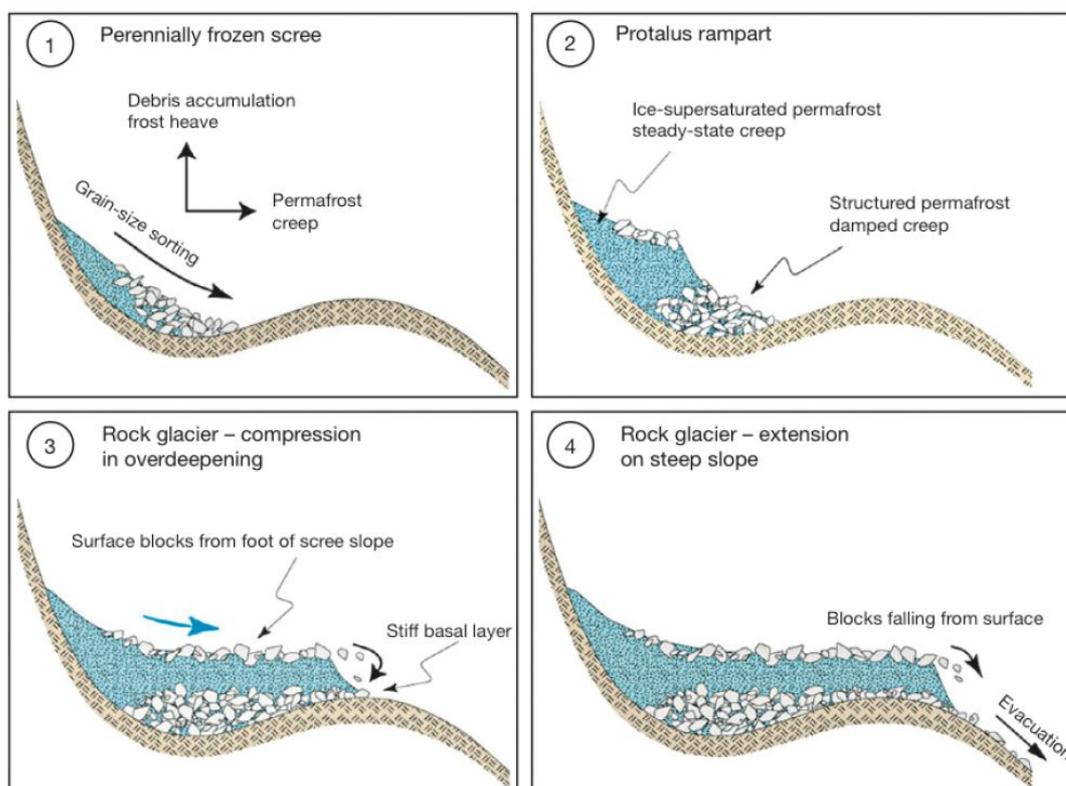


Abbildung 2.5: Entstehungsschritte eines Blockgletschers (Kääh 2013)

Form

Die Länge, gemessen entlang der Fließrichtung, die Breite, rechtwinklig zur Fließrichtung gemessen und die Mächtigkeit an der Front sind übliche Parameter zur Beschreibung der Form eines Blockgletschers. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Hangneigung der Front des Blockgletschers. Weitere Parameter wie die maximale Mächtigkeit oder die Fläche des Grundrisses wie auch die Größe des Einzugsgebietes sind nützliche Parameter, verlangen aber aufwendigere geophysikalische und geodätische Untersuchungen (Barsch 1996). Die Form von Blockgletschern kann sehr unterschiedlich sein. Ihre typische Länge und Breite reicht von 200-800 Metern, die Mächtigkeit der Front reicht von 10-20 Metern, kann jedoch auch bis 100 Meter betragen. Die maximale Steigung eines Blockgletschers kann über 35° betragen, was mehr als der Steigung entspricht, welche das gleiche, jedoch nicht gefrorene Material in einer Schutthalde annehmen würde. Die Oberfläche von Blockgletschern ist mit groben Blöcken von 0.2-5 Metern versehen und bildet oftmals 1-5 Meter hohe wellenartige Fließformen, welche sich quer zur Fließrichtung bilden (vgl. Abb. 2.6) (Barsch 1996; Humlum 2000).



Abbildung 2.6: Blockgletscher im Val da l'Acqua. Bild: Wikimedia Commons

Fliessgeschwindigkeit

Typische Blockgletscher bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von 0.1-1 Metern pro Jahr (Barsch 1992). Auf einer jährlichen Skala betrachtet, variieren die Geschwindigkeiten jedoch erheblich (Wirz et al. 2015). Sie sind im Wesentlichen abhängig von den meteorologischen und klimatischen Bedingungen, wobei die Lufttemperatur als Hauptfaktor angesehen werden kann, welcher die Fliessgeschwindigkeit von Blockgletschern beeinflusst (Kääb et al. 2007). Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die jährliche Interaktion zwischen Blockgletscher und Umweltbedingungen komplex ist und die Fliessgeschwindigkeit von Blockgletschern nicht nur mit einzelnen Parametern korreliert werden kann (Roer 2005; Wirz et al. 2015). Über längere Zeiträume hinweg betrachtet ist die Fliessgeschwindigkeit wesentlich von Randbedingungen wie der Verfügbarkeit von Ausgangsmaterial (Eis und Schutt), der Veränderung des Klimas sowie topografischen Änderungen beeinflusst (Barsch 1996; Kääb et al. 2007).

Aktive, inaktive und fossile Blockgletscher

Nach Aktivität der Blockgletscher können drei verschiedene Typen unterschieden werden: aktive, inaktive und fossile Blockgletscher (Barsch 1996). Aktive Blockgletscher entsprechen der Definition, welche in Abschnitt 2.3.1 zu finden ist und wurden in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben. Inaktive besitzen im Vergleich zu aktiven Blockgletscher keine Fliessgeschwindigkeit mehr, obwohl sie noch gefrorenes Material enthalten. Ist der Eisanteil jedoch aufgrund von Schmelzprozessen zu gering, verliert der Blockgletscher die Fähigkeit zu kriechen. Aber auch in Gebieten mit kontinuierlichem Permafrost können Blockgletscher inaktiv werden, wenn sie aufgrund ihrer Länge so weit vom Einzugsgebiet entfernt sind, dass die Tangentialspannung aufgrund der Steigung, die Mächtigkeit der Ablagerungen, die Schüttdichte usw. unter das erforderliche Niveau für eine Deformation fällt. Dies kann beispielsweise durch einen verminderten Schutt- oder Eiseintrag geschehen und ist nicht direkt klimatisch bedingt. Fossile Blockgletscher schlussendlich sind ehemalige Blockgletscher, bei welchen alles Eis geschmolzen ist. Die Oberfläche kollabiert an mehreren Stellen und weist entsprechende Strukturen auf (Barsch 1996). Während aktive Blockgletscher aufgrund ihrer Bewegung und den vorhandenen klimatischen Bedingungen praktisch frei von Vegetation sind, erlauben inaktive Blockgletscher die Entwicklung von Vegetation, welche sich bei fossilen Blockgletschern etablieren kann (Burga et al. 2004).

2.4 Deformationsanalyse von Blockgletschern

In den letzten Jahren konnte für viele Blockgletscher eine Beschleunigung der Fließgeschwindigkeiten festgestellt werden, welche mit einem Temperaturanstieg korrelierte (Roer et al. 2008). Da Blockgletscher mit ihrer Umwelt interagieren, ist deren Verhalten ein wichtiger Faktor zur Einschätzung der geomorphologischen Situation, auch im Hinblick auf die Gefahrensituation (Roer et al. 2008). Der Zeitpunkt der Beschleunigung erlaubt es, potentielle Steuerungsfaktoren der Bewegungen wie die Schneeschmelze oder die Bodentemperatur zu identifizieren und für Modellierungen zu verwenden (Roer et al. 2008; Wirz et al. 2015). Eine simple und effiziente Art, Bewegungen zu studieren ist die Beobachtung von Oberflächenverschiebungen (Wirz et al. 2015). Dabei ist oftmals zwischen Methoden zu wählen, welche grossflächige Abdeckung bei geringer zeitlicher Auflösung (Kääb und Vollmer 2000) oder punktuelle Daten bei hoher zeitlicher Auflösung (Wirz et al. 2015) liefern.

2.4.1 Dreidimensionale Oberflächenverschiebung

Dreidimensionale Oberflächenverschiebungen sind das Resultat zahlreicher Prozesse, welche sich rund um einen Blockgletscher abspielen können:

- Verformung aufgrund von Permafrost (Kriechen)
- Sedimentakkumulation oder Evakuierung
- Dreidimensionale Deformation aufgrund von Verdichtung und Ausweitung
- Höhenänderungen aufgrund von Frosthebung oder Schmelzprozessen

Dabei treten die Prozesse in unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Skalen auf (Kääb et al. 1997; Kääb und Vollmer 2000). Die Untersuchung der dreidimensionalen Oberflächenverschiebung erlaubt daher ein besseres Verständnis der involvierten physikalischen Prozesse (Kääb et al. 1997). Für eine erfolgreiche Untersuchung sind flächendeckende Informationen bezüglich der Bewegungsraten notwendig. Dabei sollten die Informationen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung und über einen längeren Zeitabschnitt hinweg erhoben worden sein, um eine ausreichend hohe Genauigkeit und damit Aussagekraft der Untersuchung zu erlangen (Kääb und Vollmer 2000).

2.4.2 Erhebung und Berechnung

Um dreidimensionale Oberflächenverschiebungen berechnen zu können werden digitale Höhenmodelle - genauer gesagt digitale Oberflächenmodelle - des gleichen Gebietes, jedoch von unterschiedlichen Zeiten, miteinander verglichen. Im Prinzip eignen sich daher alle Methoden zur Generierung von Höhendaten. Im Vergleich zur punktuellen Erhebung bringen flächendeckende Methoden den Vorteil mit sich, räumliche Muster erkennen zu können, sind jedoch oftmals aufgrund der aufwendigeren Erhebung in nur niedriger zeitlicher Auflösung vorhanden (vgl. Abschnitt 2.1.2 und 2.4.1). Die Erhebung mittels Flugzeug gestützter Fotogrammetrie hat sich dabei in zahlreichen Studien als ein nützliches Werkzeug erwiesen, um langsame Veränderungen im alpinen Permafrost zu untersuchen (Kääb und Vollmer 2000). Zur einfachen Berechnung von dreidimensionalen Verschiebungen betrachtet man zuerst die horizontale Verschiebung. Diese kann mittels geeigneter Softwareprodukte berechnet werden (vgl. Abschnitt 5.5.1). Die vertikale Komponente kann anschliessend anhand der beiden digitalen Höhenmodelle berechnet werden. Dabei wird der Höhenwert der Anfangskoordinate der Verschiebung aus dem älteren Höhenmodell vom Höhenwert der Endkoordinate der Verschiebung des jüngeren Höhenmodells abgezogen. Somit sind die Verschiebungsvektoren in X, Y und Z-Richtung bekannt. Ebenfalls nützliche Informationen liefert die vertikale Höhendifferenz zweier zu unterschiedlichen Zeitpunkten erhobenen Höhenmodelle (Kääb und Vollmer 2000). Digitale Höhenmodelle, welche zu unterschiedlichen Zeitpunkten oder durch verschiedene Methoden erhoben wurden, müssen dabei stets auf ihre Genauigkeit hin untersucht und mögliche Fehler korrigiert werden. Nur wenn die beiden Höhenmodelle in stabilem Gelände deckungsgleich sind, kann eine Berechnung der dreidimensionalen Oberflächenverschiebungen des dynamischen Objektes vorgenommen werden (Nuth und Kääb 2011; Kääb und Vollmer 2000). Um dies zu garantieren, wird meist das ältere Höhenmodell auf das neuere abgestimmt. Dabei kann zum Beispiel durch eine Kreuzkorrelation ein stabiles Element des neueren Höhenmodells im älteren gefunden werden. Anschliessend können die Koordinaten des Elements im alten Höhenmodell durch eine Helmert Transformation in die Koordinaten des neuen Höhenmodells umgewandelt werden. Dabei wird das ältere Höhenmodell skaliert, in X, Y und Z-Richtung verschoben und um die Z-Achse gedreht (Rotation). Dieser Prozess wird als Koregistrierung bezeichnet (Kääb und Vollmer 2000; Möser 2012; Nuth und Kääb 2011).

3 Forschungsfragen

Die Fernerkundung dient der Erforschung von Gebirgsformen und Prozessen seit langer Zeit. In den letzten Jahren wurden UAS zur Untersuchung dieser Räume vermehrt verwendet und etablieren sich in der wissenschaftlichen Gesellschaft als Datenerhebungsmethode, was in zahlreichen neueren Studien beobachtet werden kann. Obwohl UAS bei der Untersuchung von periglazialen Umgebungen ein grosses Potential zugeschrieben werden, sind sie im Hinblick auf ihre Genauigkeit und Anwendbarkeit noch wenig erforscht. In dieser Arbeit wird an diesem Punkt angesetzt und für einen bestimmten UAS-Typ die zu erwartenden Genauigkeiten sowie die Anwendbarkeit in periglazialer Umgebung untersucht. Daher werden in dieser Arbeit folgende Forschungsfragen gestellt:

- Welche Genauigkeiten ergeben sich für UAS prozessierte digitale Höhenmodelle relativ zu anderen Höhenmodellen im hochalpinen Gelände und welches sind die Fehlerquellen, die zu Ungenauigkeiten in digitalen Höhenmodellen führen, wie kommen sie zustande und wie sind die Fehler räumlich verteilt?

Diese Frage wird anhand einer Beurteilung der Genauigkeit durch Referenzdaten beantwortet. Dabei wird nach dem Schema, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, vorgegangen.

- Inwiefern eignen sich UAS zur Untersuchung von alpinem Gelände beziehungsweise des Blockgletschers Muragl und welche konkreten Erkenntnisse können daraus gewonnen werden?

Für diese Frage wird der Blockgletscher mittels den erhobenen digitalen Höhenmodellen untersucht und eine Deformationsanalyse stellt die dreidimensionalen Veränderungen über ein Jahr hinweg dar. Dabei werden auch die Erfahrungen im Feld mit einbezogen, um die Eignung von UAS für solche Anwendungen zu thematisieren.

- Was sind spezifische Vor- und Nachteile von UAS gegenüber anderen Methoden der Fernerkundung zur Generierung von digitalen Höhenmodellen im hochalpinen Raum und wie sieht eine möglich zukünftige Entwicklung in diesem Bereich aus?

Der Vergleich mit anderen Methoden, welche in Studien beschrieben werden, soll hier die Vor- und Nachteile von UAS aufzeigen. Ein Blick in die mögliche Zukunft von UAS rundet dabei den Vergleich ab.

4 Untersuchungsgebiet

Während in den vorhergehenden Kapiteln allgemeine Informationen bezüglich Blockgletschern dargelegt wurden, liegt in diesem Kapitel der Schwerpunkt auf dem Blockgletscher Muragl und seiner Umgebung sowie der geomorphologischen und meteorologischen Situation.

4.1 Oberengadin und Val Muragl

Im Südosten der Schweiz gelegen, als Teil des Kanton Graubündens, befindet sich das Oberengadin (vgl. Abb. 4.1). Durch seine Seen, hohen Berge und Orte wie St. Moritz, ist das Oberengadin eine weltweit bekannte und touristisch attraktive Destination. Oberhalb von Pontresina befindet sich das Val Muragl, welches durch spektakuläre Landschaftsformen eines der meistbesuchten Hochgebirgstäler im Oberengadin bildet. Diese Landschaftsformen, welche durch Permafrost und glaziale Prozesse gekennzeichnet sind, erlauben ein besseres Verständnis der Landschaftsentwicklung der letzten 20'000 Jahre. Die gute Erschliessung sowie das Vorfinden dieser schön entwickelten Landschaftsformen auf engstem Raum machen das Val Muragl zu einem wertvollen Gut, sei es als Untersuchungsgebiet für Geowissenschaftler oder als Wandergebiet für Touristen, welche an der Landschaftsentwicklung und den vorhandenen Landschaftsformen interessiert sind (M. Maisch et al.).

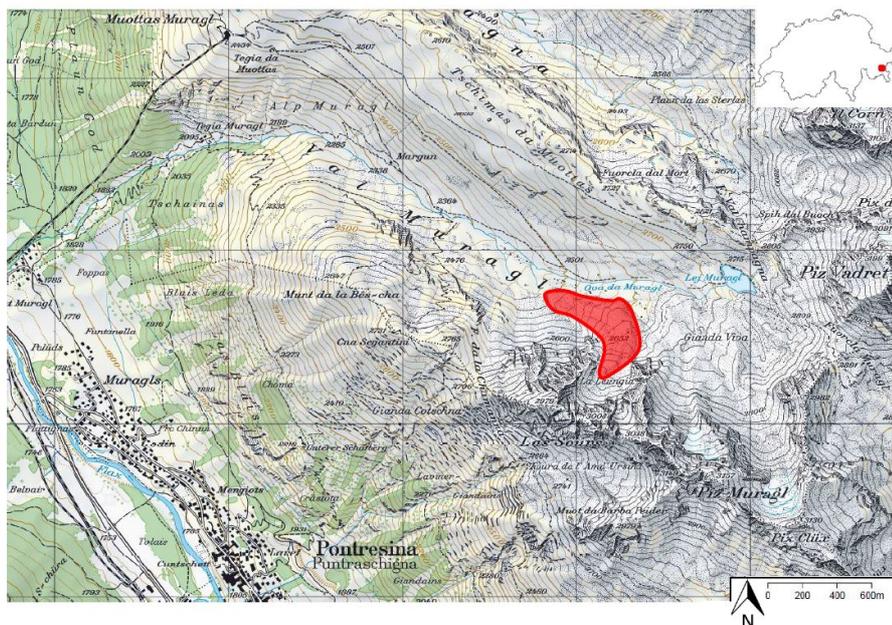


Abbildung 4.1: Übersicht des Untersuchungsgebietes. Rot eingefärbt der Blockgletscher Muragl (swisstopo 2015d).

4.1.1 Geomorphologische Situation

Während des letzteiszeitlichen Maximums vor ungefähr 20'000 Jahren war das Val Muragl sowie die gesamte Region Teil der Akkumulationszone der eiszeitlichen Gletscher. Gefolgt wurde dieser Zeitabschnitt von einem Zerfall des Oberflächeneises und der Bildung von ausgeprägten Moränensystemen vor 20'000-10'000 Jahren. Durch mehrere Gletschervorstöße und Entwicklungen von kriechenden Permafrost-Formen entstand in den letzten 10'00 Jahren die heutige geomorphologische Situation. Sie ist durch den Rückzug des Oberflächeneises sowie durch Variationen im Verhalten des Permafrost-Kriechens gekennzeichnet. Die Abbildung 4.2 gibt eine Übersicht über die geomorphologischen Formen im Untersuchungsgebiet. Dabei werden die Landschaftsformen und die dazugehörigen Prozesse in Prozesseinheiten (glazial, periglazial, fluvial, gravitativ, denutational, biotisch/organisch und anthropogen) unterteilt, je nachdem, welche Prozesseinheit dominiert. Es wird ein standardisiertes Farbsystem verwendet. Im Val Muragl sind dabei gravitative (Steinschlag), denutationale (Erosion an Hängen), glaziale (Moränen) und periglaziale (Blockgletscher, Protalus Rampart) die meist gefundenen Prozesseinheiten (M. Maisch et al.). Geologisch betrachtet handelt es sich beim vorherrschenden Gestein im Val Muralg um geschichtete Paragneise, welche Mineralien wie Plagioklas, Quarz, Zirkon sowie Apatit enthalten (Springman et al. 2012).

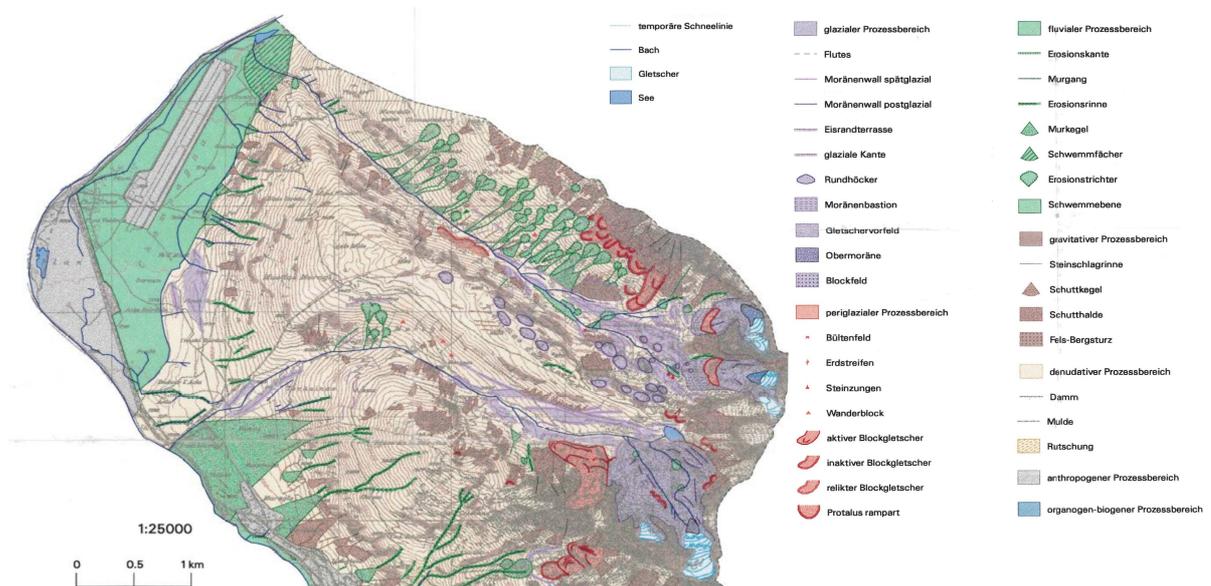


Abbildung 4.2: Geomorphologische Karte des Untersuchungsgebietes (Rothenbühler 2000).

4.1.2 Meteorologische Situation

Das regionale Klima kann als kontinental, sprich vergleichsweise tiefe Niederschläge und hohe Temperaturamplituden, bezeichnet werden (Kneisel und Kääb 2007). Zwei nahegelegene Wetterstationen belegen eine mittlere jährliche Temperatur von -2.2° C. Die Schneehöhe im März liegt üblicherweise zwischen einem und drei Metern (Rödler und Kneisel 2012). Grundsätzlich sind damit die meteorologische Bedingungen zur Existenz von Blockgletschern gegeben, was zahlreiche Exemplare in dieser Gegend belegen (Haeberli 1985; Kneisel und Kääb 2007).

4.2 Blockgletscher Muragl

4.2.1 Eigenschaften

Aus dem Kar La Launiga, nördlich des Gipfels Las Sours (Die Schwestern) entspringt der Blockgletscher Muragl. Er besitzt einer Länge von etwa 800 Metern, eine maximale Breite von 250 Metern und kriecht talwärts bis auf eine Höhe von 2490 Meter über Meer, wobei er eine Höhendifferenz von 300 Metern überwindet (Vonder Mühl 1993). Die Fläche beträgt in etwa 0.12 km^2 und die maximale Steigung bis zu 25° . Die Oberfläche besteht meist aus grobblockigem Material von 0.5-1.5 Metern Durchmesser (Kääb und Vollmer 2000). Speziell am Blockgletscher Muragl ist seine Form. Während die meisten Blockgletscher eine geradlinige Form besitzen, teilt sich der Blockgletscher Muragl etwa auf halber Distanz in einen kleineren Teil, welcher sich weiterhin nordwärts bewegt und einen Hauptteil, welcher nordwestwärts kriecht, auf. Im Entstehungsgebiet existieren perennierende Schneeflecken und einige Fließstrukturen in Längsrichtung. Bis auf eine Höhe von 2670 Meter über Meer herrscht der für Blockgletscher typische vegetationslose, grobblockige Schutt vor. Im mittleren Teil bis 2560 Meter über Meer gibt es verschiedene Lappen, welche quer und längs zur Fließrichtung in Form von Rücken und Gräben erkennbar sind. Die orografisch linke Seite, welche durch vegetationslose, aktive Strukturen der Oberfläche des oberen Teil gleicht, unterscheidet sich vom orografisch rechten Teil, in welchem Flechten, Humus und einige Pflanzen zu finden sind. Der kleinere Teil, welcher in nördliche Richtung kriecht, ist hingegen vegetationslos. Seine Front ist sehr steil, daher scheint dieser Teil des Blockgletschers aktiv zu sein. Auf dem untersten Teil des Blockgletschers haben sich auf der gesamten Breite Flechten etabliert und es existieren zusammenhängende Alpenrasen. Die Front ist teilweise bewachsen, was auf eine zunehmende Inaktivität des Blockgletschers schliessen lässt (Vonder Mühl 1993).



Abbildung 4.3: Blockgletscher Muragl. Eigene Fotografie

4.2.2 Untersuchungen am Blockgletscher Muragl

Erste Beschreibungen des Blockgletschers Muragl gehen zurück auf das Jahr 1929 (Salomon 1929). Seither wurde dieser Blockgletscher in mehreren Studien erforscht, sei es für Oberflächenverschiebungen mittels Photogrammetrie (Kääb und Vollmer 2000) oder die Untersuchung der thermalen Eigenschaften mittels Bohrlöcher (Vonder Mühll et al. 2003). Die Bestimmung der Tiefe und lateralen Ausdehnung der Auftauschicht, die Verteilung von Eis- und Wasserhaltigen Schichten und das Auftreten der Scherzone sowie des Grundgesteines untersuchten zudem Maurer und Hauck (2007) mittels Geoelektrik, Refraktionsseismik und Georadar (vgl Abb. 4.4) - um nur einige Beispiele der Untersuchungen am Blockgletscher Muragl zu nennen. Die Geophysikalischen Untersuchungen zeigen eishaltige Schichten im Bereich der Bohrlöcher B2 und B4. Bohrloch B1 hingegen liegt im Bereich von degradiertem Permafrost. Die Untersuchung der Bohrlöcher B2 bis B4 ergab, bei einem vergleichsweise tiefen Eisgehalt und Eistemperaturen nahe dem Gefrierpunkt eine Auftauschicht von bis zu drei Metern, wobei der Permafrost-Körper 18-20 Meter mächtig war und das Grundgestein in einer Tiefe von 30-50 Metern auftrat (Vonder Mühll et al. 2003). Abbildung 4.4 (rechts) veranschaulicht die

horizontalen Deformationen in Fließrichtung der Bohrlöcher B3 und B4. Dabei ist die Deformation des Permafrost-Körpers zu erkennen sowie die darunterliegende Schicht, welche sich nicht bewegt.

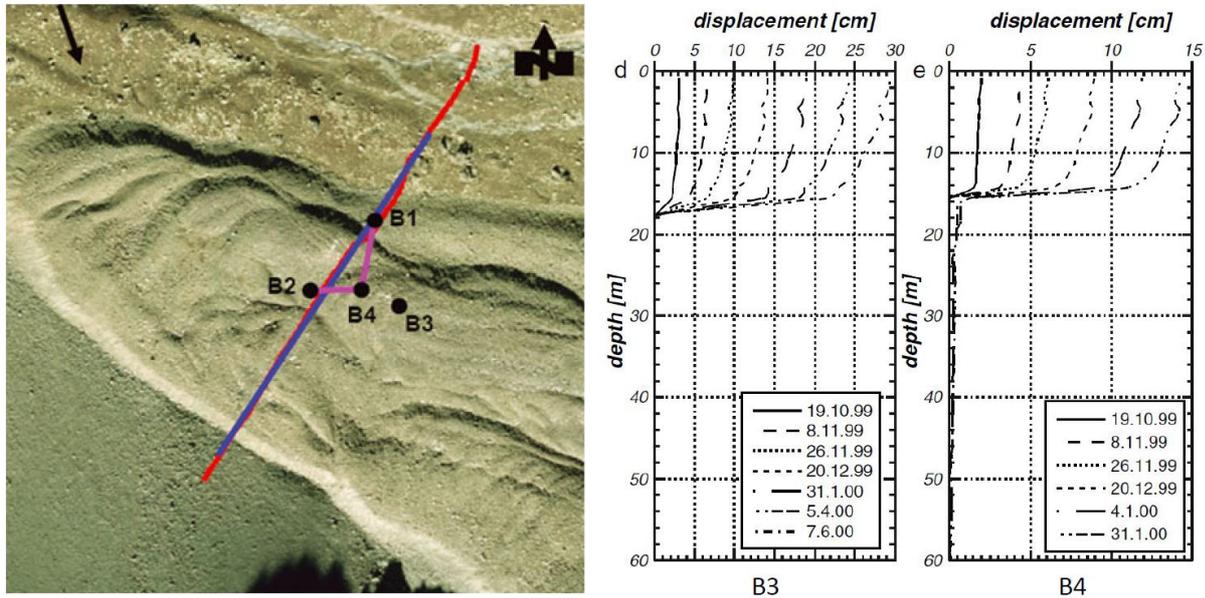


Abbildung 4.4: Links: Standorte der Bohrlöcher auf dem Blockgletscher Muragl, sowie die Profile der geophysikalischen Untersuchungen: Geoelektrik (Blau), Refraktionsseismik (Rot) und Georadar (Magenta). Bild: Maurer und Hauck (2007). Rechts: Die Verformung der Bohrlöcher in Fließrichtung (Arenson et al. 2002).

Die Geschwindigkeiten der Bohrlochdeformationen betragen 41 beziehungsweise 42 Zentimeter pro Jahr, wobei die kurze Zeitspanne der Untersuchung zu beachten ist (Arenson et al. 2002). Mittels fotogrammetrischer Methoden wurden für den Blockgletscher im Zeitraum von 1981 bis 1994 Fließgeschwindigkeiten von 0.01-1 Meter pro Jahr gemessen (Kääb und Vollmer 2000), wobei neuere Untersuchungen Geschwindigkeiten bis zu 1.5 Meter pro Jahr für den mittleren Teil des Blockgletschers belegen (PERMOS 2013). Damit besitzt der Blockgletscher Muragl vergleichsweise schnelle Fließgeschwindigkeiten. Mögliche Gründe dafür sind die eher steile Hanglage und die relativ hohen Eistemperaturen von nur knapp unter 0°C. In Kombination mit der Reduktion des Scherwiderstandes aufgrund höherer Temperaturen, welche mit der Degradierung eines aktiven Blockgletscher einhergehen, können die hohen Fließgeschwindigkeiten erklärt werden (Arenson et al. 2002).

5 Daten und Methoden

In diesem Kapitel werden die Daten, welche in dieser Arbeit verwendet werden, sowie der Weg von der Erhebung über die Prozessierung bis hin zu den vorgestellten Resultaten beschrieben. Die Arbeit kann grundsätzlich in zwei Abschnitte eingeteilt werden. Einerseits in die Auswertung und andererseits in die Anwendung der digitalen Höhenmodelle der eBee Kartografie-Drohne. Bei der Auswertung wird die Genauigkeit der Höhenmodelle anhand von Referenzdaten beurteilt. Bei der Anwendung werden dreidimensionale Oberflächenverschiebungen über den Zeitraum eines Jahres anhand zweier Höhenmodelle der eBee Kartografie-Drohne berechnet. Um die Arbeitsschritte nachvollziehen zu können, wird im ersten Abschnitt die eBee Kartografie-Drohne vorgestellt. Anschliessend folgt im zweiten Abschnitt die Besprechung der Referenzdaten, da diese teilweise für das Prozessieren der eBee Daten benötigt werden. Die prozessierten eBee Daten werden daher in Abschnitt drei erläutert. Schliesslich werden die Methoden zur Beurteilung der Genauigkeit und Berechnung der dreidimensionalen Oberflächenverschiebung in Abschnitt vier und fünf präsentiert.

5.1 eBee Kartografie-Drohne

In dieser Arbeit wird die eBee Kartografie-Drohne der Firma senseFly (senseFly 2015) zur Erhebung von digitalen Höhenmodellen sowie Orthofotomosaiks verwendet. Im folgenden Abschnitt wird daher die Drohne vorgestellt und ihre Funktionsweise erklärt.



Abbildung 5.1: eBee Kartografie-Drohne. Eigene Fotografie

5.1.1 Technische Eigenschaften

Die eBee Kartografie-Drohne ist ein unbemanntes Kleinflugzeug, welches durch eine integrierte Kamera und bordeigenes GPS Luftbilder aufnehmen kann, aus welchen mittels fotogrammetrischer Verfahren unter anderem digitale Höhenmodelle und Orthophotos hergestellt werden können. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der technischen Daten .

Spannweite	0.96m
Flügelfläche	0.25m ²
Gewicht ohne Kamera und Batterie	0.42kg
Gewicht mit Kamera und Batterie	0.67kg
Material	EPP Schaum, Karbon
Batterie	3-Zellen Lithium-Polymer
Flugdauer*	Bis 50 Minuten
Antrieb	Elektrischer Propeller (6.2 N)
Fluggeschwindigkeit	40-90km/h; 11-25m/s
Windresistenz	Bis 45km/h; 12m/s
Abgedeckte Fläche pro Flug*	Bis 12km ²
Kommunikationsreichweite Kontrollstation	ca. 3km
Kommunikationsreichweite Fernsteuerung	ca. 1km
Auflösung**	Bis zu 1.5cm/Pixel
Horizontale Genauigkeit**	1-5m; Bis 3cm mit Kontrollpunkten
Vertikale Genauigkeit**	2-5m; Bis 5cm mit Kontrollpunkten
Relative Genauigkeit DTM, Orthofotomosaik	1-3 faches der Auflösung

*Tabelle 3: Technische Daten der eBee Kartografie-Drohne. * Variiert stark, abhängig von Wind, zurückgelegten Höhenunterschieden, Temperatur, Batteriezustand und Auflösung. ** Abhängig von der Flughöhe, Genauigkeit abhängig von Auflösung (senseFly 2015).*

Die eBee Kartografie-Drohne lässt sich wahlweise mit Kameras im regulären sichtbaren oder im nahen Infrarot-Bereich ausstatten. Weitere Möglichkeiten sind Wärmebildkameras, mit welchen komplette Wärmekarten eines Untersuchungsgebietes hergestellt werden können. In dieser Arbeit werden die beiden Kameras S110 RGB für den sichtbaren und S110 NIR für den Bereich des nahen Infrarot verwendet. Abbildung 5.2 gibt eine Übersicht der spektralen Eigenschaften der Kameras.

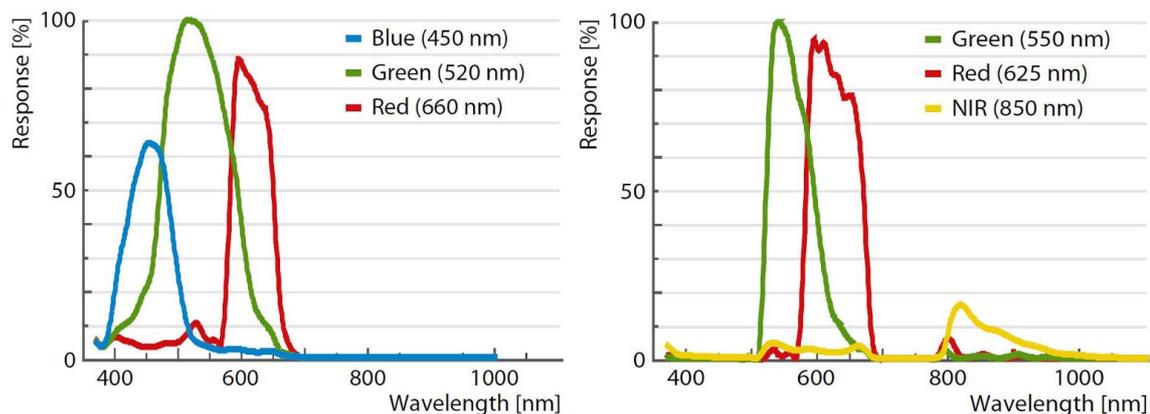


Abbildung 5.2: Spektrale Eigenschaften der verwendeten Kameras. Links S110 RGB, rechts S110 NIR (senseFly 2015).

5.1.2 Funktionsweise

Ein typischer Ablauf zur Erhebung der Daten beinhaltet die Flugplanung, das Durchführen des Fluges sowie das Prozessieren der aufgenommenen Daten.

Flugplanung

Die Flugplanung kann anhand des Softwareproduktes eMotion2 (senseFly 2015) durchgeführt und der Flug simuliert werden. Dabei kann der Start- und Landeort sowie das zu überfliegende Gebiet und die Auflösung, welche von der Flughöhe abhängig ist, festgelegt werden. Die Software schlägt einen automatischen Flugplan vor, welcher beliebig angepasst werden kann. Digitale Höhenmodelle verschiedener Anbieter können zudem für die Flugplanung verwendet werden, um zum Beispiel Kollisionen mit Berghängen zu verhindern. Insbesondere in alpiner Umgebung sollte davon Gebrauch gemacht werden. Das gesamte Untersuchungsgebiet inklusive Höheninformation kann auch auf dem Computer gespeichert werden, sodass im Feld die Flugplanung ohne Internetverbindung nochmals bearbeitet werden kann. Anschliessend wird der Flugplan auf die Drohne geladen.

Durchführen des Fluges

Der Start erfolgt durch dreimaliges Schütteln der Drohne, worauf diese den Antrieb startet und in die Luft geworfen werden kann. Anhand der GPS Daten fliegt die Drohne vollautomatisch den Flugplan ab, während sie Luftbilder aufnimmt. Die Landung erfolgt in einer vorgegebenen Anflugschneise, in welcher die Drohne schrittweise die Flughöhe vermindert und schliesslich auf dem Boden auftrifft. Während des Fluges können Flugparameter, Akkustand und die fortschreitenden Bildaufnahmen in Echtzeit mitverfolgt werden. Tauchen unvorhergesehene Probleme auf, können der Drohne verschiedene Manöver befohlen werden. Zudem kann ein Flug abgebrochen oder sogar die manuelle Kontrolle über die Drohne übernommen werden.

Daten prozessieren

Anschliessend an den Flug werden die Luftbilder von der Drohne auf den Computer geladen, wo die einzelnen Bilder mit den Positionsdaten des GPS versehen werden. Nun können die Bilder in das Programm Postflight Terra 3D 3 (senseFly 2015) überführt werden. Man gibt dem Programm vor, welche Bilder man verwenden möchte und kann das Koordinatensystem auswählen, in welchem die Produkte dargestellt werden sollen. Weiter kann die Auflösung eingestellt werden. Wird diese nicht verändert, bestimmt das Programm die Auflösung automatisch. Sie entspricht dann in etwa dem Wert, welcher bei der Flugplanung eingestellt wurde. Besitzt man geodätische Messungen von Punkten innerhalb des Untersuchungsgebietes und sind diese in den Luftbildern erkennbar, können sie als Kontrollpunkte verwendet werden. Dazu markiert man manuell in den einzelnen Luftbildern die gefundenen Punkte. Es sind im Minimum drei Punkte notwendig, welche je in mindestens zwei Bildern markiert werden müssen. Optimal ist die Verwendung von fünf gleichmässig über das Untersuchungsgebiet verteilten Punkten, welche je in fünf Bildern markiert werden. Der gesamte Schritt der Kontrollpunkte ist optional, verbessert aber die räumliche Genauigkeit der Produkte wesentlich und wird daher empfohlen. Nun können die Daten prozessiert werden. Dabei werden nach den Prinzipien der Fotogrammetrie gleiche Punkte in unterschiedlichen Luftbildern erkannt und einem Koordinatensystem zugetragen. Ausgewählte Luftbilder werden zu einem Orthofotomosaik zusammengebracht. Neben einem digitalen Höhenmodell und Orthofotomosaik mit der angegebenen Auflösung erhält man weitere Produkte wie 3D Punktwolken oder 3D Dreiecksnetze, welche exportiert und somit in anderen Programmen verwendet werden können. Das Programm eignet sich auch zur Vermessung oder Darstellung von 3D Objekten. Fortlaufend aktualisierte Qualitätsprotokolle während des Prozessierens der Daten geben zudem Auskunft über die einzelnen Arbeitsschritte des Programms (senseFly 2015).

5.2 Referenzdaten

In diesem Abschnitt werden die zusätzlich in dieser Arbeit verwendeten Daten beschrieben. Diese werden einerseits für das Beurteilen der Genauigkeit der digitalen Höhenmodelle der eBee Kartografie-Drohne benutzt, andererseits als Kontrollpunkte für genauere Resultate beim Prozessieren der eBee-Höhenmodelle und zuletzt als Vergleichsdaten zur Verifizierung der Deformationen des Blockgletschers. Zur Erhebung wurde ein elektronischer Tachymeter, ein terrestrischer Laserscanner (TLS) und ein tragbares differentielles GPS (DGPS) verwendet. Die Daten des Tachymeters und des terrestrischen Laserscanners stammen aus der ersten Septemberwoche 2014 sowie vom 17.09.2015 (nur Tachymeter), die des tragbaren DGPS vom 23.07.2015, während von der DGPS Station tägliche Daten von August 2012 bis August 2014 vorhanden sind.

5.2.1 Elektronischer Tachymeter

Elektronische Tachymeter sind Messgeräte, welche mit hoher Genauigkeit Horizontalwinkel, Vertikalwinkel und Distanz messen (Kahmen 2006). In dieser Arbeit wird ein Gerät (Leica TPS 1200) der Firma Leica Geosystems (Leica Geosystems 2015) mit einer Reichweite von drei Kilometern und einer Genauigkeit von $1 \text{ mm} + 1.5 \text{ ppm}$ verwendet. Mithilfe des Gerätes wurden 20 Punkte auf dem Blockgletscher eingemessen. Zudem wurden fünf Reflektoren, welche für die Georeferenzierung des terrestrischen Laserscanner-Datensatzes benötigt werden (Vergleich Abschnitt 5.2.2), eingemessen. Einige der eingemessenen Punkte werden auch als Kontrollpunkte beim Prozessieren der Drohne-Daten verwendet. Abbildung 5.3 zeigt eine Übersicht der erhobenen 20 Punkte sowie die Position von vier Reflektoren. Der fünfte Reflektor liegt ausserhalb der Abbildung. Weitere Informationen bezüglich elektronischer Tachymeter sind beispielsweise in Kahmen (2006) zu finden.

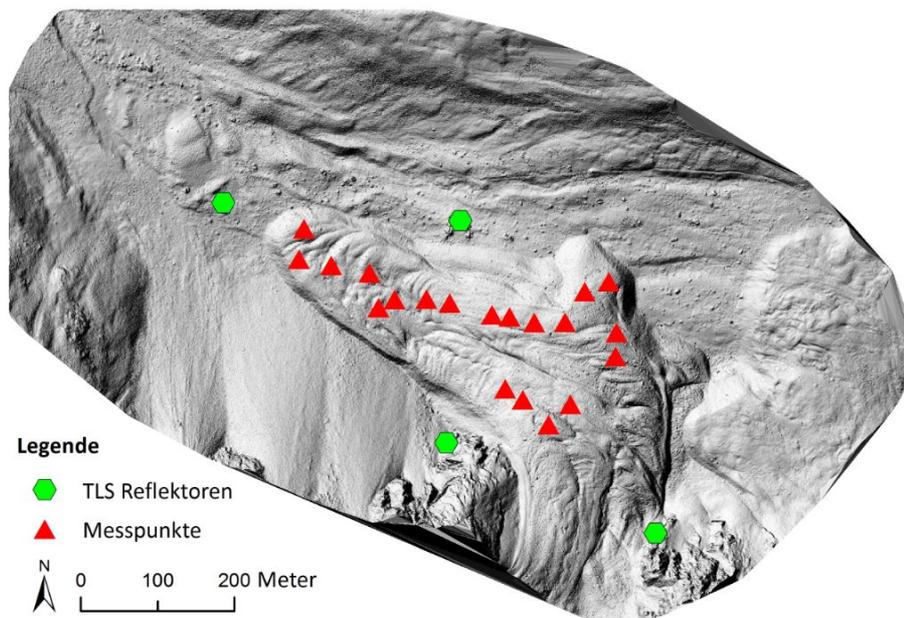


Abbildung 5.3: Mittels elektronischem Tachymeter eingemessene Punkte. Hinterlegt durch ein schattiertes eBee Höhenmodell. Eigene Darstellung.

5.2.2 Terrestrischer Laserscanner

Terrestrische Laserscanner messen durch aktives Aussenden eines Laserimpulses die Distanz zwischen Scanner und Objekt, auf welchem der Laserstrahl auftrifft. Die Messrate liegt üblicherweise bei über 100'000 Messungen pro Sekunde. Dabei erlaubt die Drehung des Scanners um die horizontale und vertikale Achse das Generieren einer Punktwolke, welche die, vom Scanner aus sichtbare, Geländeoberfläche wiedergibt (vgl. Abb. 5.4) (Pfeifer und Briese 2007). Jeder einzelne Messpunkt ist dabei durch eine X-, Y- und Z-Koordinate in einem lokalen Koordinatensystem definiert. In dieser Arbeit wurde ein Scanner (Riegl VZ-1000) der Firma RIEGL (RIEGL 2015) mit einer Reichweite von 1400 Metern und einer Genauigkeit von ungefähr 8 Millimetern verwendet. Die Punktwolke deckt dabei das gesamte Untersuchungsgebiet ab. Für die Beurteilung der Genauigkeit des digitalen Höhenmodells der eBee Drohne wird nur der Teil der Punktwolke verwendet, welcher den Blockgletscher und die unmittelbare Umgebung wiedergibt. Es wird eine Stichprobe von 71'776 Messpunkten verwendet, um die Handhabung der Daten zu vereinfachen. Dabei ist zu bemerken, dass getestet wurde, ob die Reduktion von Messpunkten einen signifikanten Unterschied bezüglich Mittelwert und Standardabweichung produziert, was aber nicht der Fall war. Da die genaue Position und Orientierung des Scanners nicht bekannt ist, muss die Punktwolke zuerst georeferenziert werden, um die einzelnen Punkte aus dem lokalen in ein globales Koordinatensystem zu über-

führen. Dazu werden fünf Reflektoren mit einem Durchmesser von 35 Zentimetern verwendet, welche über das Untersuchungsgebiet verteilt sind (vgl. Abb. 5.3). Da die Reflektoren aufgrund ihrer Oberflächeneigenschaft die eintreffenden Laserstrahlen mit hoher Intensität reflektieren, können sie in der Punktwolke leicht erkannt werden. Da zudem die genaue Position der Reflektoren in einem globalen Koordinatensystem mit dem Tachymeter eingemessen wurde, ist es möglich, die gesamte Punktwolke in das entsprechend globale Koordinatensystem zu transformieren. Die einzelnen Arbeitsschritte werden in dieser Arbeit im dem Programm RiScan Pro (RIEGL 2015) getätigt, welches auch das anschließende Exportieren der Punktwolken zur Verwendung in ArcGIS ermöglicht. Weitere Informationen bezüglich terrestrischem Laserscanning sind beispielsweise in Pfeifer und Briese (2007) zu finden.

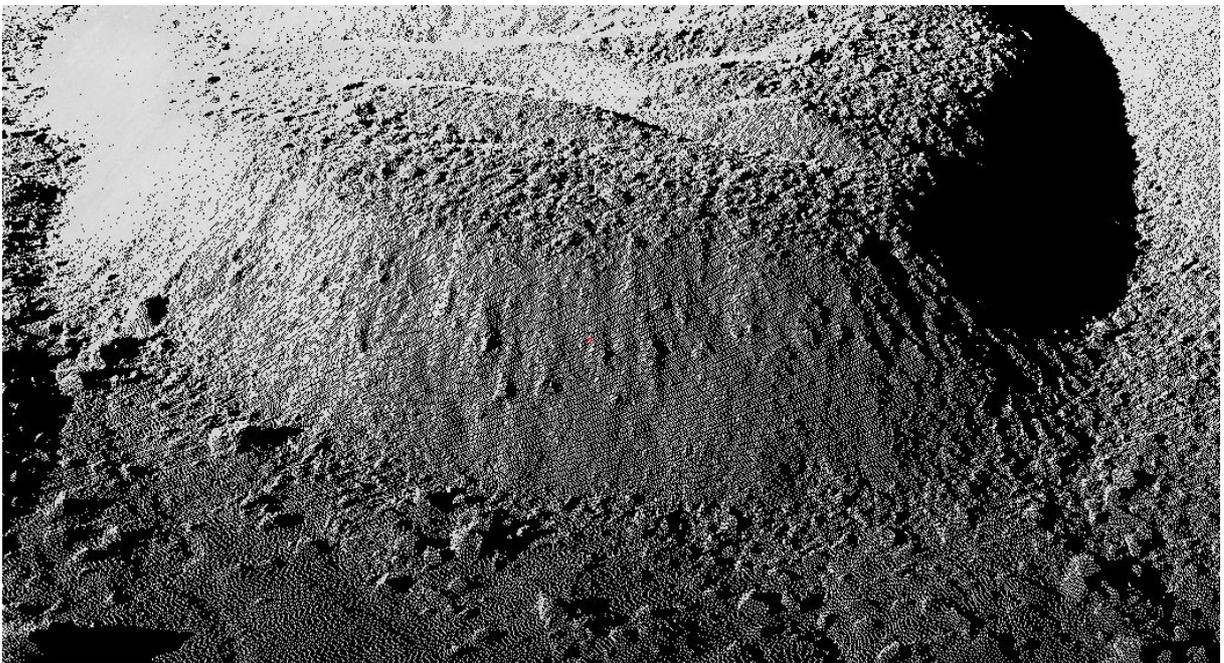


Abbildung 5.4: Punktwolke des terrestrischen Laserscanners der Front des Blockgletschers Muragl. Diese zeigt die vom Scanner aus sichtbare Oberfläche. Die schwarzen Flächen befinden sich ausserhalb der Sichtbarkeit des Scanners und können nicht vermessen werden. Eigene Darstellung.

5.2.3 Differential Global Positioning System

Beim Messen mit GPS können aufgrund verschiedenster Fehlerquellen Ungenauigkeiten im Bereich von mehreren Metern auftreten. Das Prinzip des DGPS basiert darauf, dass zwei benachbarte Messgeräte, welche GPS Signale empfangen, die gleichen Fehlerquellen und damit Ungenauigkeiten besitzen. Ist nun die genaue Position des einen Messgerätes bekannt (Referenzstation), kann diese die Korrekturdaten (Differenz zwischen gemessenem GPS Standort und genauem Standort) an das benachbarte Messgeräte (tragbares Messgerät im Feld) weiterleiten. Durch diese Fehlerkorrektur ist bei Einzelmessungen eine sehr hohe Genauigkeit zu erzielen (Lange 2013). Da beim zweiten Drohneflug am 23.07.2015 kein Tachymeter vorhanden war, wurden die Kontrollpunkte für das Prozessieren der Drohnen-Daten mit dem DGPS eingemessen. Dazu markierten wir fünf grosse flache Steine mit circa ein Meter grossen roten Kreuzen, welche anschliessend in den Luftbildern zu erkennen waren (Vgl. Abb 5.5). Die DGPS Station, fix auf dem Blockgletscher installiert, ist Teil des Permos (PERMOS 2013) Programms und die Daten können über das PermaSense Projekt der ETH Zürich, Uni Basel und Uni Zürich bezogen werden (PermaSense 2015).



Abbildung 5.5: Einmessen der Kontrollpunkte mittels DGPS, welche im Luftbild (rechts) erkennbar sind. Eigene Fotografie.

5.3 Daten der eBee Kartografie-Drohne

5.3.1 Datenerhebung

Für diese Arbeit wurden am 07.09.2014 und am 23.07.2015 Daten mit der eBee Kartografie-Drohne erhoben. Bei beiden Daten wurde jeweils ein Flug im sichtbaren Bereich und einer im nahen Infrarot (Kamera S110 RGB und S110 NIR) durchgeführt. Die Flüge wurden jeweils in eMotion 2 simuliert und wenn nötig im Feld nochmals angepasst. Der Flugplan war entsprechend dem Gelände so gewählt, dass eine hohe Überlagerung der einzelnen Bilder gegeben ist. Die Auflösung lag entsprechend der Flughöhe zwischen fünf und sieben Zentimetern pro Pixel. Der Start und die Landung erfolgte jeweils von einer flachen Wiese nordwestlich des Blockgletschers (vgl. Abb. 5.6). Während des Fluges wurden die maximal erlaubten Windgeschwindigkeiten nicht überschritten. Aufgrund von niedrigem Akkustand wurde ein Flug frühzeitig abgebrochen, was jedoch auf die Endprodukte keinen Einfluss hatte, da die Überlagerung der aufgenommenen Luftbilder schon genügend gross war.

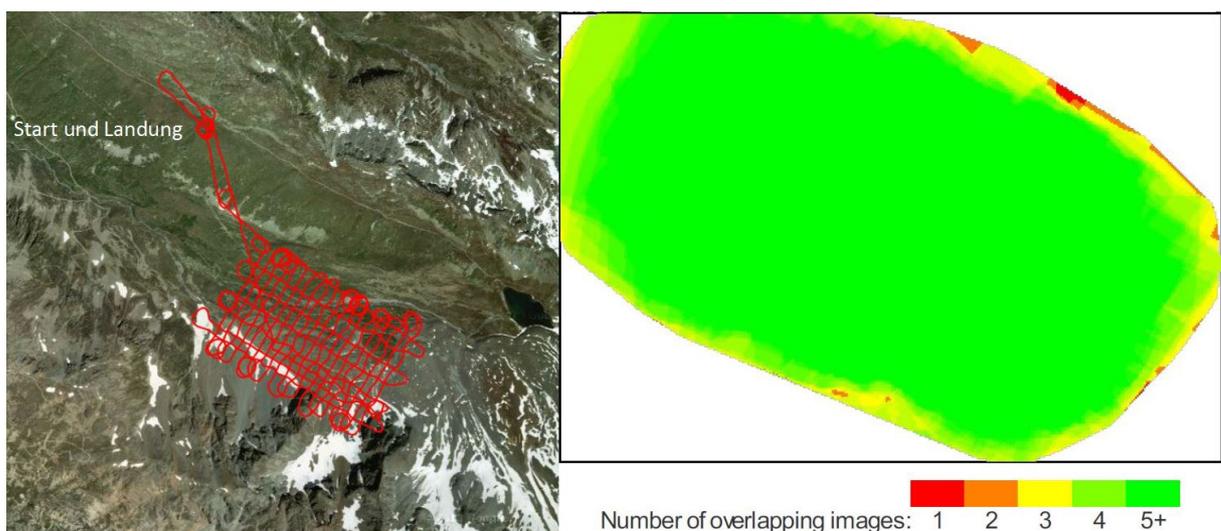


Abbildung 5.6: Flugplan und Überlagerung der einzelnen Luftbilder eines Fluges aus eMotion 2 und Postflight Terra 3D 3. Eigene Darstellung.

5.3.2 Prozessierung

Das Prozessieren der Daten erfolgte entsprechend Abschnitt 5.1.2. Die Auflösung wurde nicht vorgegeben und daher automatisch bestimmt. Für die Daten vom 07.09.2014 wurden einmal keine und einmal acht Kontrollpunkte verwendet. Die Kontrollpunkte setzten sich dabei aus vier für den terrestrischen Laserscanner eingemessen Reflektoren zusammen und aus

einzelnen Tachymeter-Messpunkten. Alle Punkte sind in den Luftbildern gut erkennbar. Für den Flug vom 23.07.2015 wurden ebenfalls die vier Reflektoren sowie fünf DGPS-Punkte als Kontrollpunkte verwendet. Alle Kontrollpunkte wurden dabei in zehn Bildern markiert. Damit sind die Bedingungen von mindestens fünf gleichmässig über das Untersuchungsgebiet verteilten Kontrollpunkten, welche je in mindestens fünf Luftbildern markiert werden, gegeben. Für die weiteren Schritte wurden die erhaltenen Orthofotos und digitalen Höhenmodelle verwendet. Tabelle 4 gibt eine Übersicht der Produkte.

Datum	Kamera	Anzahl Bilder	Auflösung	Kontrollpunkte
07.09.14	S110 RGB	272	6.95cm	keine
07.09.14	S110 NIR	258	7.16cm	keine
07.09.14	S110 RGB	272	6.95cm	8
07.09.14	S110 NIR	258	7.16cm	8
23.07.15	S110 RGB	219	6.46cm	9
23.07.15	S110 NIR	189	6.68cm	9

Tabelle 4: Eigenschaften der Orthofotos und digitalen Höhenmodelle der eBee Kartografie-Drohne.

5.3.3 Eigenschaften der digitalen Höhenmodelle

Zwei Eigenschaften der digitalen Höhenmodelle der eBee Kartografie-Drohne sollen hier noch erwähnt werden: Einerseits die Randeffekte, welche aufgrund von ungenügender Luftbildüberlagerung entstehen, andererseits kleine Unebenheiten welche in den Höhenmodellen vorzufinden sind.

Randeffekte

Für den fotogrammetrischen Prozess sind mindestens zwei überlagernde Luftbilder notwendig. Mehr als zwei Bilder sind aber von Vorteil. In Abbildung 5.6 ist die Überlagerung der einzelnen Luftbilder erkennbar und es wird ersichtlich, dass am Rande des Untersuchungsgebietes die Überlagerung teilweise ungenügend ist. Dies führt zu Ungenauigkeiten und Fehlern im Höhenmodell, was in Abbildung 5.7 ersichtlich wird. Daher werden in dieser Arbeit Randgebiete für die Auswertung gemieden.

Kleine Unebenheiten

Betrachtet man die schattierten Höhenmodelle von Nahem, fällt auf, dass teilweise viele kleine Unebenheiten im Modell vorhanden sind, wie man in Abbildung 5.7 erkennen kann. Diese Unebenheiten entstehen vermutlich, wenn der fotogrammetrische Prozess nicht befriedigend durchgeführt werden konnte. Dies ist der Fall, wenn ein Punkt in einem Luftbild in anderen Luftbildern nicht gefunden werden kann. Beobachtet wurden diese Unebenheiten in allen schattierten Höhenmodellen der eBee Drohne, insbesondere an Orten mit sich bewegenden Objekten oder starken Höhenänderungen. Die Unebenheiten unterscheiden sich aber in Anzahl, Position und Form in den einzelnen Modellen, auch wenn diese das gleiche Untersuchungsgebiet repräsentieren. Dies ist insbesondere beim Vergleich von Höhenmodellen zu beachten, da diese Unebenheiten einen Einfluss auf die Auswertung haben können.

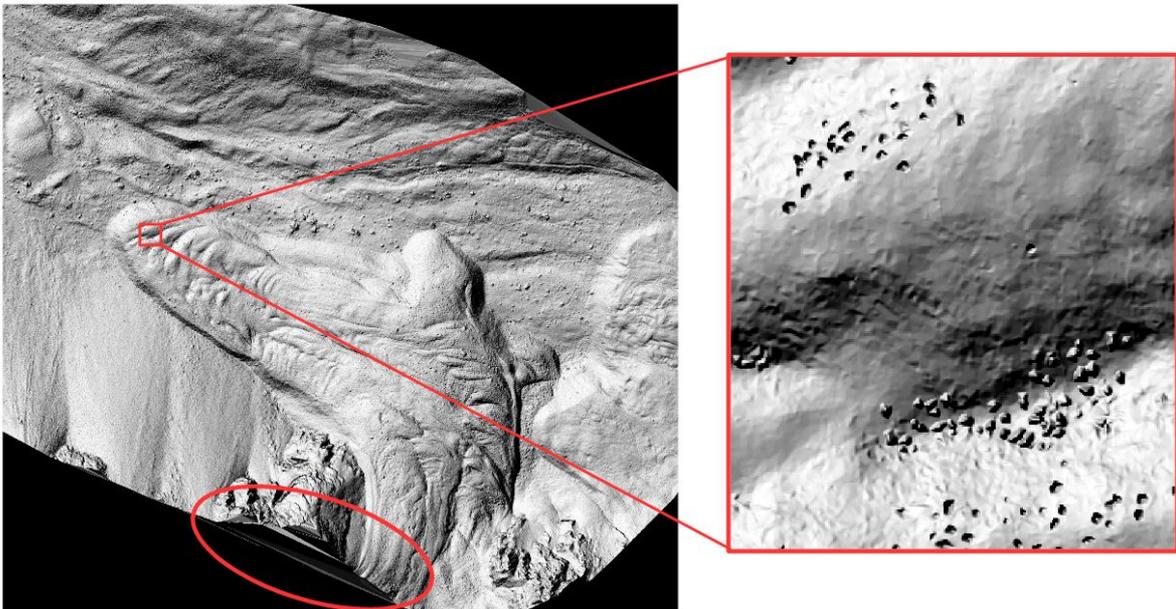


Abbildung 5.7: Schattiertes eBee Höhenmodell mit Randeffekten (rotes Oval) und kleinen Unebenheiten (rechts). Eigene Darstellung.

5.3.4 Eigenschaften der Orthofotos

Die erhaltenen Orthofotos sind ein Mosaik aus einzelnen Luftbildern. Die Form der einzelnen Mosaikstücke sowie die Bilder, welche verwendet werden, können selbst festgelegt werden. Da in dieser Arbeit der Schwerpunkt im Auswerten und Anwenden der digitalen Höhenmodelle liegt, wurde dieser Prozess nicht manuell gesteuert und es werden daher die automatisch prozessierten Orthofotos verwendet. Sowohl die Orthofotos im sichtbaren wie auch die im nahen Infrarot-Bereich besitzen drei Spektralkanäle (vgl. Abschnitt 5.1.1).

5.4 Beurteilung der Genauigkeit

Dieser Abschnitt erläutert, wie die Genauigkeiten der digitalen Höhenmodelle der eBee Kartografie-Drohne beurteilt werden. Dabei wird nach den Arbeitsschritten, wie sie in Abschnitt 2.2.2 vorgestellt werden, verfahren. Es werden nur die eBee Höhenmodelle vom 07.09.2014 beurteilt, da bei diesen zeitgleich erhobene Referenzdaten in Form von Tachymeter-Messpunkten und eines terrestrischen Laserscans vorliegen. Dabei werden nur die vertikalen Höhendifferenzen zwischen eBee Höhenmodell und Referenzdaten ausgewertet. Im Gegensatz dazu wird die horizontale Lagegenauigkeit der eBee Höhenmodelle in dieser Arbeit nicht weiter behandelt. Da die Tachymeter Messpunkte die höchsten Genauigkeiten aufweisen, werden diese als erstes verwendet, um die eBee Höhenmodelle und den terrestrischen Laserscan zu evaluieren. Um die räumliche Verteilung der Höhendifferenzen zu betrachten, wird anschliessend der Laserscan verwendet, um die eBee Höhenmodelle auszuwerten. Es folgt eine Betrachtung der Verteilung der Fehler bezüglich Hangneigung, Bodenbeschaffenheit und Beleuchtung.

5.4.1 Beurteilung durch Tachymeter

Es liegen 20 Messpunkte des Tachymeters in den Landeskoordinaten LV03 (CH1903) vor. Da die Drohne-Daten im UTM Koordinatensystem Zone 32 Nord vorliegen, werden die Messpunkte mit dem Programm REFRAME (swisstopo 2015e) in dieses Koordinatensystem umgewandelt. Um die Höhendifferenz zwischen den Messpunkten und des eBee Höhenmodells zu erhalten, werden in ArcGIS mit der Funktion *Extract Multi Values to Points* die Höhendaten des eBee Modells den Tachymeter Messpunkten hinzugefügt. Dabei wird jeweils derjenige Wert hinzugefügt, welcher sich an der selben XY-Lage wie der entsprechende Messpunkt befindet. Anschliessend kann die Differenz der Höhenwerte in der Attribut-Tabelle berechnet werden, indem die Höhe der Tachymeter-Messpunkte von den Höhen der eBee-Daten abgezogen wird.

Um den terrestrischen Laserscan auszuwerten, muss anders vorgegangen werden, da es sich nicht um Raster-, sondern ebenfalls um Punktdaten handelt. Da die Positionen der Reflektoren, welche für das Georeferenzieren des Laserscans verwendet werden, mit dem Tachymeter eingemessen und vor dem Georeferenzieren ins UTM Zone 32N Koordinatensystem gebracht wurden, liegt der Laserscan bereits im richtigen Koordinatensystem vor. Eine Transformation der Punktkoordinaten des Laserscans erübrigt sich daher. Um die Höhendifferenzen zu erhalten, wird nun jeweils der horizontal nächstgelegene Punkt des Laserscans mit all seinen Attributen dem Tachymeter-Messpunkt hinzugefügt. Die Funktion *Join* (aufgrund der

räumlichen Position) in ArcGIS erlaubt ein solches Vorgehen. In der Attributen-Tabelle der Tachymeter-Messpunkte sind anschliessend die Attribute des nächstgelegenen Punktes des Laserscans und ein zusätzliches Attribut-Feld, welches die horizontale Distanz der beiden Punkte beinhaltet, vorhanden. Die Höhendifferenzen können anschliessend in der Attribut-Tabelle berechnet werden.

Da es sich bei den Tachymeter-Messungen nur um 20 Messpunkte handelt, werden die Höhendifferenzen nicht auf ihre Normalverteilung hin getestet. Die Identifizierung der Ausreisser geschieht anhand der $3 \cdot \text{RMSE}$ Regel. Ausreisser sind damit von der Auswertung ausgeschlossen (Höhle und Höhle 2009). Aufgrund der kleinen Stichprobe werden keine statistisch robusten Messgrössen verwendet. Die Tachymeter Messpunkte sind sehr genau, erlauben aber wegen ihrer geringen Anzahl keine Beurteilung der räumlichen Verteilung der Höhendifferenzen.

5.4.2 Beurteilung durch terrestrischen Laserscanner

Um die Höhendifferenzen zwischen eBee Höhenmodell und der Punktwolke des Laserscans zu erhalten, wird auf die gleiche Weise wie beim Tachymeter verfahren. Das heisst, zu jedem der 71'776 Punkte des Laserscans wird der dazugehörige Höhenwert der eBee-Daten, welcher sich an der gleichen XY-Position befindet, hinzugefügt. In der Attribut-Tabelle des Laserscans kann anschliessend die Höhendifferenz berechnet werden. Wiederum werden Ausreisser entfernt, deren Betrag grösser als $3 \cdot \text{RMSE}$ ist.

Testen auf Normalverteilung

Die Höhendifferenzen werden anschliessend auf ihre Normalverteilung hin überprüft. Dazu wird in dieser Arbeit ein visueller Ansatz nach Höhle und Höhle (2009) verwendet. Ein erster Eindruck bezüglich Normalverteilung gibt ein Histogramm der Höhendifferenzen. Diese werden dazu anhand ihres Höhendifferenz-Wertes (X-Achse) und ihrer Häufigkeit (Y-Achse) dargestellt. Unterlegt wird das Histogramm mit den erwarteten Werten der Normalverteilung bei gegebenem Mittelwert und Varianz aus den verwendeten Höhendifferenzen. Die Grafik erlaubt so die Abweichung der Höhendifferenzen bezüglich einer Normalverteilung zu betrachten. Eine bessere Diagnose bezüglich Normalverteilung erlaubt ein Quantil-Quantil-Diagramm. Dazu werden die theoretischen Quantile (X-Achse) gegenüber den realen Quantilen (Y-Achse) aufgezeigt. Sind die Werte normalverteilt, erhält man eine gerade Linie. Ist eine Normalverteilung der Differenzen vorhanden, reichen Mittelwert, Standardabweichung und RMSE zur Beschreibung der Genauigkeit aus. Ist jedoch keine Normalverteilung gegeben, werden die statistisch robusten Messgrössen, wie sie in Abschnitt 2.2.2 vorgestellt werden, verwendet.

5.4.3 Räumliche Verteilung der Höhendifferenzen

Die grosse Anzahl von 71'776 Messpunkten des Laserscans erlaubt die Betrachtung der räumlichen Verteilung der Höhendifferenzen. Zudem können sie mit externen Faktoren wie der Hangneigung, Bodenbeschaffenheit oder Beleuchtung in Verbindung gebracht werden, die einen Einfluss auf die Genauigkeit der fotogrammetrisch erhobenen digitalen Höhenmodelle haben können (Kääb und Vollmer 2000). Die Visualisierung der Höhendifferenzen erlaubt zudem das Erkennen von räumlichen Mustern. Dazu werden in dieser Arbeit die Höhendifferenzen, welche in Punktdaten vorliegen, mittels der *Point to Raster* Funktion in ArcGIS in Rasterdaten umgewandelt und dargestellt. Dabei werden die Höhendifferenzen um ihren Mittelwert korrigiert um die Abweichung zum Referenzdataset hin darzustellen. Als Hintergrund dient dabei ein schattiertes Höhenmodell zur Orientierung (vgl. Abb. 6.1).

Abhängigkeit bezüglich Hangneigung

Die Hangneigung wurde in vielen Studien als ein wichtiger Faktor erkannt, welcher die Genauigkeit von fotogrammetrisch erhobenen digitalen Höhenmodellen beeinflusst. Dabei nimmt die Genauigkeit mit zunehmender Hangneigung ab (Kääb und Vollmer 2000; Müller et al. 2014). Um die Abhängigkeit der Hangneigung zu untersuchen wird aus dem digitalen Höhenmodell der eBee-Drohne ein Raster erstellt, welches die Hangneigung repräsentiert. Dies ist mit der ArcGIS Funktion *Slope* möglich. Analog zu den Höhendaten wird anschliessend zu jedem Messpunkt des Laserscans die Hangneigung hinzugefügt, so, dass zu jeder Höhendifferenz die jeweilige Hangneigung bekannt ist. In einem Diagramm können nun die Hangneigungen gegenüber statistischen Messgrössen der Höhendifferenzen aufgetragen werden. In dieser Arbeit wird dabei zu jedem 5°-Schritt der RMSE angegeben.

Abhängigkeit bezüglich Oberflächenbeschaffenheit

Verschiedene Oberflächentypen besitzen einen unterschiedlichen optischen Kontrast, welcher unter anderem die Genauigkeit von fotogrammetrische erhobenen digitalen Höhenmodellen beeinflussen kann (Kääb und Vollmer 2000). Das in dieser Arbeit vorgestellte Untersuchungsgebiet lässt sich grob in zwei Oberflächentypen unterscheiden. Zum einen ist dies die alpine Vegetation und zum anderen die von Felsblöcken geprägten Schutthalden und Blockgletscher. Um die Höhendifferenzen zwischen eBee und Referenzdaten bezüglich dieser zwei Typen zu vergleichen, wird durch eine simple Klassifikation die alpine Vegetation vom Rest des Untersuchungsgebietes unterschieden. Das Othofoto im nahen Infrarot eignet sich dabei, um die Vegetation zu erkennen, da sich diese aufgrund der spektralen Eigenschaften rötlich vom Rest der Umgebung abhebt. Mit 20 Stichproben wird ein repräsentatives spektrales Profil der Vegetation erstellt, welches im Anschluss die Klassifizierung der Vegetation erlaubt.

Analog zu den vorhergehenden Schritten wird diese Information (Vegetation/keine Vegetation) den Punkten des Laserscans hinzugefügt und kann so für die Evaluierung der Genauigkeit bezüglich Oberflächenbeschaffenheit verwendet werden.

Abhängigkeit bezüglich Beleuchtung

Die Beleuchtung wurde neben der Hangneigung als ein weiterer wichtiger Faktor erkannt, welcher die Genauigkeit von fotogrammetrische erhobenen digitalen Höhenmodellen beeinflusst. Ungenügend beleuchtete Gebiete (Schatten) wiesen dabei eine geringere Genauigkeit auf (Bühler et al. 2012). Um den Einfluss der Beleuchtung zu untersuchen, wird ein Graustufenbild erstellt. Dazu wird allen drei Spektralkanälen (Rot, Grün, Blau) des Echtfarbenenbilds der zweite Kanal (Grün) zugewiesen. Dieser wiedergibt ein relativ breites Spektrum und gleicht daher einem Graustufenbild. Die Rasterwerte reichen so von 0 (dunkel; Schwarz) bis 255 (hell; Weiss). Analog zu den vorhergehenden Schritten kann diese Information den Punkten des Laserscans hinzugefügt werden. In einem Diagramm kann anschliessend die Beleuchtung gegenüber statistischen Messgrössen der Höhendifferenzen dargestellt werden. In dieser Arbeit wird dabei zu jedem 50er-Schritt der RMSE angegeben.

5.5 Deformationsanalyse

Die digitalen Höhenmodelle der eBee Kartografie-Drohne werden nach der Beurteilung der Genauigkeit für eine Deformationsanalyse des Blockgletschers Muragl verwendet. Dabei wird die dreidimensionale Oberflächenverschiebung zwischen den beiden Zeitpunkten von 07.09.2014 bis 23.07.2015 berechnet. Zusätzlich wird die vertikale Höhenänderung betrachtet, welche für die Beurteilung der Oberflächenverschiebungen und des Zustandes des Blockgletschers von Nutzen ist. Grundsätzlich wird dabei nach dem Schema, wie es in Abschnitt 2.4.2 beschrieben wird, vorgegangen.

5.5.1 Dreidimensionale Oberflächenverschiebung

Für die Berechnung der dreidimensionalen Oberflächenverschiebung wird zuerst die horizontale Oberflächenverschiebung betrachtet. Die CIAS Bild-Korrelationssoftware (Käab und Vollmer 2000) erlaubt eine solche Berechnung. Anschliessend kann die vertikale Komponente anhand der Resultate der CIAS Software hergeleitet werden.

CIAS Bild-Korrelationssoftware

Diese Software basiert auf dem Prinzip der normalisierten Kreuzkorrelation und erlaubt das Berechnen horizontaler Verschiebungen zwischen zwei georeferenzierten Bildern. Dabei wird ein kleiner Ausschnitt (Referenzblock) des älteren Bildes in einem grösseren Ausschnitt (Testgebiet) des jüngeren Bildes gesucht. Durch den Korrelationskoeffizienten kann die Position des Referenzblocks im Testgebiet bestimmt werden. Dadurch ist die Position des Referenzblocks in beiden Bildern bekannt. Die Distanz zwischen den beiden Positionen ergibt die horizontale Verschiebung (CIAS Software 2015; Kääh und Vollmer 2000).

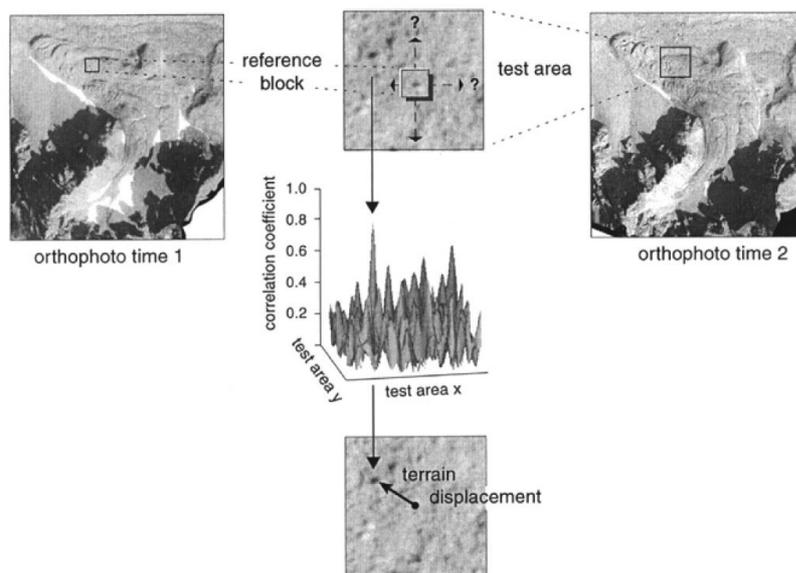


Abbildung 5.8: Prinzip der CIAS Bild-Korrelationssoftware (Kääh & Vollmer, 2000).

Eingabedaten

Die CIAS Software benötigt zwei georeferenzierte Graustufenbilder von unterschiedlichen Zeiten. Diese müssen im geo TIFF oder TIFF World Format vorliegen. Da Oberflächenverschiebungen berechnet werden, eignen sich schattierte oder normale digitale Oberflächenmodelle, im entsprechenden Format als Eingabedatei. Da die Grauwerte normalisiert werden, haben absolute Grautöne keinen Einfluss auf das Ergebnis. Es empfiehlt sich, präzise koregistrierte Bilder zu verwenden, auch wenn die Software das Koregistrieren der Bilder erlaubt. Zudem müssen beide Bilder die exakt gleiche Auflösung besitzen und die Pixelform muss quadratisch sein (CIAS Software 2015). Je nach Grösse des Referenzblocks und Testgebietes unterscheiden sich die Resultate erheblich. Um bestmögliche Resultate zu erzielen, sollte die Grösse des Referenzblocks so gewählt werden, dass er den Oberflächeneigenschaften des Untersuchungsgebietes entspricht. Wird sie zu klein gewählt, können keine geeigneten Korrelationen gefunden werden. Wird sie zu gross gewählt, steigt die Rechenzeit und kleinräumi-

ge Bewegungen können nicht beachtet werden. Die Grösse des Testgebietes muss den erwarteten Fliessgeschwindigkeiten angepasst werden, so dass der Referenzblock nach der Verschiebung noch innerhalb des Testgebietes zu finden ist (Kääb und Vollmer 2000).

In dieser Arbeit werden schattierte sowie normale eBee Höhenmodelle im geo TIFF Format mit einer Auflösung von 0.1, 0.25 und 0.5 Metern verwendet. Da die ursprüngliche Auflösung kleiner als 0.1 Meter ist, werden die Höhenmodelle mit der ArcGIS Funktion *Resample (Bilinear Interpolation)* in die entsprechende Auflösung gebracht und anschliessend mit der *Hills-hade* Funktion schattiert. Es wird ein Ausschnitt gewählt, welcher einen Grossteil des Blockgletschers wiedergibt, der aber noch nicht von Randeffekten (Vergleich Abschnitt 5.3.3) beeinflusst ist. Für die Wahl der Grösse des Referenzblocks werden die Oberflächeneigenschaften des Blockgletschers betrachtet. Dessen Oberfläche besteht aus grobblockigem Material von der Grösse zwischen 0.5-1.5 Metern (Kääb und Vollmer 2000). Die Grösse der Fließstrukturen hingegen entspricht mehreren Metern. Daher wird wahlweise eine Länge und Breite des Referenzblocks von 2.5, 5 und 10 Metern verwendet. Die Länge und Breite des Testgebietes wird jeweils auf das Zweifache des Referenzblocks gesetzt. Die Verschiebungen werden alle fünf Meter berechnet, was eine übersichtliche Darstellung der Resultate erlaubt. Auf eine Koregistrierung der beiden Bilder wird verzichtet, da in einem Testdurchlauf ersichtlich wurde, dass die Korrekturen vernachlässigbar sind.

Ergebnisse

Als Ergebnis erhält man die X und Y Koordinate des jeweiligen Messpunktes, die Verschiebung in X und Y Richtung, den Betrag der Verschiebung, die Richtung der Verschiebung sowie den maximalen und gemittelten Korrelationskoeffizienten. Diese Informationen können als .txt-File abgespeichert und beispielsweise in ArcGIS importiert werden. Die Ergebnisse werden jeweils gefiltert, so dass nur Verschiebungen angezeigt werden, welche einen maximalen Korrelationskoeffizienten von mehr als 0.8 und ein Signal-Rausch-Verhältnis (maximaler Korrelationskoeffizient / gemittelter Korrelationskoeffizient) von mehr als zwei besitzen. Visualisiert werden die Ergebnisse in ArcGIS, wo die einzelnen Messungen beispielsweise als Pfeilsymbol mit Länge oder Farbe entsprechend dem Betrag der Verschiebung dargestellt werden können.

Vertikale Komponente

Um die volle dreidimensionale Information der Verschiebung zu erhalten, fehlt bisher die vertikale Komponente. Diese kann jedoch anhand der digitalen Höhenmodelle und den CIAS-Ergebnissen hergeleitet werden. Dazu wird der Höhenwert der Anfangskoordinate der Verschiebung aus dem älteren Höhenmodell vom Höhenwert der Endkoordinate der Verschiebung des jüngeren Höhenmodells abgezogen. Die X- und Y-Werte der Endkoordinate erhält

man dabei durch das Addieren der horizontalen Verschiebungsbeträge zu den Anfangskordinaten der Verschiebung. Die Höhenwerte können jeweils mit der *Extract Multi Values to Points* Funktion in ArcGIS erhoben werden. Da nun die Anfangskordinaten der Verschiebungen und die dazugehörigen Verschiebungsvektoren bekannt sind, können sie in geeigneten Programmen dargestellt werden (beispielsweise mit der *quiver3* Funktion in Matlab, welche X-, Y- und Z-Koordinaten für den Ursprungspunkt und u,v und w als Verschiebungsbeträge in X-, Y- und Z-Richtung benötigt).

5.5.2 Vertikale Höhenänderung

Die Höhendifferenz zwischen zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten erhobenen Höhenmodellen gibt Auskunft über Hebung und Senkung der Geländeoberfläche. Im Bereich des Blockgletschers Muragl ist sie das Resultat von thermischen (Eisschmelze, Frosthebung) und dynamischen (Stauchung durch kompressives Kriechen, Ausdünnung durch Extension) Geometrieänderungen (Kääb 2001). Sie ist daher eine nützliche Information für die Beurteilung der Oberflächenverschiebungen und des Zustandes des Blockgletschers. Die Höhendifferenz kann mit der Funktion *Minus* in ArcGIS berechnet werden. Um allfällige kleinräumige Ungenauigkeiten nicht zu berücksichtigen und grössere Trends zu erkennen, werden Höhenmodelle mit einer Auflösung von 0.5 Meter (Funktion: *Resample*) verwendet. Bei der Visualisierung ist Rücksicht auf die Genauigkeit der Höhenmodelle zu nehmen. Geringe Differenzen, welche im Fehlerbereich der Höhenmodelle liegen, müssen von der Interpretation ausgeschlossen werden.

6 Resultate

Es werden die Genauigkeiten der digitalen eBee Höhenmodelle vom 07.09.2014 vorgestellt. Dabei wird zwischen der Beurteilung der Genauigkeit durch den Tachymeter und durch den terrestrischen Laserscanner unterschieden. Letzterer erlaubt zusätzlich die Betrachtung der räumlichen Verteilung der Höhendifferenzen. Anschliessend werden die Resultate der Deformationsanalyse präsentiert.

6.1 Genauigkeit der eBee Höhenmodelle

In den folgenden Tabellen werden die Höhendifferenzen zwischen dem jeweiligen eBee Höhenmodell und den Referenzdaten gezeigt. Ausreisser sind in den Werten nicht miteinbezogen. Als Ausreisser gilt eine Höhendifferenz, deren Betrag grösser als das Dreifache des ursprünglichen, aus allen Werten berechneten RMSE ist. Im folgenden werden Höhenmodelle, welche mit der S110 RGB Kamera erhoben wurden, als RGB bezeichnet. Wurden Kontrollpunkte verwendet, wird dies mit KP angegeben. Analog dazu ist die Bezeichnung NIR beziehungsweise NIR_KP für die Höhenmodelle der Kamera S110 NIR.

6.1.1 Genauigkeit beurteilt durch Tachymeter

Tabelle 5 zeigt die Höhendifferenzen zwischen den eBee Höhenmodellen und den 20 Tachymeter Messpunkten.

Messgrösse	RGB	NIR	RGB_KP	NIR_KP
Mittelwert [m]	0.28	2.79	-0.19	-0.19
Standardabweichung [m]	0.33	0.39	0.13	0.11
RMSE [m]	0.43	2.82	0.23	0.22
Ausreisser	keine	keine	keine	keine

Tabelle 5: Beurteilung der Genauigkeit durch 20 Tachymeter Messpunkte. Die Werte zeigen die Höhendifferenzen aus dem eBee Höhenmodell minus des Tachymeter Höhenwerts.

Aus den Werten wird ersichtlich, dass Höhenmodelle, welche beim fotogrammetrischen Prozess Kontrollpunkte miteinbeziehen, um ein Vielfaches präziser sind. Dies kann anhand der Standardabweichung festgestellt werden, welche bei Höhenmodellen mit Kontrollpunkten im

Vergleich zu solchen ohne etwa dreimal kleiner ist. Weiter ist zu sehen, dass die RGB und NIR Höhenmodelle im Schnitt über den Tachymeter Messpunkten, die RGB_KP und NIR_KP Modelle hingegen unter den Tachymeter Werten liegen. Insbesondere das NIR Modell ist mit einem Mittelwert von 2.79 Metern deutlich zu hoch, was ein Zeichen für einen systematischen Fehler sein könnte. Während man bei den Höhenmodellen ohne Kontrollpunkte auf einen Unterschied bezüglich der Kamera schließen kann, zeigen die RGB_KP und NIR_KP Modelle keinen wesentlichen Unterschied bezüglich ihrer Genauigkeit. Alle Beträge der Höhendifferenzen sind kleiner als $3 \cdot \text{RMSE}$, was ein Zeichen ist, dass keine größeren Fehler vorliegen. Aufgrund der kleinen Anzahl von 20 Referenzpunkten sind die Resultate jedoch mit Vorsicht zu betrachten.

Da die Tachymeter Messungen von sehr hoher Genauigkeit sind, empfiehlt sich auch eine Beurteilung des terrestrischen Laserscans. Tabelle 6 gibt dazu eine Übersicht.

Messgröße	Terrestrischer Laserscan	Distanzen
Mittelwert [m]	-0.06	0.08
Standardabweichung [m]	0.06	0.04
RMSE [m]	0.09	0.09
Ausreisser	2	2

Tabelle 6: Beurteilung der Genauigkeit durch 20 Tachymeter Messpunkte (terrestrischer Laserscan minus Tachymeter Messpunkte). Die Distanzen zeigen die horizontale Entfernung zwischen Tachymeter Messpunkt und dem jeweils nächst gelegenen Laser Messpunkt.

Die Werte zeigen, dass die Genauigkeit des terrestrischen Laserscans im Vergleich zu den eBee Werten um einiges höher ist. Die horizontalen Distanzen zeigen, dass zu den Tachymeter Messpunkten nahe gelegene Laser Messpunkte gefunden wurden. Die maximal gefundene Distanz beträgt weniger als 20 Zentimeter. Dies ist ein wichtiger Faktor, da mit zunehmender horizontaler Distanz auch die vertikalen Unterschiede zunehmen, sofern nicht ebenes Gelände vorliegt, wovon man bei einem solchen Untersuchungsgebiet ausgehen muss. Zu beachten sind auch die zwei Ausreisser. Diese kommen zustande, da beim jeweiligen Tachymeter Messpunkt kein Laser Messpunkt in unmittelbarer Nähe gefunden wurde.

6.1.2 Genauigkeit beurteilt durch terrestrischen Laserscanner

Um auch die räumliche Verteilung der Höhendifferenzen zu betrachten, werden die eBee Höhenmodelle anhand des terrestrischen Laserscans evaluiert. Dazu werden 71'776 Messpunkte, welche gleichmässig über das Untersuchungsgebiet verteilt sind, verwendet. Tabelle 7 gibt eine Übersicht der Resultate.

Messgrösse	RGB	NIR	RGB_KP	NIR_KP
Mittelwert [m]	1.1	2.8	0.14	0.11
Standardabweichung [m]	0.57	0.84	0.17	0.2
RMSE [m]	1.24	2.93	0.23	0.23
Ausreisser	160	4	400	389

Tabelle 7: Beurteilung der eBee Höhenmodelle durch terrestrischen Laserscan (eBee Höhenmodell minus Laserscan).

Wiederum ist der deutliche Unterschied zwischen Höhenmodellen welche ohne und solchen welche mit Kontrollpunkten erhoben wurden. Die Höhenmodelle mit Kontrollpunkten sind dabei bis zu viermal präziser, was an der Standardabweichung ersichtlich wird. Wie bei der Beurteilung durch den Tachymeter sind auch hier keine wesentlichen Unterschiede zwischen RGB und NIR Höhenmodelle ersichtlich, zumindest nicht, wenn diese Kontrollpunkte verwenden. Alle Höhenmodell liegen im Schnitt über den Laserscanner-Messpunkten, wobei der Versatz bei der Verwendung von Kontrollpunkten wesentlich geringer ist. Anhand der $3 \cdot \text{RMSE}$ Regel wurden bis zu 400 Ausreisser identifiziert, was etwa einem halben Prozent aller Werte entspricht. Die Anzahl Ausreisser ist insbesondere beim NIR Modell sehr gering, da dort aufgrund des hohen Mittelwertes auch der ursprüngliche RMSE vergleichsweise sehr gross ist. Um eine genauere Übersicht über die Verteilung der Höhendifferenzen zu erhalten, wurden diese visualisiert. Abbildung 6.1 zeigt daher die räumliche Verteilung der Höhendifferenzen zwischen den NIR beziehungsweise NIR_KP Höhenmodellen und dem terrestrischen Laserscan.

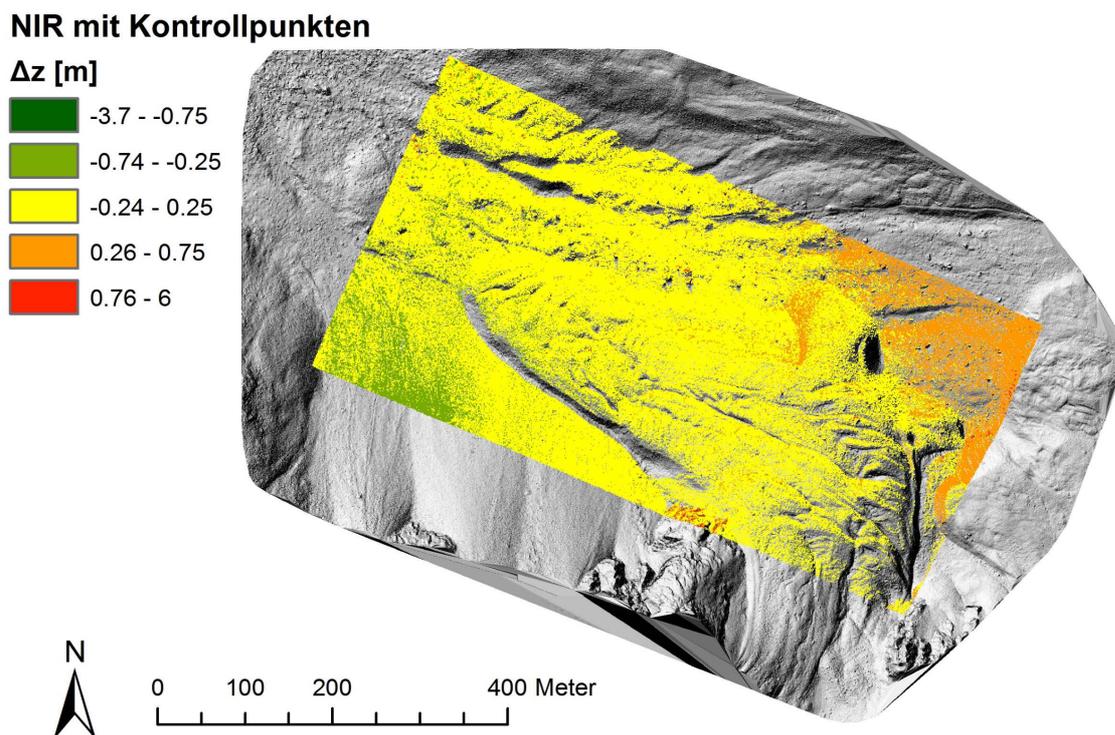
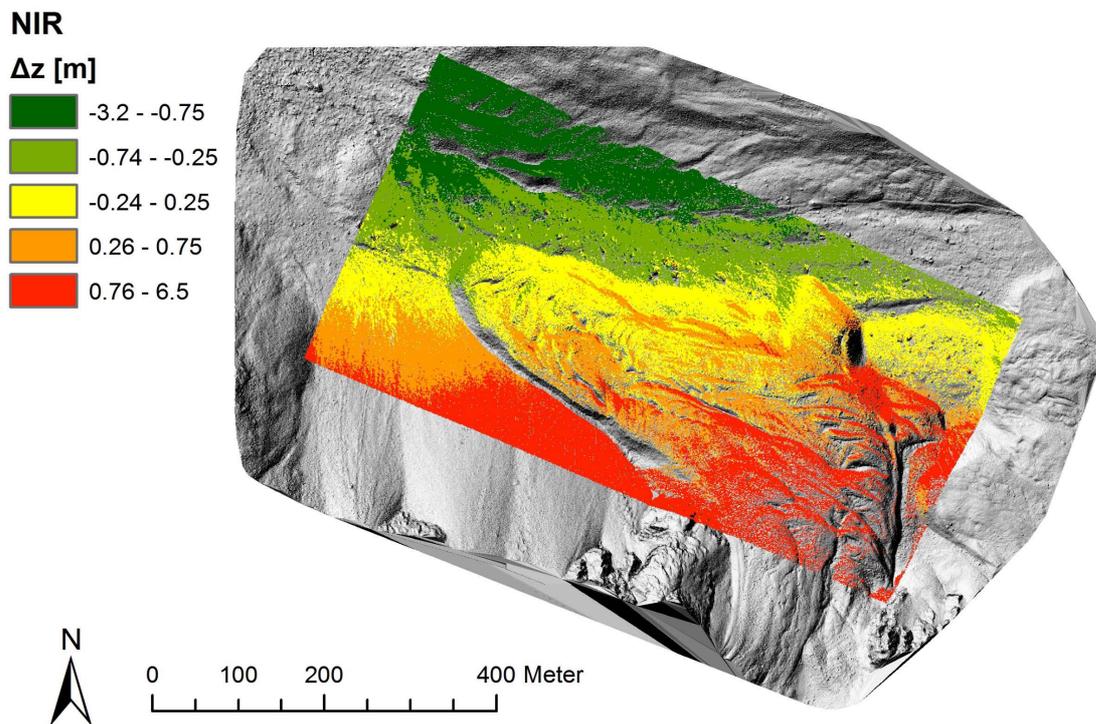


Abbildung 6.1: Räumliche Verteilung zwischen den Höhendifferenzen Δz der eBee Höhenmodelle und dem terrestrischen Laserscan, hinterlegt durch ein schattiertes eBee Höhenmodell. Für die Visualisierung wurden die Höhendifferenzen Δz um den jeweiligen Mittelwert korrigiert. Eigene Darstellung.

Aus der Verteilung der Fehler wird ersichtlich, dass systematische Fehler vorhanden sind. Insbesondere beim NIR Modell ist ein Nord-Süd Trend zu erkennen. Sprich: Im Norden ist das eBee Modell systematisch zu tief, im Süden hingegen systematisch zu hoch. Werden Kontrollpunkte verwendet, sind die Abweichungen wesentlich geringer. Es sind mehr (um den Mittelwert korrigierte) Höhendifferenzen im Bereich von -24 bis +25 Zentimeter (Gelb) vorhanden und nur ein geringer West-Ost Trend ist zu erkennen. Grosse Höhendifferenzen sind in steilem Gelände zu erkennen. Für die RGB und RGB_KP Modelle ergeben sich ähnliche Bilder, auch wenn Beträge und Verläufe der systematischen Fehler unterschiedlich sind.

Test auf Normalverteilung

Bis jetzt wird davon ausgegangen, dass die Höhendifferenzen normalverteilt sind und daher Messgrößen wie der Mittelwert, die Standardabweichung und der RMSE zur Beschreibung der Genauigkeit genügen. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass keine Normalverteilung vorliegt. Daher wird - wie in Absatz 5.4.2 beschrieben - ein visueller Ansatz nach Höhle und Höhle (2009) zum Testen auf Normalverteilung verwendet. Abbildung 6.2 zeigt die Ergebnisse dieser Tests.

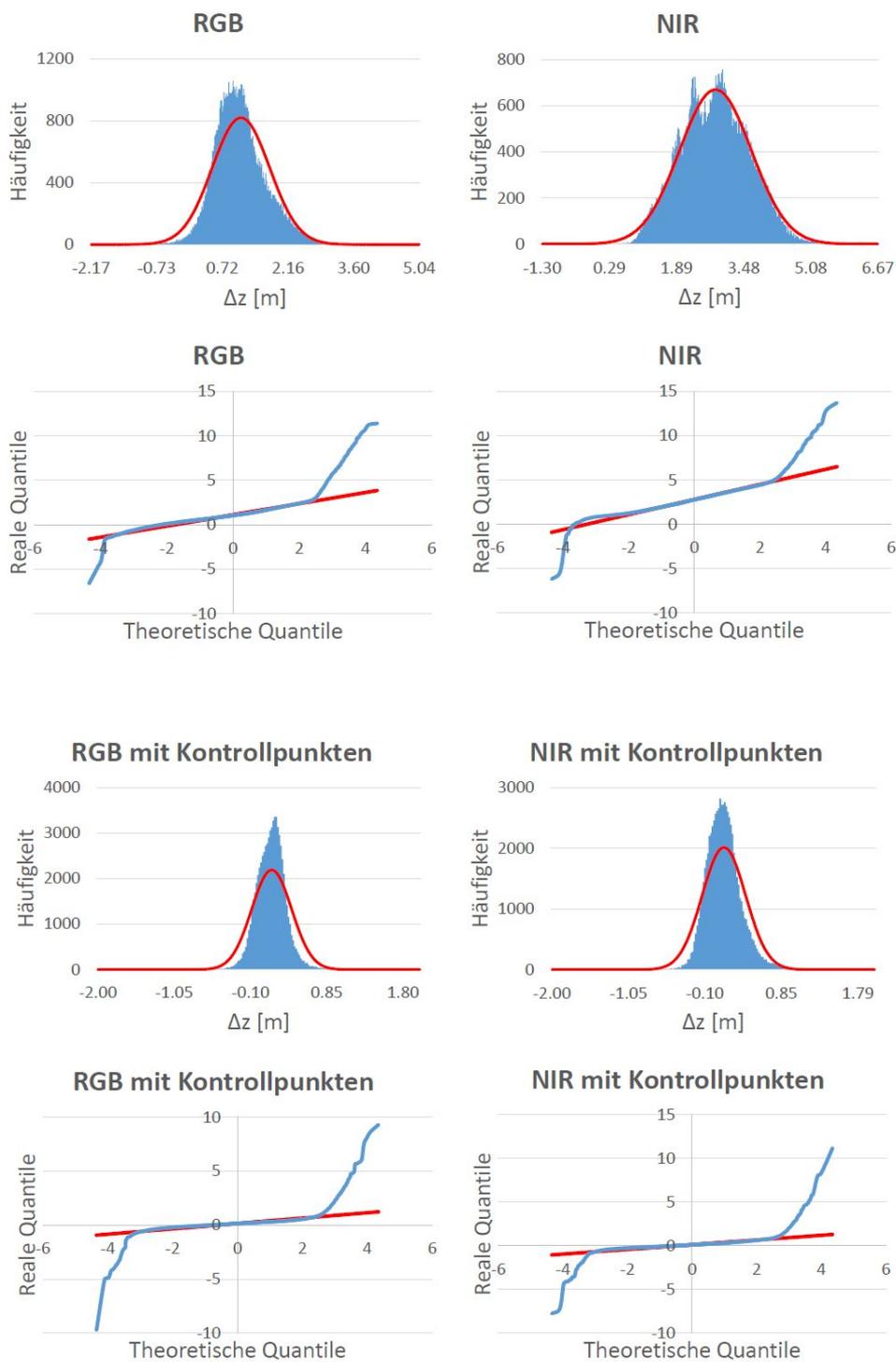


Abbildung 6.2: Die jeweils obere Reihe zeigt die Δz Verteilung (blau), unterlegt mit erwarteten Werten einer Normalverteilung mit Mittelwert und Standardabweichung der aktuellen Fehlerverteilung (rot). Die jeweils untere Reihe zeigt die Quantil-Quantil-Diagramme der Δz Verteilung (blau) sowie Werte der Normalverteilung mit Mittelwert und Standardabweichung der aktuellen Fehlerverteilung (rot). Eigene Darstellung.

Die Histogramme der Höhendifferenzen geben einen ersten Eindruck bezüglich einer Abweichung von den normalverteilten Werten. Bei allen vier Histogrammen sind Abweichungen feststellbar, auch wenn diese eher gering sind. Die Histogramme der Modelle mit Kontrollpunkten weisen eine engere Streuung um den Mittelwert aus, was auf Ausreisser hinweist. Die Quantil-Quantil-Diagramme zeigen ebenfalls eine Abweichung bezüglich der Normalverteilung, wie aus dem Unterschied zwischen blauer und roter Linie ersichtlich wird. Daher ist ersichtlich, dass die Höhendifferenzen nicht normalverteilt sind und dass Ausreisser existieren.

Beurteilung durch statistisch robuste Messgrößen

Um die Genauigkeiten der eBee Höhenmodelle dennoch beschreiben zu können, werden statistisch robuste Messgrößen verwendet (vgl. Abschnitt 2.2.2 und 5.4.2). Tabelle 8 gibt eine Übersicht.

Messgrösse	RGB	NIR	RGB_KP	NIR_KP
Median [m]	1.04	2.79	0.15	0.1
NMAD [m]	0.51	0.85	0.16	0.19
68.3% Quantil [m]	1.29	3.18	0.23	0.21
95% Quantil [m]	2.12	4.14	0.43	0.49
Ausreisser	160	4	400	389

Tabelle 8: Beurteilung der Genauigkeit durch den terrestrischen Laserscan (eBee Höhenmodell minus Laserscan) anhand statistisch robuster Messgrößen.

Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Verwendung der vorhergehenden Messgrößen. Höhenmodelle mit Kontrollpunkten sind wiederum präziser und der Median liegt näher beim Nullpunkt. Werden Kontrollpunkte verwendet, gibt es keine bemerkenswerten Unterschiede zwischen dem RGB_KP und NIR_KP Höhenmodell. Erwähnenswert sind auch die 95% Quantile des RGB_KP und NIR_KP Modells, welche aufzeigen, dass 95% aller Höhendifferenzen kleiner als 50 Zentimeter sind. Interessant ist auch zu sehen, dass der Median in etwa dem Mittelwert und der NMAD der Standardabweichung entspricht, obwohl die Höhendifferenzen nicht normalverteilt sind. Es ist jedoch ein Argument dafür, dass die Abweichung von der Normalverteilung nicht besonders gross ist.

6.1.3 Räumlich Verteilung der Höhendifferenzen

In diesem Abschnitt werden die Höhendifferenzen bezüglich ihrer Abhängigkeit zur Hangneigung, Oberflächenbeschaffenheit und Beleuchtung hin untersucht. Die Tabellen zeigen dabei die unkorrigierten Werte.

Abhängigkeit bezüglich Hangneigung

Abbildung 6.3 zeigt die Abhängigkeit der Höhendifferenzen bezüglich der Hangneigung. Daraus wird ersichtlich, dass mit zunehmender Hangneigung die Genauigkeit, hier mit dem RMSE beschrieben, abnimmt. Der RMSE bleibt bis 30-35° mehrheitlich konstant und nimmt danach scheinbar exponentiell zu. Bis 25° kann ein leichter Unterschied zwischen den beiden Höhenmodellen festgestellt werden, wobei der RMSE des RGB_KP Modells etwa drei Zentimeter tiefer als derjenige des NIR_KP Modells ist. Im sehr steilen Bereich hingegen liegt der RMSE des NIR_KP Modells um bis zu 22 Zentimeter tiefer. Die Unterschiede sind jedoch nur gering und der allgemeine Trend der beiden Modelle lässt auf keine grösseren Unterschiede schliessen. In dieser Abbildung ist auch die Verteilung der Messpunkte bezüglich der Hangneigung zu erkennen, welche bei 20-25° ihr Maximum hat.

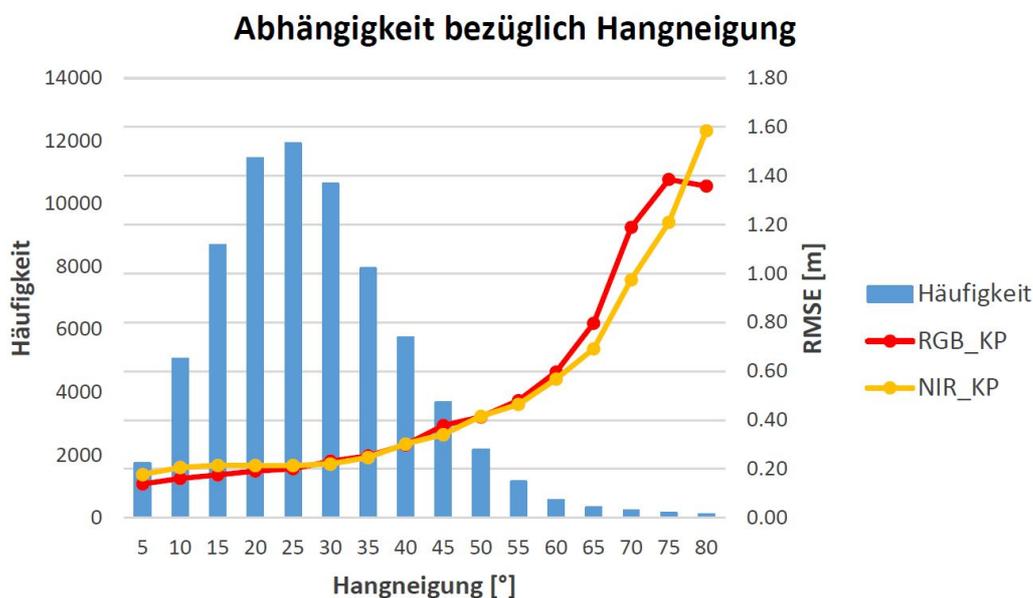


Abbildung 6.3: Abhängigkeit der Höhendifferenzen bezüglich der Hangneigung. Eigene Darstellung.

Tabelle 9 zeigt noch Details zu den einzelnen Hangneigungsbereichen des RGB_KP Modells. Dabei ist zu erkennen, dass auch der Mittelwert, die Standardabweichung und der Median mit zunehmender Hangneigung zunehmen. Es wird ersichtlich, dass in flachen Untersuchungsgebieten höhere Genauigkeiten erreicht werden können als in Untersuchungsgebieten, wie sie in dieser Arbeit vorliegen.

Messgrösse	0-10°	10-20°	20-30°	30-40°	40-50°	50-60°	60-70°	70-80°
Mittelwert [m]	0.06	0.1	0.14	0.2	0.27	0.33	0.5	0.72
Stabw. [m]	0.15	0.16	0.17	0.19	0.28	0.4	0.84	1.17
RMSE [m]	0.16	0.19	0.22	0.27	0.39	0.52	0.98	1.37
Median [m]	0.05	0.11	0.15	0.21	0.27	0.31	0.39	0.55

Tabelle 9: Abhängigkeit der Höhendifferenzen des RGB_KP Höhenmodells bezüglich der Hangneigung.

Abhängigkeit bezüglich Bodenbeschaffenheit

Um die Abhängigkeit der Höhendifferenzen bezüglich der Bodenbeschaffenheit hin zu untersuchen, wird zuerst die Vegetation klassiert. Dazu dienen 20 Stichproben, welche die spektralen Eigenschaften des NIR_KP Orthofotomosaik für Vegetationsgebiete wiedergeben. Aus den Stichproben wird so ein Filter erstellt, um Messpunkte, welche in Vegetationsgebieten liegen, zu erkennen. Es existieren drei Kanäle mit Werten von 0-255, wobei 0 für keine und 255 für die höchste Reflexion des jeweiligen Kanals steht. Um das Orthofotomosaik zu erhalten, werden den Kanälen Farben zugewiesen, welche entsprechend den Reflexionen dargestellt werden. Um die Vegetationsbereiche zu erhalten, wird in dieser Arbeit ein Filter verwendet, bei welchem im ersten Kanal alle Werte grösser als 130 und im zweiten Kanal alle Werte kleiner als 130 sind. Somit werden nur Messwerte berücksichtigt, welche in Vegetationsgebieten liegen. Die übrigen Werte repräsentieren steinige Oberflächen wie sie auf Blockgletschern oder in Schutthalden zu finden sind. Gebiete mit und ohne Vegetation wurden getrennt untersucht, wobei die Resultate in Tabelle 10 ersichtlich sind.

Messgrösse / Modell	Vegetation		Keine Vegetation	
	RGB_KP	NIR_KP	RGB_KP	NIR_KP
Mittelwert [m]	0.08	0.11	0.17	0.12
Standardabweichung [m]	0.14	0.17	0.27	0.29
RMSE [m]	0.16	0.2	0.32	0.32
Anzahl Messpunkte	18'052		53'714	

Tabelle 10: Abhängigkeit der Höhendifferenzen bezüglich Oberflächenbeschaffenheit. Es wird zwischen Vegetation / keine Vegetation unterschieden.

Zwischen den beiden Bodentypen Vegetation und keine Vegetation (steinige Oberfläche) kann ein Unterschied festgestellt werden. Die Genauigkeit von Vegetationsgebieten ist deutlich höher, wie der Vergleich der einzelnen Werte zeigt. Auch zwischen den beiden Modellen sind Unterschiede feststellbar. Es scheint, dass zur Untersuchung von Vegetationsgebieten RGB Modelle besser geeignet sind und für steinige Oberflächen NIR Modelle, obwohl der Unterschied zwischen den Modellen bei steinigten Oberflächen gering ist. Vergleicht man die beiden Oberflächentypen, muss auch die Anzahl der Messpunkte beachtet werden. Diese ist für steinige Gebiete wesentlich grösser, was auch einen Einfluss auf die Streuung der einzelnen Höhendifferenzen und somit auf die Ergebnisse haben kann. Zudem können andere Faktoren mit den beiden Oberflächentypen korrelieren, wie zum Beispiel die Beleuchtung oder die Hangneigung. Die Vegetationsgebiete besitzen beispielsweise mit einer durchschnittlichen Hangneigung von 20° einen tieferen Wert als die Gebiete ohne Vegetation mit einer durchschnittlichen Hangneigung von 27°.

Abhängigkeit bezüglich Beleuchtung

Aufgrund der Verwendung des zweiten Spektralkanals des RGB_KP Orthofotomosaiks werden nur Resultate des RGB_KP Modells vorgestellt. Abbildung 6.4 zeigt die Resultate der Untersuchung, während die Tabelle 11 detaillierte Informationen zu den einzelnen Bereichen liefert.

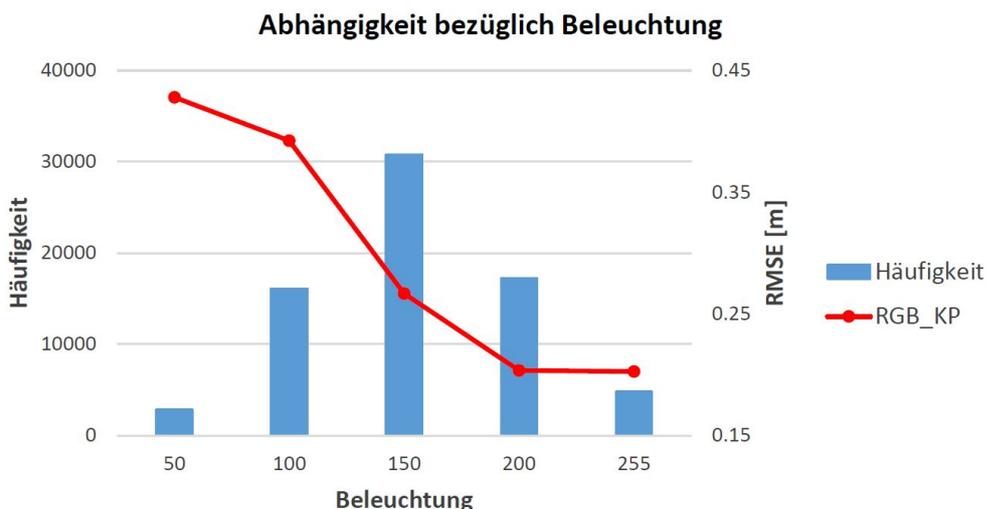


Abbildung 6.4: Abhängigkeit der Höhendifferenzen bezüglich der Beleuchtung. Die Beleuchtung wird anhand der Reflexion des zweiten Spektralkanals des RGB_KP Orthofotomosaiks gemessen (0 = keine Reflexion = schwarz; 255 = maximale Reflexion = weiss). Eigene Darstellung.

Messgrösse / Beleuchtung	0-50	50-100	100-150	150-200	200-255
Mittelwert [m]	0.38	0.22	0.14	0.1	0.07
Stabw. [m]	0.19	0.32	0.23	0.17	0.19
RMSE [m]	0.43	0.39	0.27	0.2	0.2
Median [m]	0.36	0.22	0.14	0.11	0.07

Tabelle 11: Abhängigkeit der Höhendifferenzen bezüglich der Beleuchtung.

Es ist ein klarer Trend zu beobachten: Mit zunehmender Beleuchtung nimmt die Genauigkeit des Höhenmodells zu, was anhand der einzelnen Messgrössen zu erkennen ist. Der Mittelwert und Median nähern sich zunehmend dem Nullpunkt, während der RMSE kleiner wird und schliesslich auf einem konstanten Niveau bleibt. Die Standardabweichung nimmt als einziges mit zunehmender Beleuchtung zuerst zu und anschliessend wieder ab, während der letzte Wert wiederum eine leichte Zunahme verzeichnet. Die Verteilung der Häufigkeit der einzelnen Höhendifferenzen zeigt, dass sich die meisten Werte zwischen 100 und 200 befinden, was für eine gute Beleuchtung des Bildes spricht. Auch hier müssen externe Faktoren beachtet werden, welche mit der Beleuchtung korrelieren. So existieren beispielsweise in grobblockigem Umfeld mehr Schattenwürfe im Vergleich zu flachen, gleichmässig beleuchteten Gebieten, was einen Einfluss auf die Genauigkeit haben kann.

6.2 Deformationsanalyse anhand der eBee Höhenmodelle

Die Resultate der Deformationsanalyse sind nach der horizontalen Oberflächenverschiebung, der dreidimensionalen Oberflächenverschiebung und der vertikalen Höhenänderung aufgeteilt.

6.2.1 Horizontale Oberflächenverschiebung

Die horizontale Oberflächenverschiebung wird mit der CIAS Bild-Korrelationssoftware (Käab und Vollmer 2000) berechnet. Für das Untersuchungsgebiet existiert alle fünf Meter eine Messung, was ein Total von 8052 Messungen ergibt. Zu jeder Messung wird jeweils die horizontale Verschiebung berechnet. Die Qualität der Resultate ist im wesentlichen von vier Faktoren der Eingabedaten abhängig:

- der Auflösung der digitalen Höhenmodelle (0.1, 0.25 oder 0.5 Meter),
- der Grösse des Referenzblocks (Länge und Breite je 5, 10 oder 20 Pixel) und des dazugehörigen Testgebietes (Länge und Breite je 10, 20 oder 40 Pixel),
- ob die Höhenmodelle schattiert sind oder nicht,
- ob es sich um das RGB_KP oder das NIR_KP Modell handelt.

Da nur Verschiebungen verwendet werden, deren Korrelationskoeffizient grösser als 0.8 und das Signal-Rausch-Verhältnis grösser als zwei ist, dient die Anzahl Verschiebungen, welche diese Kriterien erfüllen, als Vergleichsgrundlage. Zusätzlich werden die Verschiebungen dargestellt und visuell analysiert. Um die Faktoren einzeln zu untersuchen, wird jeweils ein Faktor variiert, während die anderen konstant bleiben. In den folgenden Tabellen zeigt die zweite Spalte jeweils den prozentualen Anteil an Verschiebungen an, deren Korrelationskoeffizient grösser als 0.8 ist. Davon werden noch die Verschiebungen abgezogen, deren Signal-Rausch-Verhältnis kleiner als zwei ist, was in der dritten Spalte dargestellt wird. Die dritte Spalte zeigt somit den prozentualen Anteil der insgesamt 8'052 Verschiebungen, welche anschliessend für die Visualisierung benutzt wurden.

Einfluss der Auflösung der digitalen Höhenmodelle

Tabelle 12 gibt einen Überblick auf die Auswirkung der verschiedenen Auflösungen, welche für die Berechnungen verwendet wurden.

Auflösung	Korrelationskoeffizient > 0.8 [%]	und Signal-Rausch-Verhältnis > 2 [%]
10 cm	11.9	7.6
25 cm	47.4	41.8
50 cm	80.8	76.1

Tabelle 12: Die Tabelle zeigt die Anzahl Verschiebungen, welche die Auswahlkriterien erfüllen. Die Daten stammen aus dem schattierten RGB_KP Modell und es wird eine Länge und Breite des Referenzblocks von je 20 Pixeln verwendet.

Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Auflösung mehr Verschiebungen die Auswahlkriterien erfüllen. Die meisten Verschiebungen bei einer Auflösung von zehn Zentimeter sind willkürlich bezüglich ihrer Länge und Richtung und werden von den Kriterien herausgefiltert. Die restlichen 7.6% zeigen vereinzelte Verschiebungen in Fließrichtung des Blockgletschers, wie sie zu erwarten sind. Aufgrund der geringen Anzahl ist die Verwendung dieser Auflösung jedoch ungeeignet, auch wenn aufgrund der hohen Auflösung theoretisch kleinräumige Verschiebungen erkennbar sein könnten. Bei der Verwendung einer Auflösung von 25 Zentimeter zeichnet sich bereits in den ungefilterten Verschiebungen ein Muster ab, welches die zu erwartenden Fließstrukturen des Blockgletscher wiedergibt. Die besten Resultate liefert jedoch die Verwendung einer Auflösung von 50 Zentimetern. Da diese Auflösung eine Glättung der Höhenmodelle bewirkt, werden kleine Unebenheiten entfernt. Dieser Effekt führt dazu, dass die beiden Höhenmodelle von 2014 und 2015 besonders gut verglichen werden können. Dies wird auch an den 76.1% der Verschiebungen ersichtlich, welche die Auswahlkriterien erfüllen.

Einfluss der Grösse des Referenzblocks und des dazugehörigen Testgebietes

Tabelle 13 zeigt die Resultate, welche den Einfluss der Grösse des Referenzblocks und des dazugehörigen Testgebietes beschreibt.

Grösse [Pixel]	Korrelationskoeffizient > 0.8 [%]	und Signal-Rausch-Verhältnis > 2 [%]
5 und 10	69	55.3
10 und 20	69.3	60.4
20 und 40	80.8	76.1

Tabelle 13: Die Grösse (Länge und Breite je 5, 10 oder 20 Pixel) des Referenzblocks ist in der ersten Spalte angegeben, wobei das Testgebiet stets die doppelte Grösse besitzt. Die Daten stammen aus dem schattierten RGB_KP Modell mit einer Auflösung von 0.5 Meter.

Mit zunehmender Grösse des Referenzblocks und des dazugehörigen Testgebietes steigt die Anzahl Verschiebungen, welche die Auswahlkriterien erfüllen. Betrachtet man die Darstellung der Resultate, so zeigen sich bei einer Grösse von 5 respektive 10 Pixel viele Verschiebungen, welche aufgrund ihrer Länge und Richtung nicht existieren sollten (beispielsweise Verschiebungen gegen die Fliessrichtung hangaufwärts). Diese falschen Zuteilungen können auch durch die Auswahlkriterien nicht entfernt werden. Je grösser der Referenzblock gewählt wird, desto einheitlicher sind Beträge und Richtungen der Verschiebungen und falsche Zuteilungen können verhindert werden. Jedoch sind kleinräumige Verschiebungen dadurch nicht beobachtbar.

Einfluss der Schummerung

Die Software erlaubt die Benutzung von schattierten Höhenmodellen (Schummerung) oder von Höhenmodellen, deren Werte durch eine Graustufung dargestellt werden. Tabelle 14 zeigt, welche Unterschiede dabei zustande kommen.

Schummerung	Korrelationskoeffizient > 0.8 [%]	und Signal-Rausch-Verhältnis > 2 [%]
Ja	80.8	76.1
Nein	99.9	5.9

Tabelle 14: Die Tabelle zeigt den Unterschied zwischen einem schattierten und einem Graustufen Höhenmodell. Die Daten stammen aus dem RGB_KP Modell mit einer Auflösung von 0.5 Metern. Die Länge und Breite des Referenzblocks beträgt je 20 Pixel.

Die ungefilterten Verschiebungen sind in der Darstellung praktisch identisch. Werden die Auswahlkriterien jedoch angewendet, ergibt sich ein anderes Bild. Das Höhenmodell, welches die Werte durch eine Graustufung darstellt, enthält nur eine Verschiebung, welche einen Korrelationskoeffizienten von kleiner als 0.8 besitzt. Wird jedoch das Signal-Rausch-Verhältnis betrachtet, erfüllen nur 5.9% der Verschiebungen die Kriterien. Werden diese dargestellt, zeigen sie Verschiebungen am Rand des Untersuchungsgebiets, welche als Radeffekte auftreten und als Fehler zu handhaben sind. Somit zeigt sich, dass die Auswahlkriterien, welche in dieser Arbeit angewendet werden, für Höhenmodelle, welche die Werte durch eine Graustufung darstellen, nicht geeignet sind.

Unterschied zwischen RGB_KP und NIR_KP

Schlussendlich wird der Einfluss der unterschiedlichen Höhenmodelle betrachtet. Tabelle 15 stellt die Resultate dar.

Modell	Korrelationskoeffizient > 0.8 [%]	und Signal-Rausch-Verhältnis > 2 [%]
RGB_KP	80.8	76.1
NIR_KP	82.3	78.2

Tabelle 15: Die Daten stammen aus den zwei angegebenen digitalen Höhenmodellen, wobei beide schattiert sind und eine Auflösung von 0.5 Metern besitzen. Die Länge und Breite des Referenzblocks beträgt je 20 Pixel.

Wie aus den Resultaten ersichtlich wird, existieren praktisch keine Unterschiede zwischen den zwei Typen. Die NIR_KP Modelle weisen einen etwas höheren Anteil an verwendbaren Verschiebungen auf. Es ist jedoch fraglich, ob diese aufgrund der Verwendung der S110 NIR Kamera zustande kommen. Werden die beiden Resultate visualisiert, zeigen sich auch dort keine grösseren Unterschiede.

Eigenschaften der Verschiebungen

Abbildung 6.5 zeigt die Resultate der horizontalen Oberflächenverschiebungen des Blockgletschers Muragl über zehn Monate hinweg. Die Daten stammen dabei aus den schattierten RGB_KP Modellen mit einer Auflösung von 50 Zentimetern und einer Referenzblockgrösse von 20 Pixeln. In Tabelle 16 sind die Eigenschaften der Verschiebungen dargestellt. Es werden nur die Verschiebungen verwendet, welche auf dem Blockgletscher zu finden sind, was einer Anzahl von 2'646 Verschiebungen entspricht.

Messgrösse	Horizontale Verschiebungen
Minimum [m]	0
Maximum [m]	2.07
Mittelwert [m]	0.68
Standardabweichung [m]	0.43

Tabelle 16: Eigenschaften der horizontalen Verschiebungen über zehn Monate hinweg. Die Daten stammen aus den schattierten RGB_KP Modellen mit einer Auflösung von 50 Zentimetern und einer Referenzblockgrösse von 20 Pixeln. Mögliche Ausreisser wurden nicht entfernt.

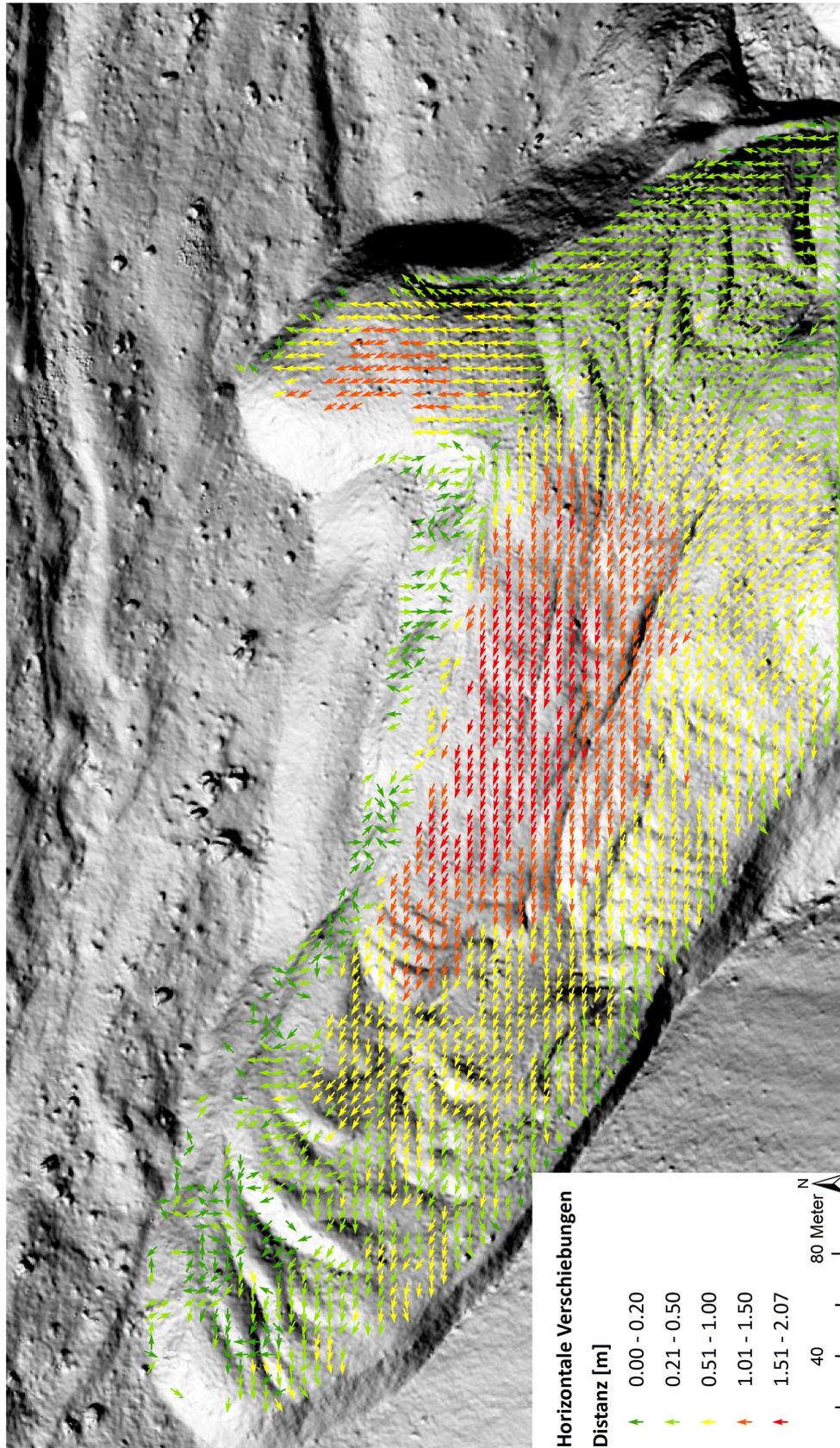


Abbildung 6.5: Horizontale Verschiebungen über zehn Monate hinweg, hinterlegt durch eine schattiertes eBee Höhenmodell. Eigene Darstellung.

Wie aus der Abbildung 6.5 zu sehen ist, existieren zwei Zonen mit hohen Fließgeschwindigkeiten: zum einen auf der nordwärts ausbrechenden Zunge (0.5-1.5 Meter pro Jahr) und zum anderen auf der nördlichen Seite des mittleren Hauptteils, welcher sich nordwestlich bewegt (bis zu 2 Meter pro Jahr). Die südliche Seite hingegen besitzt mit horizontalen Verschiebungen um die 0.5-1.0 Meter pro Jahr deutlich geringere Fließgeschwindigkeiten. Ebenso sind auch die Fließgeschwindigkeiten im oberen Teil des Blockgletschers geringer, insbesondere auf der östlichen Seite, welche zur nördlich ausbrechenden Zunge führt. Der unterste Teil des Blockgletschers weist sehr geringe bis keine Verschiebungen auf. Über den ganzen Blockgletscher hinweg betrachtet, variieren die Verschiebungen relativ stark, was aus den Werten der Tabelle 16 zu entnehmen ist. Bei der Betrachtung der Resultate ist zu beachten, dass die Lagegenauigkeit der verwendeten digitalen Höhenmodelle nicht bekannt ist. Es kann daher sein, dass Verschiebungen aufgrund eines Versatzes der beiden Höhenmodelle zustande gekommen sind. Geringe Verschiebungsbeträge müssen daher mit Vorsicht betrachtet werden.

6.2.2 Dreidimensionale Oberflächenverschiebung

Anhand der horizontalen Verschiebungen (X und Y Komponente) kann mithilfe der beiden digitalen Höhenmodelle die vertikale Verschiebung (Z Komponente) berechnet werden. Tabelle 17 zeigt die Eigenschaften dieser Komponente.

Messgrösse	Vertikale Verschiebungen	3D Verschiebungsbetrag
Minimum [m]	-1	0.01
Maximum [m]	0.81	2.26
Mittelwert [m]	-0.27	0.75
Standardabweichung [m]	0.24	0.47

Tabelle 17: Die vertikale Verschiebung entspricht der Höhenänderung, welche sich aus der horizontalen Verschiebung bedingten Höhenänderung sowie der vertikalen Höhenänderung zusammensetzt. Positive Werte stehen für einen Höhengewinn, negative für einen Höhenverlust. Der 3D Verschiebungsbetrag beschreibt die Länge der dreidimensionalen Verschiebung und setzt sich aus der horizontalen und vertikalen Verschiebung zusammen. Mögliche Ausreisser wurden nicht entfernt.

Die vertikalen Verschiebungen beschreiben, dass ein Objekt auf dem Blockgletscher im Schnitt pro Jahr 27 Zentimeter Höhenlage einbüsst. Der minimale und insbesondere maximale Wert, welcher einer Hebung von 81 Zentimeter entspricht, muss mit Vorsicht betrachtet

werden, da es sich um Ausreisser handeln könnte. Wie aus der Beurteilung der Genauigkeiten der digitalen Höhenmodelle ersichtlich wird, liegt die Genauigkeit der Höhenmodelle im Bereich der hier beschriebenen vertikalen Verschiebungen. Daher sei die Aussagekraft der hier präsentierten Werte infrage gestellt. Jedoch liegen die Werte im Erwartungsbereich und können daher nicht grundsätzlich als falsch eingestuft werden. Die Darstellung der dreidimensionalen Oberflächenverschiebung erlaubt die Betrachtung der Verschiebungen in 3D. Jedoch gestaltet sich eine übersichtliche dreidimensionale Darstellung in dieser Arbeit als schwierig. Daher wird hier auf eine dreidimensionale Darstellung verzichtet. Stattdessen zeigt die Abbildung 6.6 die Beträge der vertikalen Verschiebungen. Es ist offensichtlich, dass die Beträge wesentlich von den horizontalen Verschiebungen abhängig sind (vgl Abb. 6.5). Zu beachten sind auch die um einiges geringeren Beträge.

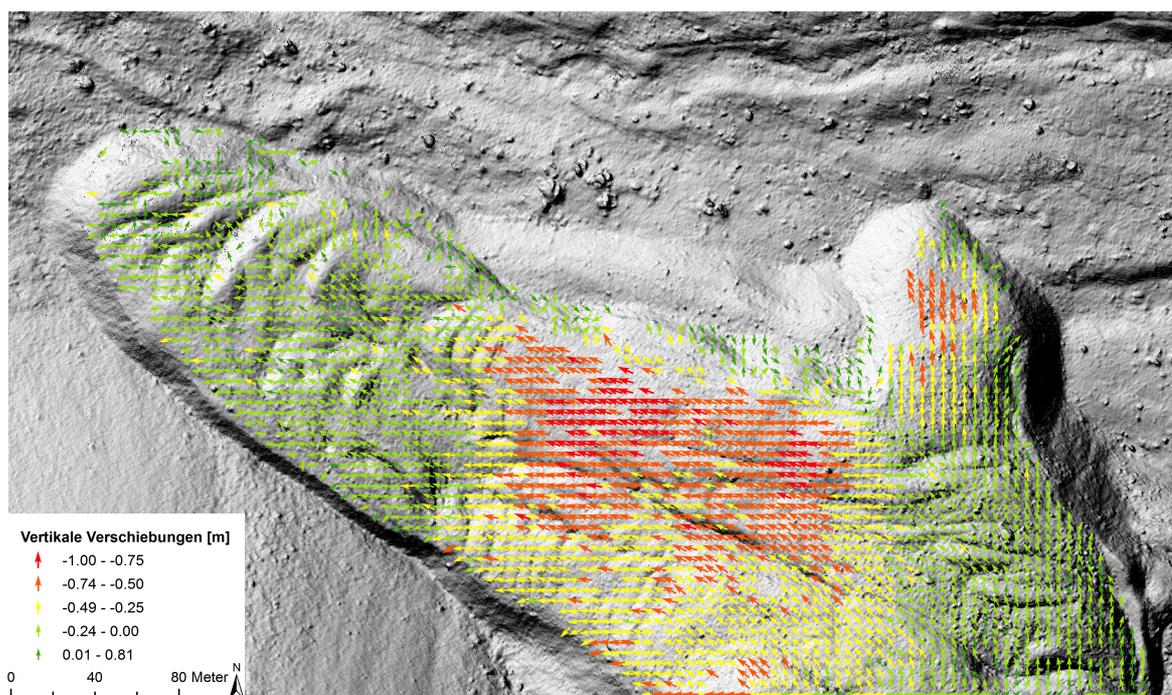


Abbildung 6.6: Beträge der vertikalen Verschiebungen. Die Pfeile zeigen die Richtung der zugehörigen horizontalen Verschiebung, hinterlegt durch ein schattiertes eBee Höhenmodell. Eigene Darstellung.

6.2.3 Vertikale Höhenänderung

Die Differenz zwischen den Werten der Höhenmodelle von 2014 und 2015 ergibt die vertikale Höhenänderung. Dabei werden die Höhenwerte von 2015 von denjenigen aus dem Jahr 2014 abgezogen. Negative Höhenänderungen repräsentieren somit Senkungsprozesse, während positive Höhenänderungen Hebungsprozesse darstellen. Aufgrund der Resultate aus der Beurteilung der Genauigkeit ist ersichtlich, dass kleine Höhenänderungen von den Ergebnissen ausgeschlossen werden müssen, da es sich um Fehler handeln könnte. Für die Darstellung werden daher nur Höhenänderungen verwendet, deren Beträge grösser als +20 Zentimeter beziehungsweise kleiner als -20 Zentimeter sind. Abbildung 6.7 zeigt die räumliche Verteilung der Höhenänderungen, während in Tabelle 18 die Eigenschaften der Höhenänderungen zu sehen sind.

Messgrösse	Vertikale Höhenänderung
Minimum [m]	-1.96
Maximum [m]	1.84
Mittelwert [m]	-0.03
Standardabweichung [m]	0.15

Tabelle 18: Vertikale Höhenänderung des Blockgletschers Muragl basierend auf den beiden RGB_KP Modellen mit einer Auflösung von jeweils 0.5 Metern. Mögliche Ausreisser wurden nicht entfernt.

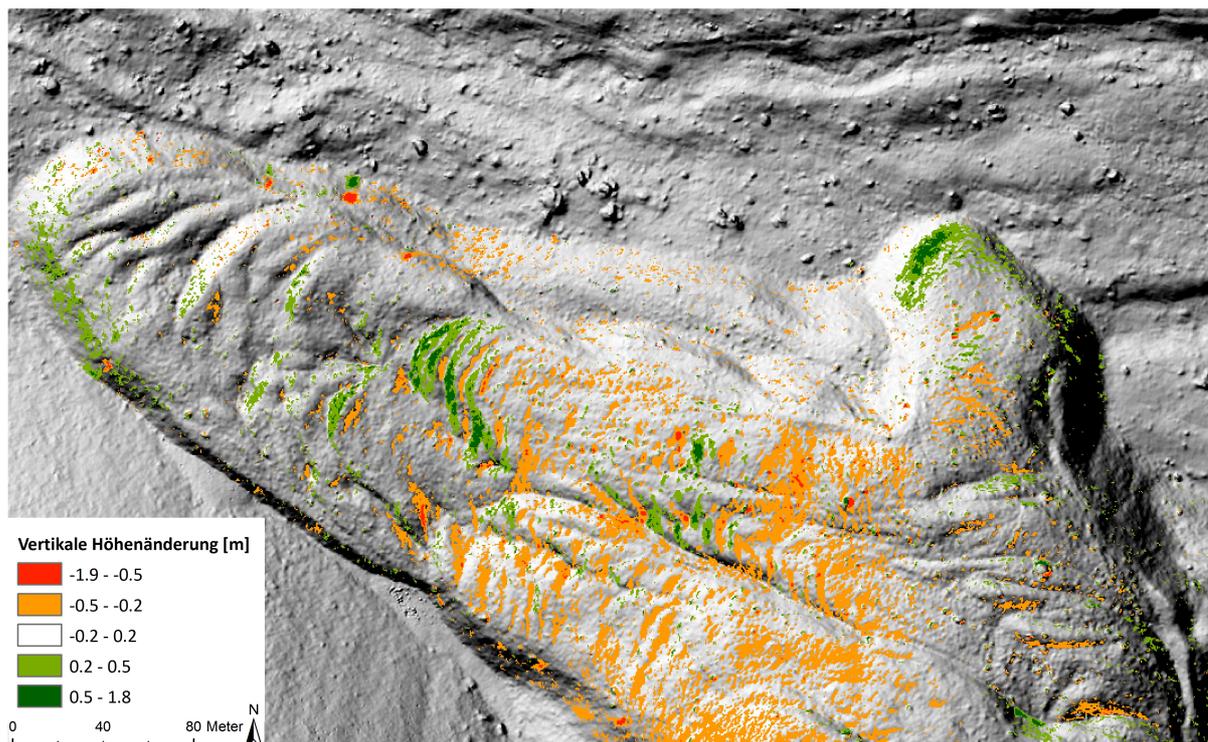


Abbildung 6.7: Vertikale Höhenänderung des Blockgletschers Muragl basierend auf den beiden RGB_KP Modellen mit einer Auflösung von jeweils 0.5 Metern. Werte zwischen -0.2 und +0.2 Meter werden nicht dargestellt. Unterlegt durch das schattierte RGB_KP Modell aus dem Jahr 2015. Eigene Darstellung.

In der Abbildung 6.7 sind leichte, jedoch relativ flächendeckende Senkungsprozesse im oberen und mittleren Teil des Blockgletschers erkennbar. Auf der oberen westlichen Seite scheint das Gelände hingegen mehr oder weniger stabil zu sein, wie auch im untersten Teil des Blockgletschers. Besonders gut erkennbar sind die einzelnen Vorstöße der Loben im mittleren nördlichen Teil sowie der Vorstoss der nordwärts ausbrechenden Front. Diese Vorstöße resultieren in einer erkennbaren Zunahme der Geländehöhe. Während auf der nördlich ausbrechenden Front die meisten Höhenänderungen im Bereich von 30-70 Zentimetern liegen, sind im mittleren nördlichen Teil Höhenänderung im Bereich von 30-100 Zentimetern anzutreffen. Aus den Werten der Tabelle 18 ist zu entnehmen, dass mit einer mittleren Abnahme von 3 Zentimetern nur ein geringer Trend zu beobachten ist, welcher aufgrund seiner Größenordnung aber auch infrage gestellt werden muss. Die meisten Höhenänderungen liegen zudem im Bereich von wenigen Zentimetern, was aus der Standardabweichung ersichtlich wird, und müssen aufgrund der Genauigkeiten der beiden Höhenmodelle von der Interpretation ausgeschlossen werden.

7 Diskussion

In diesem Kapitel folgt die Diskussion der Resultate. Ein Vergleich zeigt die Unterschiede zu Untersuchungen in anderen Studien auf. Potentielle Probleme, welche die Resultate beeinflussen, werden aufgezeigt, sodass eine differenzierte Betrachtung der Ergebnisse ermöglicht wird. Die Gliederung des Kapitels ist entsprechend den Resultaten gestaltet.

7.1 Diskussion der Genauigkeit

In dieser Arbeit wird die Genauigkeit der digitalen Höhenmodelle einer eBee Kartografie-Drohne anhand der Referenzdaten eines Tachymeters und eines terrestrischen Laserscanners beurteilt. Die Resultate der Beurteilung sind dabei einerseits von den Daten der eBee Drohne und deren Prozessierung, andererseits jedoch auch von den Eigenschaften der Referenzdaten abhängig. Dabei wird stets angenommen, dass die Referenzdaten dem wahren Wert entsprechen, was ein Irrtum ist. In gegebener Situation ist diese Annahme jedoch eine Notwendigkeit, da der wahre Wert nicht aus theoretischen Überlegungen hergeleitet werden kann. Ebenso ist die Beschreibung der Genauigkeit durch die Messunsicherheit keine Alternative, da die Erhebung einer genügenden Anzahl von Wiederholungsmessungen unter ähnlichen Bedingungen aus praktischen Gründen nicht möglich ist. Daher müssen die Eigenschaften der Referenzdaten neben denen der eBee Kartografie-Drohne bei der Diskussion der Resultate stets miteinbezogen werden.

7.1.1 Genauigkeit beurteilt durch Tachymeter

Eigenschaften

Das Benutzen von geodätischen Messpunkten zur Evaluierung von fotogrammetrisch erhobenen digitalen Höhenmodellen ist eine gängige Methode (Höhle und Höhle 2009). Die 20 Tachymeter Messpunkte sind von hoher Genauigkeit und erlauben eine erste Beurteilung der eBee Höhenmodelle. In der Literatur sind einige Studien zu finden, welche UAS generierte digitale Höhenmodell anhand von geodätischen Messpunkten auswerten (Harwin und Lucieer 2012; Immerzeel et al. 2014; Woodget et al. 2015). Ein Vergleich mit Werten aus anderen Untersuchungen ist jedoch schwierig, da aufgrund der unterschiedlichen Faktoren bei der Datenerhebung kaum ähnliche Bedingungen vorliegen. Die grosse Vielfalt an UAS, die verwendete Software, die Flughöhe oder das Untersuchungsgebiet sind nur einige Faktoren, welche zwischen den einzelnen Untersuchungen stark variieren und einen Vergleich erschweren. Mit ei-

ner vertikalen Genauigkeit im Bereich von 23-24 Zentimetern (RMSE = 0.23 bis 0.24 m) bei der Verwendung von Kontrollpunkten liegen die Werte jedoch über dem vom Hersteller angegebenen Wert von 0.07-0.21 Metern (1-3*Auflösung; vgl. Tabelle 3 und 4). Dabei bestätigt die Literatur, dass für UAS normalerweise eine Genauigkeit eines RMSE von zwei bis dreimal der Auflösung vorliegt (Nex und Remondino 2014). Dies lässt darauf schliessen, dass in komplexem Untersuchungsgelände, wie es in dieser Arbeit vorliegt, mit leicht niedrigeren Genauigkeiten zu rechnen ist.

Potentielle Probleme

Trotz der hohen Genauigkeit der Tachymeter Messpunkte gibt es Vorbehalte, diese zur Auswertung der Höhenmodelle zu verwenden. Die 20 Messpunkte sind zwar über den ganzen Blockgletscher repräsentativ verteilt, jedoch befinden sich viele dieser Standorte auf grösseren Steinen. Dabei ist die genaue Position der Messpunkte oft an der höchsten Stelle des Steins. Die negativen Mittelwerte der eBee Höhenmodelle sowie die des terrestrischen Laserscans sind allenfalls eine Folge davon. Ein weiterer Punkt ist die geringe Anzahl an Messpunkten. Diese erlaubt keine differenzierte Betrachtung von verschiedenen Aspekten der Höhenmodelle wie zum Beispiel das Erkennen von räumlichen Mustern. Daher sind die 20 Tachymeter Messpunkte zur Beurteilung der Genauigkeiten der eBee Höhenmodelle nur bedingt geeignet.

7.1.2 Genauigkeit beurteilt durch terrestrischen Laserscanner

Obwohl, wie aus den Resultaten der Beurteilung durch den Tachymeter ersichtlich wird, der terrestrische Laserscanner die Bedingungen nicht erfüllt, dreimal genauer als die Testdaten zu sein (Maune 2007), kann er benutzt werden, um die räumliche Verteilung der Höhendifferenzen und deren Eigenschaften zu untersuchen. Zudem erlauben die 71'776 Messpunkte das Testen der Höhendifferenzen auf Normalverteilung.

Verwendung statistischer Messgrößen

Die Beurteilung der eBee Höhenmodelle anhand des terrestrischen Laserscanners liefert einen RMSE von jeweils 0.23 Metern bei der Verwendung von Kontrollpunkten und entspricht damit den Werten aus der Beurteilung durch den Tachymeter, was dafür spricht, den terrestrischen Laserscan zur Beurteilung zu verwenden. Einzig die Standardabweichung ist um einige Zentimeter grösser. Das breitere Spektrum der abgedeckten topografischen Eigenschaften könnte dafür jedoch eine Erklärung sein. Ausreisser wurden durch die 3*RMSE Regel entfernt, wobei Tabelle 19 die Unterschiede zu den Originaldaten aufzeigt.

Messgrösse	Mit Ausreisser		Ohne Ausreisser	
	RGB_KP	NIR_KP	RGB_KP	NIR_KP
Mittelwert [m]	0.15	0.12	0.14	0.11
Standardabweichung [m]	0.24	0.26	0.17	0.2
RMSE [m]	0.29	0.29	0.23	0.23
Ausreisser [%]	0	0	0.55	0.54

Tabelle 19: Vergleich der Werte mit und ohne Ausreisser

Das Entfernen von Ausreissern verbessert insbesondere die Standardabweichung und den RMSE. Der Mittelwert hingegen verändert sich kaum. Aus der Tabelle wird jedoch ersichtlich, dass Ausreisser vorliegen und diese die statistischen Messgrößen beeinflussen. Die Entfernung von Ausreissern oder die Verwendung von Messgrößen, welche nicht von Ausreissern beeinflusst sind, ist daher sinnvoll.

Testen auf Normalverteilung

In dieser Arbeit wird ein visueller Ansatz nach Höhle und Höhle (2009) zum Testen auf Normalverteilung verwendet. Aus den Diagrammen wird ersichtlich, dass Abweichungen bestehen und die Daten daher nicht normalverteilt sind. Die Abweichungen sind jedoch relativ gering, was aus den Differenzen der statistischen und statistisch robusten Messgrößen hervorgeht (vgl. Tabelle 20).

Messgrösse	RGB_KP	NIR_KP
Mittelwert [m]	0.14	0.11
Median [m]	0.15	0.1
Standardabweichung [m]	0.17	0.2
NMAD [m]	0.16	0.19
68.3% Quantil [m]	0.23	0.21

*Tabelle 20: Vergleich von statistischen und statistisch robusten Messgrößen. Ausreisser wurden durch die 3*RMSE Regel entfernt.*

Der Mittelwert ist stets im gleichen Bereich wie der Median und der NMAD, welcher als eine Schätzung der Standardabweichung angesehen werden kann, entspricht dieser im Wesentlichen. Zudem beschreibt beim NIR_KP Modell die Standardabweichung praktisch den glei-

chen Wert wie das statistisch robuste 68.3% Quantil, was bei gegebener Normalverteilung der Fall sein sollte. Daraus lässt sich schliessen, dass die Höhendifferenzen nicht normalverteilt sind, jedoch praktisch einer Normalverteilung entsprechen und daher die statistisch üblichen Messgrößen in diesem Fall nicht grundsätzlich falsch zur Beurteilung der Genauigkeit sind, sofern Ausreisser entfernt werden.

Verwendung statistisch robuster Messgrößen

Betrachtet man die Resultate der statistisch robusten Messgrößen, kann wiederum eine vertikale Genauigkeit der Höhenmodelle im Bereich von 20 Zentimetern festgestellt werden (NMAD=0.16 bis 0.19 m), sofern Kontrollpunkte verwendet wurden. Somit entspricht die Genauigkeit wiederum in etwa der dreifachen Auflösung (6.95-7.16 cm). Erwähnenswert ist auch, dass es keine Unterschiede zwischen den Werten ohne und denen mit Ausreissern gibt, abgesehen von den 95% Quantilen, welche jeweils um einen Zentimeter tiefer liegen, wenn die Ausreisser entfernt werden. Dies spricht für die Verwendung von statistisch robusten Messgrößen zur Beurteilung der Genauigkeit, wenn Ausreisser vorliegen. Werden keine Kontrollpunkte für das Prozessieren der eBee Daten verwendet, ist die Genauigkeit viel geringer. Systematische Fehler sind dabei massgeblich für diese geringere Genauigkeit verantwortlich, wie aus Abbildung 6.1 ersichtlich wird. Diese systematischen Fehler können durch die Verwendung von Kontrollpunkten minimiert, jedoch nicht ganz eliminiert werden. Die Genauigkeit von Höhenmodellen ohne Kontrollpunkte liegt aber immer noch in dem vom Hersteller angegebenen Bereich von zwei bis fünf Metern. Es ist ein offensichtlicher Unterschied zwischen dem RGB und NIR Modell erkennbar, wobei Wiederholungsmessungen zeigen müssten, ob dieser Unterschied nicht zufällig zustande gekommen ist. Das Beurteilen eines UAS-generierten digitalen Höhenmodells durch einen terrestrischen Laserscanner wurde auch in anderen Studien durchgeführt (Niethammer et al. 2012) (RMSE=0.31m). Jedoch ist auch hier ein Vergleich aufgrund unterschiedlicher Hard- und Software sowie Eigenschaften des Untersuchungsgebietes schwierig.

Eigenschaften der digitalen Höhenmodelle der eBee Kartografie-Drohne

Im Folgenden werden nochmals die Eigenschaften der digitalen Höhenmodelle der eBee Kartografie-Drohne betrachtet, um eine mögliche Erklärung für die Höhendifferenzen zwischen eBee Höhenmodell und terrestrischen Laserscan Messpunkten zu finden. Dazu wird für ein kleines Testgebiet zu jedem Laser-Messpunkt der Höhenwert des eBee Modells gesucht. Somit sind zwei Punktdatensätze vorhanden, welche die jeweils gleichen X- und Y-Werte besitzen, der Z-Wert jedoch einmal aus den Lasermessungen und das andere

Mal aus den eBee Messungen besteht. Diese Punktwolken können nun in RiScan Pro (RIEGL 2015) durch Triangulation als Dreiecksnetze im gleichen Bild dargestellt werden (vgl. Abb. 7.1), um so die Abweichungen zu visualisieren.

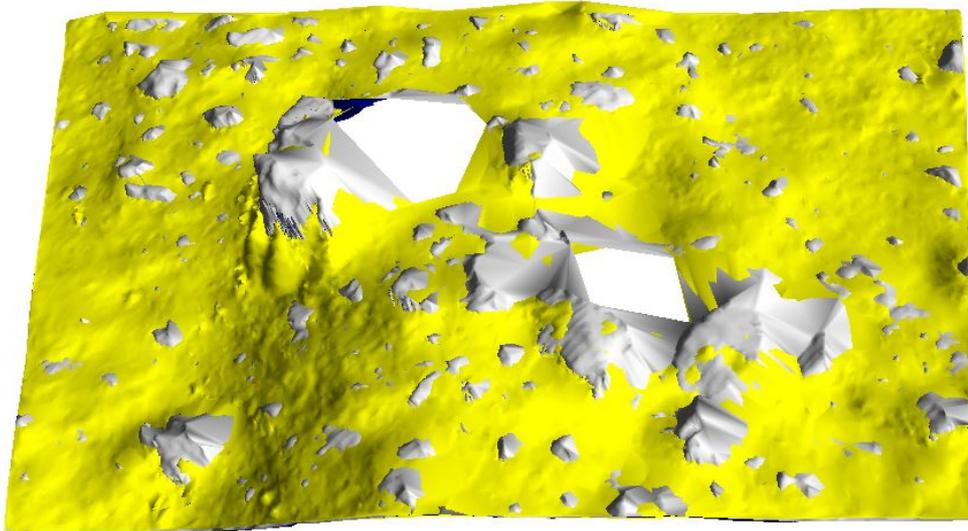


Abbildung 7.1: Dreiecksnetze des terrestrischen Laserscanners (grau) und der eBee Drohne (gelb) für einen kleinen Ausschnitt (30 x 25 m) des Untersuchungsgebietes. Die beiden Löcher in der Mitte des Bildes liegen ausserhalb der Sichtbarkeit des terrestrischen Laserscanners. eBee Modell: RGB_KP. Eigene Darstellung.

Die eBee Höhenwerte liegen für einen Grossteil der Abbildung über den Werten des terrestrischen Laserscans, was auch der Mittelwert von +0.14 oder der Median von +0.15 Metern bezeugen. Jedoch ist das eBee Modell im Vergleich zum Modell des terrestrischen Laserscanners viel glatter. Folge davon ist, dass die eBee Höhenwerte an Lagen mit positiver Krümmung überschätzt und an Lagen mit negativer Krümmung unterschätzt werden, wobei die Krümmung aus der Ableitung der Hangneigung berechnet wird. In Bild 7.1 wird dies ersichtlich, da die einzelnen Steine des Laserscans aus dem eBee Höhenmodell herausragen, Vertiefungen jedoch überdeckt werden. Dabei wird mehrheitlich überschätzt, was die positiven Mittelwerten erzeugt. Die Herstellungsweise der eBee Höhenmodelle kann nicht genau nachvollzogen werden, da viele Prozesse vollautomatisch ablaufen. Es scheint jedoch, dass ein Interpolationsmechanismus verwendet wird, um die gefundenen Punkte aus der Aero-triangulation zu verdichten. Dieser führt jedoch zu einer Glättung der Höhendaten. So wiedergibt das digitale Höhenmodell trotz hoher Auflösung nicht zu jedem Pixelwert ein real gefundener und eingemessener Punkt. Der Unterschied zwischen diesem geglätteten Höhenmodell der eBee Kartografie-Drohne und dem sehr detaillierten terrestrischen Laserscan kann als eine Ursache für die Entstehung der Höhendifferenzen verstanden werden.

Potentielle Probleme

Der terrestrische Laserscan erfüllt einige Bedingungen, welche von Referenzdaten gefordert werden. Zu nennen sind dabei die genügende Anzahl von Messpunkten (Höhle und Höhle 2009) und der geringe zeitliche Abstand zwischen Erhebung der Test- und Referenzdaten bei gleichen Umweltbedingungen (Maune 2007). Hingegen erfüllt der terrestrische Laserscan folgende Bedingungen nicht:

- Die Genauigkeit der Referenzdaten sollte dreimal höher als die der Testdaten sein (Maune 2007).
- Die Referenzdaten sollten zufällig über das Untersuchungsgebiet verteilt sein und repräsentative Standorte vertreten (Höhle und Höhle 2009).

Der erste Punkt kann anhand der Beurteilung durch den Tachymeter begutachtet werden. Der zweite Punkt ergibt sich aus der besonderen Aufnahmetechnik des Laserscanners. Dieser erlaubt nur die Erhebung von Geländeoberflächen, welche sich in seinem Sichtfeld befinden. Diese Einschränkung verhindert die Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebietes sowie aller Expositionen. Zudem weisen aufgrund der horizontalen Sichtweise des Laserscanners sehr steile Geländeoberflächen, welche in Richtung Laserscanner orientiert sind, eine höhere Punktdichte auf als solche, welche eben oder nicht in Richtung des Scanners orientiert sind. Bei der vertikalen Sichtweise der eBee Drohne hingegen spielt die Orientierung der Geländeoberfläche theoretisch keine Rolle und ebene Geländeoberflächen werden besser als steile abgebildet. Aufgrund dieser Gegebenheit des Laserscanners kann beispielsweise die Abhängigkeit der eBee Höhenmodelle bezüglich Exposition nicht untersucht werden, welche einen Einfluss auf die Genauigkeit haben kann (Bühler et al. 2012).

7.1.3 Räumliche Verteilung der Höhendifferenzen

In dieser Arbeit wurde der Einfluss, welcher die Hangneigung, Bodenbeschaffenheit und Beleuchtung auf die Genauigkeit der eBee Höhenmodelle hat, untersucht. Dies erlaubt es, die räumliche Verteilung der Höhendifferenzen im Untersuchungsgebiet zu erklären.

Abhängigkeit bezüglich Hangneigung

Aus den Resultaten ist eine klare Abnahme der Genauigkeit mit zunehmender Hangneigung ersichtlich. Dabei ist bis 35° mit Genauigkeiten im Bereich von RMSE = 0.23 Metern zu rechnen. Zwischen den beiden Höhenmodellen ist kein wesentlicher Unterschied festzustellen. Die Abnahme der Genauigkeit ist möglichen Schwierigkeiten des fotogrammetrischen Prozesses in steilem Gelände zuzuschreiben. Im Vergleich dazu liefert der terrestrische Laserscanner für steile Hanglagen, welche in seine Richtung orientiert sind, genaue Resultate. Die Er-

gebnisse decken sich mit anderen Studien, welche die Genauigkeit fotogrammetrisch erhobener digitale Höhenmodelle bezüglich der Hangneigung untersuchten (Bühler et al. 2012; Müller et al. 2014).

Abhängigkeit bezüglich Bodenbeschaffenheit

Aus den Resultaten sind Unterschiede zwischen Vegetationsgebieten und Gebieten ohne Vegetation ersichtlich. Für eine differenzierte Betrachtung müssen jedoch externe Faktoren wie die Hangneigung oder die Beleuchtung ausgeschlossen werden, da diese offensichtlich mit den beiden Bodenbeschaffenheiten korrelieren. Für Vegetationsgebiete ergibt sich eine durchschnittliche Hangneigung von 20°, während für die übrigen Gebiete eine durchschnittliche Hangneigung von 27° festgestellt wird. Dies kann einen Teil der Unterschiede zwischen den beiden Bodentypen erklären. Die Beleuchtung hingegen ist für Vegetationsgebiete mit einem Durchschnitt von 115 geringer als die der restlichen Gebiete (132). Da mit zunehmender Beleuchtung eine erhöhte Genauigkeit festgestellt wurde, kann der Unterschied zwischen den Bodentypen so nicht erklärt werden. Das heisst, es existiert tatsächlich ein Unterschied oder es gibt andere externe Faktoren, welche hier nicht berücksichtigt wurden. Eine Erklärung wären dabei die geglätteten Höhenmodelle der eBee Drohne, welche die komplexe grobblockige Topografie von Geröll bedeckten Oberflächen im Vergleich zum terrestrischen Laserscanner schlechter wiedergeben (vgl Abb. 7.1). Grössere Genauigkeiten für Vegetationsgebiete im Vergleich zu Geröll bedeckten Oberflächen konnten auch in anderen Studien festgestellt werden (Bühler et al. 2012) und bestätigen somit die hier vorgefundenen Ergebnisse. Der leichte Unterschied zwischen dem RGB_KP und NIR_KP Modell könnte ein Hinweis auf die bessere Eignung von RGB Kameras für Vegetationsgebiete sein. Die Unterschiede sind jedoch sehr gering und könnten auch zufällig entstanden sein. Wiederholungsmessungen müssten hier Aufschluss geben. Der hier gewählte Ansatz zur Klassifikation der Vegetation ist relativ trivial und wurde visuell überprüft. Es gibt weitaus genauere Vorgehensweisen (Laliberte und Rango 2011) für die Klassifikation von Oberflächentypen, welche jedoch aufgrund des Umfanges in dieser Arbeit nicht angewendet wurden. Auch die Unterscheidung von Vegetationsgebieten und Gebieten ohne Vegetation stellt eine starke Vereinfachung dar. Daher soll der vereinfachte Ansatz hier lediglich einen ersten Überblick über mögliche Einflüsse der Bodenbeschaffenheit liefern. Für genauere Untersuchungen wären weitere Abklärungen notwendig.

Abhängigkeit bezüglich Beleuchtung

Auf den ersten Blick fällt eine starke Zunahme der Genauigkeit mit zunehmender Beleuchtung auf. Doch wie in den Resultaten bereits erwähnt, sind auch hier Korrelationen mit externen Faktoren zu berücksichtigen. Tabelle 21 zeigt beispielsweise, welche Hangneigung zu den jeweiligen Beleuchtungswerten gefunden wurde.

Messgrösse / Beleuchtung	0-50	50-100	100-150	150-200	200-255
Mittelwert [m]	0.38	0.22	0.14	0.1	0.07
Stabw. [m]	0.19	0.32	0.23	0.17	0.19
RMSE [m]	0.43	0.39	0.27	0.2	0.2
Hangneigung [°]	39	30	23	22	19

Tabelle 21: Statistische Werte aufgrund der Beleuchtung. Die Hangneigung entspricht dem Mittelwert der Hangneigung der jeweiligen Beleuchtungsklasse.

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass die Beleuchtung wesentlich mit der Hangneigung korreliert und diese einen Grossteil des Einflusses auf die Genauigkeit ausmachen könnte. Einzig die geringe Standardabweichung bei wenig Beleuchtung beziehungsweise deren starke Zunahme bei einer Beleuchtung zwischen Werten von 50-100 kann nicht durch die Hangneigung erklärt werden. Die geringe Standardabweichung zwischen 0-50 könnte ein Hinweis auf präzise Messungen bei einem hohen systematischen Fehler sein. Weitere Untersuchungen müssten dazu jedoch durchgeführt werden, um diese Vermutung zu verifizieren. Da die Beleuchtung als ein wichtiger Faktor erkannt wurde, welcher die Genauigkeit von fotogrammetrisch erhobenen digitalen Höhenmodellen beeinflussen kann (Bühler et al. 2012; Käab und Vollmer 2000), sind die Ergebnisse durchaus plausibel. Jedoch sollte durch weitere Abklärungen untersucht werden, wie stark die einzelnen Faktoren die Genauigkeiten beeinflussen. Die in dieser Arbeit gewählte Methode zur Untersuchung der Beleuchtung ist eine von mehreren Möglichkeiten. Sie verwendet die Helligkeit der einzelnen Pixel und ist somit neben der Beleuchtung auch von den Eigenschaften der Objekte abhängig, welche wiedergegeben werden. Andere Methoden benutzen die manuelle Zuweisung von grösseren Gebieten aufgrund von visueller Betrachtung (Bühler et al. 2012). Daher wäre eine Untersuchung der Eignung der in dieser Arbeit verwendeten Methode sinnvoll.

7.2 Diskussion der Deformationsanalyse

Für die Deformationsanalyse wurden in dieser Arbeit die horizontalen und dreidimensionalen Oberflächenverschiebungen sowie die vertikale Höhenänderung betrachtet. Dem entsprechend ist dieser Abschnitt eingeteilt.

7.2.1 Horizontale Oberflächenverschiebungen

Zur Berechnung der horizontalen Oberflächenverschiebung wird die CIAS Bild-Korrelationssoftware (Kääb und Vollmer 2000) verwendet. Die Grenzwerte, welche als Auswahlkriterien dienen, sind aufgrund einer visuellen Analyse so gewählt worden, dass möglichst viele plausible Verschiebung dargestellt werden. Von den Herstellern der Software wird empfohlen, den maximalen Korrelationskoeffizienten sowie den gemittelten Korrelationskoeffizienten als Auswahlkriterien zu benutzen (CIAS Software 2015), auch wenn keine Angaben zu konkreten Grenzwerten gemacht werden. Die Verwendung des Korrelationskoeffizienten mit einem Grenzwert von 0.8 wird beispielsweise auch in Kääb und Vollmer (2000) angewendet. Da ebenfalls keine genauen Vorgaben existieren, wie die Eingabeparameter und Daten gewählt werden müssen, empfiehlt sich ein Ansatz, wie er in dieser Arbeit gewählt wurde: Die einzelnen Parameter und Dateneigenschaften wurden auf ihren Einfluss hin getestet und schlussendlich das bestmögliche Resultat verwendet. Folglich werden die einzelnen Eingabedaten und deren Einfluss diskutiert.

Auflösung

Erst ab einer Auflösung von 25 Zentimetern sind plausible Verschiebungen in genügender Anzahl erkennbar, sodass ein Gesamtbild der Situation vermittelt werden kann. Bei einer Auflösung von 10 Zentimetern kann nur ein Bruchteil der plausiblen Verschiebungen dargestellt werden. Eine Ursache dafür sind mit hoher Wahrscheinlichkeit die grossen Unterschiede zwischen den beiden verwendeten Höhenmodellen. Dies aufgrund kleinräumiger Strukturen oder der beschriebenen kleinen Unebenheiten, welche zwischen den Höhenmodellen stark variieren. Erst eine Glättung der Höhenmodelle durch eine niedrigere Auflösung lässt grössere Strukturen erscheinen, welche die Modelle vergleichbar machen. Wird eine Auflösung von 50 Zentimetern verwendet, erfüllen somit die meisten Verschiebungen die Auswahlkriterien. Würde die Auflösung noch niedriger gewählt, könnten kleinräumige Verschiebungen nicht mehr betrachtet werden.

Grösse des Referenzblocks und des dazugehörigen Testgebietes

Die Grösse des Referenzblocks muss aufgrund der Oberflächeneigenschaften des Untersuchungsgebietes gewählt werden. Obwohl die einzelnen Elemente der Blockgletscheroberfläche eine durchschnittliche Grösse von 0.5-1.5 Metern (Käab und Vollmer 2000) besitzen, ergibt die Wahl eines Referenzblocks von 10 Metern die besten Ergebnisse. Auch hier muss davon ausgegangen werden, dass einzelne Steine und Blöcke in den zwei Höhenmodellen nicht wiedergefunden werden können. Grössere Strukturen von mehreren Metern erlauben dagegen den Vergleich zwischen den beiden Höhenmodellen. Wird der Referenzblock hingegen noch grösser gewählt, können wiederum kleinräumige Verschiebung nicht dargestellt werden. Die Grösse des Testgebietes hat auf die Resultate keinen grossen Einfluss, sofern sie genügend gross gewählt wird (entsprechend den erwarteten Fließgeschwindigkeiten).

Schummerung

Aus den Resultaten wird ersichtlich, dass die hier gewählten Auswahlkriterien für digitale Höhenmodelle, welche ihre Werte durch Graustufen darstellen, nicht geeignet sind. Gründe dafür konnten keine gefunden werden, hängen aber scheinbar mit Software-internen Gegebenheiten zusammen. Hingegen lieferten die Auswahlkriterien für schattierte Höhenmodelle die gewünschten Ergebnisse.

Unterschied zwischen RGB_KP und NIR_KP

Die Resultate zeigen keinen eindeutigen Unterschied aufgrund der beiden Höhenmodelle. Dies ist in Einklang mit den Resultaten aus den Beurteilungen der Genauigkeiten, wo ebenfalls keine grösseren Unterschiede festgestellt wurden. Daher scheinen beide Höhenmodelle gleichwertig für eine solche Anwendung zu sein.

Eigenschaften der horizontalen Oberflächenverschiebung

Um die horizontalen Oberflächenverschiebungen diskutieren zu können, folgt eine Einteilung in sechs Gebiete, welche ähnliche Eigenschaften aufweisen. Die Werte werden anschliessend auf ihre Plausibilität hin überprüft und - wenn vorhanden - mit Angaben aus externer Literatur verglichen.

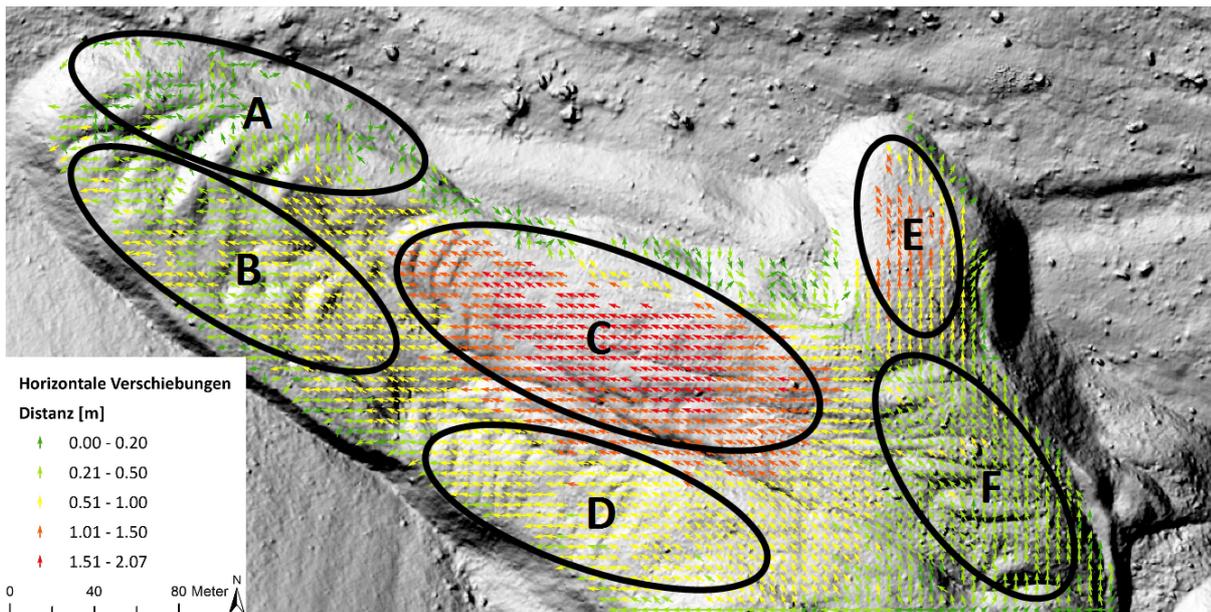


Abbildung 7.2: Horizontale Oberflächenverschiebung anhand der schattierten RGB_KP Modelle mit einer Auflösung von 0.5 Metern und einer Referenzblockgrösse von 20 Pixeln, eingeteilt in sechs Zonen. Unterlegt durch ein schattiertes eBee Höhenmodell. Eigene Darstellung.

Zone A ist gekennzeichnet von sehr geringen Verschiebungen mit stark variierenden Richtungen. Aufgrund von Ungenauigkeiten der verwendeten Höhenmodelle sind geringe Beträge und deren Richtungen der Verschiebungen als fraglich einzustufen. Die Zone als Ganzes würde daher zusammen mit dem Bereich nördlich der Zone C keine Bewegungen aufgrund von Permafrost-Kriechprozessen beinhalten. Diese Aussage wird gestützt durch die Ergebnisse aus den Bohrlochdaten (Bohrloch B1, welches kein Eis enthält und in dieser Zone zu finden ist) und den geophysikalischen Untersuchungen. Die Studien beschreiben dieses Gebiet als einen Bereich mit degradiertem Permafrost (Arenson et al. 2002; Maurer und Hauck 2007). In Zone B sind Verschiebungen im Bereich von 0.2-1.0 Metern mit mehrheitlich gleicher Ausrichtung zu finden. Die Verschiebungen passen aufgrund ihres Betrages und der Richtung ins Gesamtbild und scheinen daher plausibel zu sein. Die Bohrlochdeformationen (B2-B4), welche in diesem Bereich liegen, zeigen mit horizontalen Verschiebungen im Bereich von 42 Zentimetern ähnliche Werte (Arenson et al. 2002). Die Tachymeter Messungen (September 2014 – September 2015) ergeben horizontale Verschiebungen zwischen 0.4 und 1.14 Meter und sind damit etwas höher. Der Blockgletscher zeigt hier jedoch geringere Verschiebungsbeträge im Vergleich zu Zone C und D, was ein Zeichen für zunehmende Inaktivität sein könnte. Zone C und D befinden sich im mittleren Bereich des Blockgletschers, welcher abgesehen von den Fronten das höchste Gefälle aufweist. Jedoch zeigt Zone C im Vergleich zu Zone D wesentlich

grössere Verschiebungsbeträge. Einen möglichen Einfluss könnte dabei die Form des Blockgletschers an dieser Stelle haben. Die Änderung der Fliessrichtung könnte auf der orografisch linken Seite zu einer Komprimierung mit geringeren Fliessgeschwindigkeiten, auf der orografisch rechten Seite zu einer Ausdehnung mit höheren Fliessgeschwindigkeiten führen (Kääb et al. 2003). Andere Gründe für die geringeren Verschiebungen in Zone D wie auch dem Bereich zwischen Zone D und F könnten durch eine geringere Mächtigkeit der vorhandenen Schicht, welche sich unter Permafrost-Bedingungen deformiert, sein. Insbesondere im Ursprungsgebiet des Blockgletschers könnten so die geringeren Verschiebungsbeträge erklärt werden, da sich dort diese Deformationsschicht erst bildet (Kääb et al. 2003). Folglich könnten die höheren Verschiebungsbeträge von Zone C einer grösseren Mächtigkeit der Deformationsschicht zugeschrieben werden. Eine weitere Möglichkeit wäre eine Beschleunigung des Blockgletschers in Zone C beispielsweise aufgrund klimatischer Veränderungen (Delaloye et al. 2008). Der Vergleich mit den Tachymeter Messungen zeigt für Zone C Werte zwischen 1.66 und 2.61 Meter und für Zone D Werte um 0.8 Meter. Damit sind die Verschiebungen aus den Tachymeter Messwerten wiederum etwas höher im Vergleich zu den eBee Daten. Der Vergleich mit der DGPS-Station, welche sich in Zone C befindet, bestätigt die nächstgelegene berechnete horizontale Verschiebung. In Zone F sind geringe, jedoch konstante Verschiebungen feststellbar. Dieser Abschnitt zeichnet sich durch geringes Gefälle aus, was eine Ursache für die im Vergleich zu Zone D und C niedrigeren Fliessgeschwindigkeiten sein könnte. Andere Gründe könnten auch hier eine geringe Deformationsschicht, welche zu geringen Verschiebungsbeträgen führt, sein, da es sich um einen Bereich am Ursprung, beziehungsweise am Rande des Blockgletscher handelt (Kääb et al. 2003). Die horizontalen Verschiebungen aus den Tachymeter Messungen liegen zwischen 60 und 70 Zentimeter und sind damit etwas höher. Der nördlich ausbrechende Teil, welcher durch die Zone E beschrieben wird, zeigt wiederum höhere Verschiebungsbeträge und lässt auf einen Vorstoss des Blockgletschers in diesem Teil schliessen. Die Zunahme könnte aufgrund des zunehmenden Gefälles erklärt werden, entspricht aber auch dem üblichen Fliessverhalten von Blockgletschern. Dieses beschreibt die höchsten Verschiebungsbeträge an der Blockgletscherfront, wo auch die meisten morphologischen Veränderungen anzutreffen sind (Roer et al. 2008). Die Tachymeter Messungen bestätigen höhere Fliessgeschwindigkeiten in diesem Bereich mit horizontalen Verschiebungen zwischen 1.17 und 1.78 Meter.

Die beobachtete Oberflächenverschiebung resultiert aus der Kombination verschiedener Faktoren. Die einzelnen Einflüsse dieser Faktoren auseinander zu halten, gestaltet sich jedoch schwierig, insbesondere, da abgesehen von den Bohrlöchern und geophysikalischen Untersuchungen im unteren Teil keine Informationen über die interne Struktur des gesamten Blockgletschers vorhanden sind (Kääb et al. 2003; Roer et al. 2008).

Die horizontale Oberflächenverschiebung des Blockgletschers Muragl wurde auch in Käab und Vollmer (2000) anhand Flugzeug-gestützter Luftbilder über einen Zeitraum von 13 Jahren sowie in der Masterarbeit von Heim (2014) mittels terrestrischen Laserscans über den Zeitraum eines Jahres untersucht. Dabei wurde ebenfalls die CIAS Bild-Korrelationssoftware verwendet. Die Ergebnisse aus Käab und Vollmer (2000) zeigen ein ähnliches Bild (Mittlere Fliessgeschwindigkeit = 0.5 Meter/Jahr), auch wenn die in dieser Arbeit gefundenen Verschiebungen leicht höhere Beträge aufweisen (Mittlere Fliessgeschwindigkeit ca. 0.7 Meter/Jahr). Im Vergleich zu Heim (2014), welcher den Blockgletscher anhand von terrestrischen Laserscans untersuchte, liefern die fotogrammetrisch erhobenen Höhenmodelle den Vorteil flächendeckender Daten, was die Auswertung durch die CIAS Software vereinfacht. Ansonsten liefern die Resultate ähnliche Ergebnisse (Mittlere Fliessgeschwindigkeit = 0.74 Meter/Jahr). Betrachtet man die horizontalen Verschiebungen zwischen den einzelnen Tachymeter Messpunkten ist diese um einiges höher. Die beiden Datensätze sind jedoch nicht direkt miteinander vergleichbar, da die Zeiträume zwischen den Erhebungen nicht identisch sind (eBee: September 2014 – Juli 2015; Tachymeter: September 2014 – September 2015). Werden diese zwei Monate Differenz mit einbezogen sind die Verschiebungen aus den eBee Daten durchaus plausibel. Zudem kann die Grössenordnung und die Variation der Verschiebungsbeträge über den Blockgletscher hinweg durch die Tachymeter Messungen bestätigt werden.

7.2.2 Dreidimensionale Oberflächenverschiebung

Wie in den Resultaten bereits erwähnt wird, ist die Z-Komponente im Vergleich zu den horizontalen Komponenten um einiges geringer. Trotzdem macht sie im Durchschnitt knapp 30% der dreidimensionalen Oberflächenverschiebung aus. Die Z-Komponente ist jedoch stark von der horizontalen Verschiebung abhängig, was aus dem Vergleich der Abbildungen 6.5 und 6.6 ersichtlich wird. Die dreidimensionalen Verschiebungen geben ein genaueres Bild der Situation, da alle Komponenten mit einbezogen werden. Insbesondere in steilem Gelände ist dies sinnvoll, da dort die Z-Komponente einen wesentlichen Beitrag zur dreidimensionalen Verschiebung liefert. Da der durchschnittliche Verschiebungsbetrag der Z-Komponente jedoch im Bereich der Genauigkeit der verwendeten Höhenmodelle liegt, sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu betrachten. Genauere Höhenmodelle oder die Betrachtung der Verschiebungen über einen längeren Zeitraum hinweg könnten hier Aufschluss über die genauen Verschiebungsbeträge geben. Die Tachymeter Messungen zeigen wiederum etwas höhere Werte, bestätigen aber die Grössenordnung und die Variation der Verschiebungsbeträge über den Blockgletscher hinweg.

7.2.3 Vertikale Höhenänderung

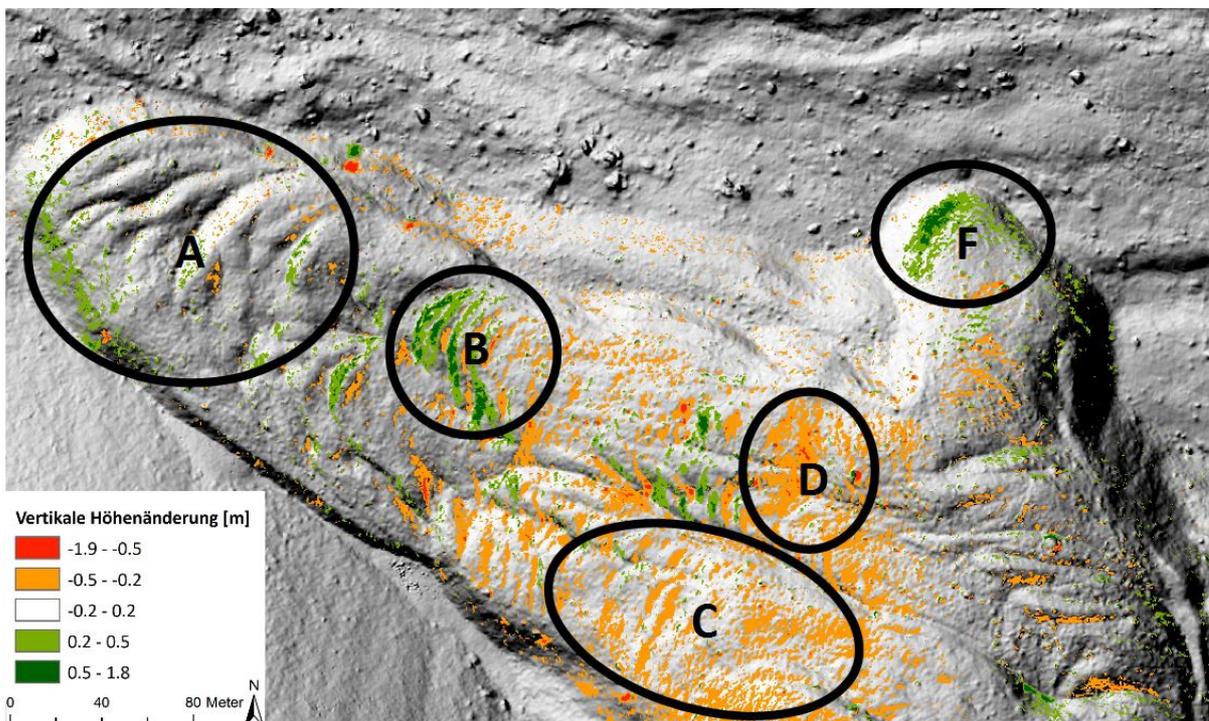


Abbildung 7.3: Vertikale Höhenänderung anhand der beiden RGB_KP Höhenmodelle mit einer Auflösung von 0.5 Metern, eingeteilt in fünf Zonen. Unterlegt durch ein schattiertes eBee Höhenmodell. Eigene Darstellung.

Die vertikalen Höhenänderungen zeigen für den grössten Teil des Blockgletschers stabile Gebiete, welche innerhalb von -20 bis +20 Zentimetern liegen. Die leichte und flächendeckende Senkung in Zone C beträgt meistens zwischen -20 und -30 Zentimeter und muss allenfalls als Ungenauigkeit angesehen werden, insbesondere daher, weil sie bei der vertikalen Höhenänderung der beiden NIR_KP Modelle nicht auftritt. Dagegen sind die restlichen Hebungen und Senkungen klaren Formen des Blockgletschers zuzuordnen und daher plausibler. In Zone B sind Hebungen entlang der Loben zu beobachten, während beim nördlich ausbrechenden Teil des Blockgletschers (Zone F) ebenfalls eine positive Höhenänderung feststellbar ist. Die vertikale Höhenänderung kann das Resultat verschiedener Prozesse sein (Kääb et al. 2003): Die hier beobachteten Hebungen sind einerseits dem Vorstoss des Blockgletschers über weniger aktive Teile (Zone B) zuzuschreiben, andererseits das Resultat des Vorstosses in noch nicht eingenommene Gebiete (Zone F). Beim Vorstoss von Loben entsteht zudem in Flussrichtung hinter den Loben eine negative Höhenänderung, da sich durch die Oberflächenverschiebung die gesamte Topografie mit den hervorstehenden Loben bewegt (Kääb et al. 2003). Dieser Prozess erklärt die abwechselnd positiven und negativen Höhenänderungen in

Zone B. Da die Hebungsprozesse jedoch die Senkungsprozesse in diesem Bereich überwiegen, kann die Verschiebung der Topografie nicht alleine die Ursache sein, da sich sonst Hebungs- und Senkungsprozesse ausgleichen würden. Vielmehr kann davon ausgegangen werden, dass der Blockgletscher im Bereich der Zone B zusammengestaucht wird. Diese Kompression führt zu einer Hebung der Oberfläche (Kääb und Vollmer 2000). In Zone D ist eine flächendeckende Abnahme der Geländehöhe feststellbar. Verglichen mit der dreidimensionalen Oberflächenverschiebung befindet sich dieses Gebiet genau im Bereich der höchsten auf dem Blockgletscher gefundenen Verschiebungsbeträge. Eine Abnahme der Geländehöhe aufgrund der horizontalen Ausdehnung des Blockgletschers ist eine mögliche Erklärung, welche auch mit der Kompression in Zone B weiter westlich einhergehen würde. Eine horizontale Ausdehnung wäre dabei das Ergebnis einer Beschleunigung hinsichtlich der Fließgeschwindigkeiten (Kääb et al. 2003). Ein langjähriger Vergleich müsste die Beschleunigung in diesem Bereich jedoch bestätigen. Eine andere Möglichkeit wäre die Senkung der Oberfläche aufgrund von Schmelzprozessen, welche jedoch aufgrund der gemessenen Magnitude eher unwahrscheinlich ist (Kääb et al. 2003). Schlussendlich sind in Zone A keine grösseren Höhenänderungen zu sehen, was auch im Einklang mit den geringen Oberflächenverschiebungen steht und ein Zeichen für die zunehmende Inaktivität des Blockgletschers im unteren Bereich ist (Vonder Mühl 1993). Allfällige Senkungen in Zone A durch Schmelzprozesse liegen im Bereich der Ungenauigkeiten der verwendeten Höhenmodelle und können daher nicht für die Analyse miteinbezogen werden. Ebenso ist der Bereich südlich von Zone F von keinen grösseren Höhenänderungen geprägt. Es scheint sich daher um ein wenig aktives Gebiet zu handeln, was auch durch die geringen Oberflächenverschiebungen bestätigt wird. Über den gesamten Blockgletscher hinweg betrachtet liegt im Schnitt eine negative Höhenänderung von -0.03 Metern vor und zeigt damit keine starke Tendenz für eine positive oder negative Höhenänderung. Dieses Resultat wird auch durch Kääb und Vollmer (2000) sowie Heim (2014) gestützt, welche ebenfalls keinen generellen Trend bezüglich der vertikalen Höhenänderungen feststellten. Längere Messreihen könnten hier dazu beitragen Trends zu entdecken, welche aufgrund der kurzen Zeitspanne von zehn Monaten und der Genauigkeiten der verwendeten Höhenmodelle in dieser Arbeit nicht ersichtlich werden.

7.3 UAS im Kontext der Fernerkundung

Dieser Abschnitt vergleicht die unbemannten Flugobjekte (UAS) mit herkömmlichen Methoden der Fernerkundung bezüglich Untersuchungen in periglazialer Umgebung und zeigt die Vor- und Nachteile bei deren Verwendung auf.

7.3.1 UAS im Vergleich zu anderen Erhebungsmethoden

Die Entwicklung im Bereich von UAS ist in der Vergangenheit primär militärischer Motivation zuzuschreiben. Mit dem Aufkommen von preiswerten Fluggeräten und der automatischen Datenprozessierung wurde die Fotogrammetrie mittels UAS zu einer kostengünstigen Alternative der Flugzeug-gestützten Erhebungsmethode und eröffnete zahlreiche neue Anwendungsmöglichkeiten. Insbesondere im Bereich von hoher Auflösung stellen UAS eine praktische Ergänzung zu hochauflösenden terrestrischen Vermessungsmethoden dar, mit dem Vorteil der grossräumig flächendeckenden Datenerhebung. Sie sind somit ein Bindeglied zwischen räumlich genauen Punktmessungen und den ungenaueren, jedoch grossräumigen flächendeckenden Daten der Flugzeug- und Satellitensysteme (vgl. Abb. 7.4) (Nex und Remondino 2014).

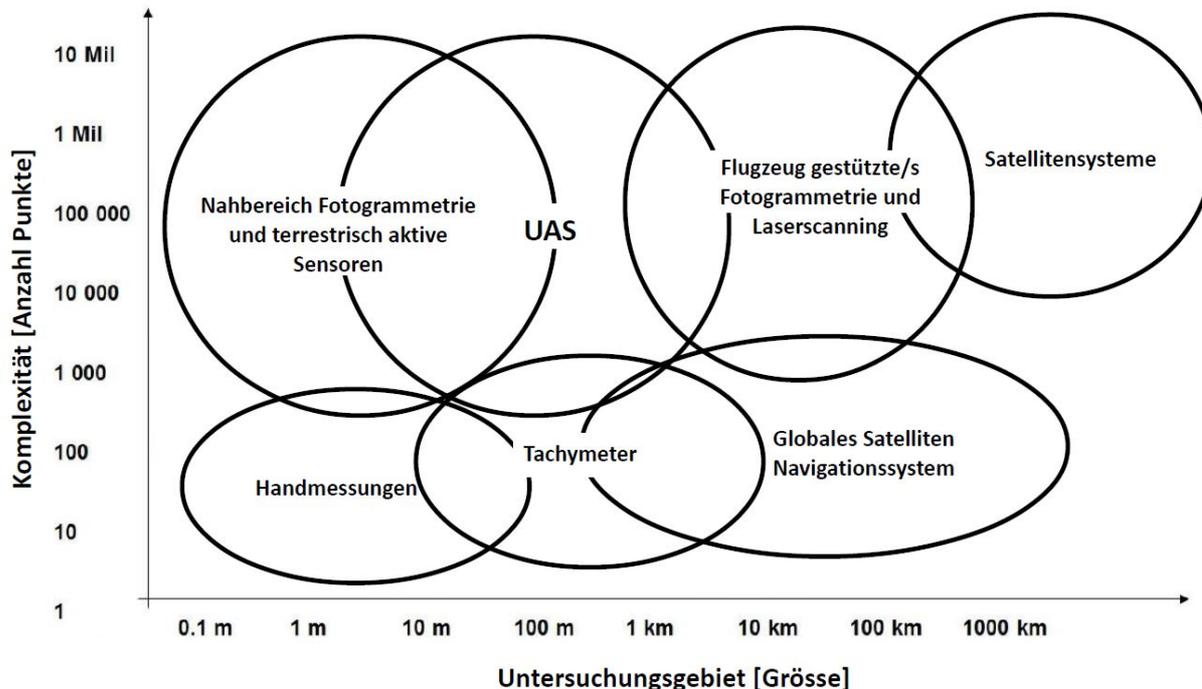


Abbildung 7.4: Verfügbare Techniken, Sensoren und Systeme der Geomatik zur Erhebung dreidimensionaler Daten. Abbildung nach Nex und Remondino (2014).

Vorteile	Nachteile
Flexible Anwendung	Stabilität (Wind)
Hohe räumliche Auflösung	Mögliche Kollision mit Objekten
Hohe zeitliche Auflösung möglich	Erhebung von Kontrollpunkten
Schnelle Verfügbarkeit der Daten	Start und Landung
Kostengünstige Datenerhebung	Gesetzliche Grundlage

Tabelle 22: Einige Vor- und Nachteile von unbemannten Flugsystemen (Immerzeel et al. 2014; Nex und Remondino 2014; Niethammer et al. 2012).

Im Vergleich zu Flugzeug- und Satellitensystemen besitzen UAS den Vorteil der flexiblen Anwendung. Während Satelliten Daten eines Untersuchungsgebietes nur zu bestimmten Zeiten erheben können (vgl. Abschnitt 2.1.1), ist der Einsatz von Flugzeugen flexibler, verlangt aber immer noch ein Ausmass an Planung und Zeitaufwand, welches von unbemannten Flugsystemen nicht benötigt wird. Daher eignen sich UAS insbesondere für Situation, wo eine schnelle, beziehungsweise flexible Datenerhebung nötig ist. Die geringeren Datenerhebungskosten sowie die hohe räumliche Auflösung sind dabei ein zusätzlicher Vorteil (Immerzeel et al. 2014; Nex und Remondino 2014). Konkret sind die eBee Höhenmodelle in dieser Arbeit mit einer vertikalen Genauigkeit von RMSE = 0.23 Metern vier- bis fünfmal genauer als vergleichbare Flugzeug-gestützte und fotogrammetrisch erhobene Höhenmodelle (Müller et al. 2014). Zudem ist durch die meistens kurze Flugdauer eine hohe zeitliche Auflösung möglich. Da heutzutage bei vielen Systemen die Daten vollautomatisch prozessiert werden, stehen die Ergebnisse einer Untersuchung schnell zur Verfügung. Jedoch ist dabei anzumerken, dass für genaue Resultate Kontrollpunkte oder aufwendigere Prozessierungsschritte notwendig sind (Nex und Remondino 2014). Für die Datenerhebung dieser Arbeit genügten jeweils halbstündige Flüge mit der eBee Kartografie-Drohne, wobei die Planung des Fluges ebenfalls im Bereich von einer Stunde lag. Die Erhebung der Kontrollpunkte nahm deutlich mehr Zeit in Anspruch. Das Prozessieren der Daten verlief mehrheitlich automatisch und benötigte um die 10-15 Stunden. Ein bis zwei Tage reichten daher aus, um von der Datenerhebung (inklusive Anreise ins Untersuchungsgebiet) zum fertigen Produkt zu gelangen, wobei die effektive Arbeitszeit bei einigen Stunden lag. Aufgrund des geringen Gewichts sind zudem viele UAS stark anfällig auf Wind, was die Qualität der Daten mindern kann. Insbesondere in alpiner

Umgebung kann dies ein Problem sein (Niethammer et al. 2012). Aufgrund der geringen Flughöhe ist zudem die Gefahr einer Kollision mit Objekten (Bäume, Felswände, Gebäude) vorhanden. Gerade in topografisch komplexem Gelände stellt dies eine Einschränkung im Vergleich zu anderen Erhebungsmethoden dar (Nex und Remondino 2014). Weitere Einschränkungen ergeben sich aus der geringen Ladekapazität, der Reichweite oder der Flugdauer. Diese variieren jedoch stark zwischen den verschiedenen UAS-Typen und müssen daher von Modell zu Modell differenziert betrachtet werden (Nex und Remondino 2014). Bei einigen Typen, wie auch beim in dieser Arbeit verwendeten eBee Modell, stellt der Start und insbesondere die Landung eine Restriktion bezüglich einer möglichen Anwendung dar. Es müssen geeignete flache Gebiete von genügender Grösse vorhanden sein, was in periglazialer Umgebung nicht immer gegeben ist. In solchen Fällen sind senkrecht startende und landende UAS-Typen von Vorteil. Diese wiederum können aufgrund ihrer geringen Geschwindigkeit und Flugdauer jedoch nur kleine Gebiete abdecken (Nex und Remondino 2014). Zuletzt soll noch erwähnt werden, dass die gesetzlichen Grundlagen für die Anwendung von unbemannten Flugobjekten nicht in allen Ländern geklärt ist (Nex und Remondino 2014). Für gewisse Gebiete ist daher die Anwendung von unbemannten Flugobjekten eingeschränkt oder untersagt. In der Schweiz bietet die *Verordnung des UVEK über Luftfahrzeuge besonderer Kategorien* die gesetzlichen Grundlagen (Nex und Remondino 2014).

7.3.2 Zukünftige Entwicklungen im Bereich der UAS

Zukünftige Entwicklungen sind insbesondere bei der Ladekapazität, dem autonomen Fliegen, der Stabilität und der Geschwindigkeit der Datenprozessierung (bis hin zu Echtzeit) zu erwarten (Nex und Remondino 2014). Bordeigene DGPS-Geräte würden zudem das direkte Georeferenzieren der UAS-Produkte erlauben. Das Aufkommen von neuen Sensoren für UAS Anwendungen ist ebenfalls ein junges Forschungsgebiet mit hohem Potential (Nex und Remondino 2014). Die Verwendung von UAS-gestützten Wärmebildkameras (Bending et al. 2012) oder Laserscannern (Wallace et al. 2012) zeigt nur einige Beispiele von möglichen Entwicklungen.

8 Erkenntnis

In dieser Arbeit wurden mit der eBee Kartografie-Drohne der Firma senseFly (senseFly 2015) digitale Höhenmodelle des Blockgletschers Muragl im Oberengadin erstellt. Diese wurden durch Referenzmessungen eines Tachymeters sowie eines terrestrischen Laserscanners auf ihre Genauigkeit hin überprüft und anschliessend für eine Deformationsanalyse verwendet. Anhand der in Kapitel 3 definierten Forschungsfragen sind hier die Erkenntnisse aus dieser Arbeit zusammengestellt.

Genauigkeiten der digitalen Höhenmodelle

Für die eBee Höhenmodelle ergibt sich eine vertikale Genauigkeit von RMSE = 23 Zentimetern, wenn Kontrollpunkte miteinbezogen werden. Die Genauigkeit ist damit aufgrund des komplexen hochalpinen Geländes etwas geringer als vom Hersteller angegeben. Insbesondere die Hangneigung konnte als Faktor identifiziert werden, welcher bei Zunahme die Genauigkeit verringert. Die Bodenbeschaffenheit sowie die Beleuchtung sind weitere untersuchte Faktoren. Eine Sensitivitätsanalyse müsste hier noch zeigen, wie gross die einzelnen Einflüsse der Faktoren sind, da diese zum Teil stark mit anderen Faktoren wie zum Beispiel der Hangneigung korrelieren. Trotz der Verwendung von Kontrollpunkten existieren systematische Fehler in den Höhenmodellen, welche meist durch einen positiven Versatz auf der einen und negativen Versatz auf der gegenüberliegenden Seite des Untersuchungsgebietes erkennbar sind und gegen den Rand des Untersuchungsgebietes hin zunehmen. Werden keine Kontrollpunkte verwendet, ist die Genauigkeit der eBee Modelle wesentlich geringer, jedoch immer noch im vom Hersteller angegebenen Bereich. Hier konnten im Vergleich zu den Modellen, welche Kontrollpunkte verwenden, Unterschiede bezüglich der beiden verwendeten Kameras S110 RGB und S110 NIR festgestellt werden. Wiederholungsmessungen müssten jedoch zeigen, ob dieser Unterschied nicht zufällig ist. Die Prozessierung der eBee Daten kann nicht gänzlich nachvollzogen werden, daher fehlt die Erklärung, weshalb die eBee Höhenmodelle im Vergleich zu Höhenmodellen des terrestrischen Laserscans geglättet erscheinen. Dabei werden die Höhenwerte mehrheitlich überschätzt, was in einem positiven Höhenversatz gegenüber dem Modell des terrestrischen Laserscanners resultiert. Trotzdem zeigen die eBee Modelle bei der Verwendung von Kontrollpunkten Genauigkeiten, welche im Vergleich zu anderen Höhenmodellen von hochalpinem Gelände um ein Vielfaches besser sind (Müller et al. 2014; swisstopo 2015b, 2015c).

Deformationsanalyse

Wie aus den Resultaten ersichtlich wird, liefern die eBee Daten eine gute Grundlage für die Untersuchung von periglazialen Umgebungen. Die hohe Auflösung und Genauigkeit ermöglicht die geometrische wie auch inhaltliche Interpretation von Objekten und Prozessen innerhalb des Untersuchungsgebietes. Eine Anwendung der eBee Höhenmodelle in Form einer Deformationsanalyse des Blockgletschers Muragl zeigt die Eignung auf. Die flächendeckenden Daten sind dabei ein besonderer Vorteil im Vergleich zu anderen Methoden und erlauben das Erkennen von räumlichen Mustern. Trotz der hohen Auflösung ist jedoch zu bemerken, dass die Höhenmodelle aufgrund kleiner Unebenheiten für gewisse Anwendungen geglättet werden müssen, was die Verwendung der hohen Auflösung verhindert.

In der Deformationsanalyse konnte gezeigt werden, dass der Blockgletscher Muragl sich als gesamtes Objekt bewegt, wobei die einzelnen Bereiche teils stark unterschiedliche Aktivitäten zeigen. Der Grund, weshalb diese unterschiedlichen Aktivitäten in diesem Ausmass existieren, liegt in der langjährigen Entwicklungsgeschichte des Blockgletschers sowie in vielen internen und externen Prozessen (Kääb et al. 2003; Maurer und Hauck 2007) wobei die aufgezeigte Oberflächenverschiebung das Resultat dieser Prozesse ist. Bei der Betrachtung der Resultate ist im Vergleich zu anderen Studien (Kääb und Vollmer 2000) der geringe Zeitraum der Untersuchung zu nennen. Aufgrund der Eignung der UAS-basierten Untersuchung wäre eine Fortführung derselben jedoch zu empfehlen, da der Aufwand im Vergleich zu den gewonnen Informationen gering ist. Eine jährliche Erhebung erscheint aufgrund der gegebenen Genauigkeiten der Höhenmodelle und den vorhandenen Deformationsraten als sinnvoll. Eine langjährige Messreihe könnte dabei die Entwicklung des Blockgletschers unter den gegebenen klimatischen Veränderungen festhalten.

Vor- und Nachteile von unbemannten Flugsystemen

Die Stärke von unbemannten Flugsystemen liegt sicherlich in der flexiblen Anwendung bei gegebener hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Wie in dieser Arbeit gezeigt wurde, sind UAS in periglazialer Umgebung ein nützliches Werkzeug für die flächendeckende Untersuchung von topographisch komplexem und schwer zugänglichem Gelände. Die im Vergleich zu anderen Methoden preiswerte Datenerhebung ist ein zusätzlicher Vorteil. Da UAS relativ anfällig auf Wind sind, stellt dies eine Restriktion bezüglich der Anwendung insbesondere in hochalpinem Gelände dar. Ebenso ist das Vorhandensein eines genügend grossen Start- und Landeplatzes nötig. Für genaue Resultate müssen zudem Kontrollpunkte erhoben werden, was je nach Untersuchungsgebiet einige Zeit in Anspruch nimmt. Da die Genauigkeit mit zunehmender Hangneigung abnimmt, sind UAS zudem für sehr steile Bereiche wie Felswände nicht geeignet. Zukünftige Entwicklungen sehen insbesondere Verbesserung in der Ladeka-

pazität, der Stabilität sowie der Geschwindigkeit der Datenprozessierung bis hin zu Echtzeit und die Verwendung von neuen Sensoren vor (Nex und Remondino 2014). Zusammen mit diesen Entwicklungen besitzen UAS somit ein grosses Potential für die zukünftige Erforschung von Gebirgslandschaften.

Literaturverzeichnis

- Aber, J. S.; Aber, S. W.; Pavri, F. (2002): Unmanned small-format aerial photography from kites for acquiring large scale, high-resolution, multiview-angle imagery. In: *Proceedings of Pecora 15, Land Satellite Information IV/ISPRS Conference Commission I/FIEOS, Denver, CO, USA*.
- Abermann, J.; Fischer, A.; Lambrecht, A.; Geist, T. (2010): On the potential of very high-resolution repeat DEMs in glacial and periglacial environments. In: *The Cryosphere* 4 (1), S. 53–65.
- Albertz, Jörg (2007): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Darmstadt: Wiss. Buchges.
- Arenson, L.; Hoelzle, M.; Springman, S. (2002): Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland. In: *Permafrost and Periglacial Processes* 13 (2), S. 117–135. DOI: 10.1002/ppp.414.
- Barsch, D. (1992): Permafrost Creep and Rockglaciers. In: *Permafrost and Periglacial Processes* 3, S. 175–188.
- Barsch, D. (1996): Rockglaciers: Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments. In: *Springer Series in Physical Environment. Berlin Heidelberg: Springer*.
- Bending, J.; Bolten, A.; Bareth, G. (2012): Introducing a low-cost mini-UAV for thermal-and multispectral-imaging. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci* 39, S. 345–349.
- Bühler, Yves; Marty, Mauro; Ginzler, Christian (2012): High Resolution DEM Generation in High-Alpine Terrain Using Airborne Remote Sensing Techniques. In: *Transactions in GIS* 16 (5), S. 635–647. DOI: 10.1111/j.1467-9671.2012.01331.x.
- Burga, Conradin A.; Frauenfelder, Regula; Ruffet, Jenny; Hoelzle, Martin; Käab, Andreas (2004): Vegetation on Alpine rock glacier surfaces: a contribution to abundance and dynamics on extreme plant habitats. In: *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 199 (6), S. 505–515. DOI: 10.1078/0367-2530-00179.
- CIAS Software (2015): <http://www.mn.uio.no/geo/english/research/projects/icemass/cias/>. Abgerufen am 26.08.2015.

- Congalton, Russell G.; Green, Kass (Hg.) (2009): Assessing the accuracy of remotely sensed data. Principles and practices. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis.
- Delaloye, R.; Perruchoud, E.; Avian, M.; Kaufmann, V.; Bodin, X.; Hausmann, H. et al. (2008): Recent interannual variations of rock glacier creep in the European Alps. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska 29*, S. 343–348.
- Diaz, Henry F.; Grosjean, Martin; Graumlich, Lisa (2003): Climate Variability and Change in High Elevation Regions: Past, Present and Future. In: *Climatic Change* 59 (1/2), S. 1–4. DOI: 10.1023/A:1024416227887.
- Dobinski, W. (2011): Permafrost. In: *Earth-Science Reviews* 108 (3), S. 158–169.
- Eisenbeiss, H.; Lambers, K.; Sauerbier, M. (2005): Photogrammetric recording of the archaeological site of Pinchango Alto (Palpa, Peru) using a mini helicopter (UAV). In: *Bibliothek der Universität Konstanz*.
- Fotinopoulos, V. (2004): Balloon photogrammetry for archaeological surveys. In: *International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XX ISPRS Congress, Istanbul, Turkey XXXV-B5*, S. 504–507.
- French, Hugh M. (Hg.) (2007): The periglacial environment. 3rd ed. Chichester, England, Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.
- Gomez-Lahoz, J.; Gonzalez-Aguilera, D. (2009): Recovering traditions in the digital era: the use of blimps for modelling the archaeological cultural heritage. In: *J. Archaeol. Sci.* (36 (1)), S. 100–109.
- Haeberli, W. (1985): Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. In: *Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich*, 77, 142.
- Haeberli, W.; Beniston, M. (1998): Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. In: *Ambio*, S. 258–265.
- Haeberli, W.; Hoelzle, M.; Paul, F.; Zemp M. (2007): Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps. In: *Annals of Glaciology* 46 (1), S. 150–160.
- Haeberli, Wilfried; Hallet, Bernard; Arenson, Lukas; Elconin, Roger; Humlum, Ole; Käab, Andreas et al. (2006): Permafrost creep and rock glacier dynamics. In: *Permafrost and Periglacial Processes* 17 (3), S. 189–214. DOI: 10.1002/ppp.561.

- Harwin, Steve; Lucieer, Arko (2012): Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. In: *Remote Sensing* 4 (12), S. 1573–1599. DOI: 10.3390/rs4061573.
- Heim, Luca (2014): Application and Analysis of Terrestrial Laser Scanning in a Periglacial High Mountain Area. *Masterarbeit. Geografisches Institut Universität Zürich.*
- Höhle, J.; Potuckova, M. (2006): The EuroSDR test checking and improving of digital terrain models. In: *EuroSDR Official Publication* (51), S. 10–55.
- Höhle, Joachim; Höhle, Michael (2009): Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (4), S. 398–406. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.02.003.
- Humlum, Ole (2000): The geomorphic significance of rock glaciers: estimates of rock glacier debris volumes and headwall recession rates in West Greenland. In: *Geomorphology* 35 (1-2), S. 41–67. DOI: 10.1016/S0169-555X(00)00022-2.
- ICAO (Hg.) (2011): Unmanned aircraft systems (UAS). Montréal: International Civil Aviation Organization (ICAO cir, 328).
- Immerzeel, W. W.; Kraaijenbrink, P.D.A.; Shea, J. M.; Shrestha, A. B.; Pellicciotti, F.; Bierkens, M.F.P.; Jong, S. M. de (2014): High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles. In: *Remote Sensing of Environment* 150, S. 93–103. DOI: 10.1016/j.rse.2014.04.025.
- Jütte, K. (2008): Vergleich verschiedener low-cost Luftbildaufnahmesysteme sowie Einsatz von Drohnen: Grenzen und Möglichkeiten. In: *Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Der gepixelte Wald-Fachtagung zur forstlichen Fernerkundung.*
- Kääb, A. (2000): Photogrammetry for early recognition of high mountain hazards: New techniques and applications. In: *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* 25 (9), S. 765–770. DOI: 10.1016/S1464-1909(00)00099-X.
- Kääb, A. (2001): Digitale Fotogrammetrie zur Beobachtung alpiner Massenbewegungen. In: *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Fotogrammetrie und Fernerkundung* 10, S. 451–458.
- Kääb, A. (2013): Permafrost and Periglacial Features: Rockglacier and Protalus Forms. In: S. A. Elias, & C. J. Mock (Eds.), *Encyclopedia of Quaternary Science, Amsterdam: Elsevier, 2nd ed.*, S. 535–541.

- Kääb, A.; Haeberli, W.; Gudmundsson, G. H. (1997): Analysing the Creep of Mountain Permafrost using High Aerial Photogrammetry: 25 Years of Monitoring Gruben Rock Glacier, Swiss Alps. In: *Permafrost and Periglacial Processes* 8, S. 409–426.
- Kääb, A.; Huggel, C.; Fischer, L.; Guex, S.; Paul, F.; Roer, I. N. Salzmann, S. Schlaefli, K. Schmutz, D. Schneider, T. Strozzi, Y. Weidmann (2005): Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview. In: *Natural Hazards and Earth System* 5 (4), S. 527–554.
- Kääb, A.; Kaufmann, V.; Ladstädter, R.; Eiken, T. (2003): Rock glacier dynamics: implications from high-resolution measurements of surface velocity fields. In: *Eighth International Conference on Permafrost* 1, S. 501–506.
- Kääb, A.; Vollmer, M. (2000): Surface geometry, thickness changes and flow fields on creeping mountain permafrost: automatic extraction by digital image analysis. In: *Permafrost and Periglacial Processes* (11(4)), S. 315–326.
- Kääb, Andreas (2002): Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air- and spaceborne optical data: examples using digital aerial imagery and ASTER data. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 57 (1-2), S. 39–52. DOI: 10.1016/S0924-2716(02)00114-4.
- Kääb, Andreas; Frauenfelder, Regula; Roer, Isabelle (2007): On the response of rockglacier creep to surface temperature increase. In: *Global and Planetary Change* 56 (1-2), S. 172–187. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.005.
- Kahmen, Heribert (Hg.) (2006): *Angewandte Geodäsie. Vermessungskunde*. 20., völlig neu bearbeitete Aufl. Berlin: Walter de Gruyter (De Gruyter Lehrbuch).
- Kneisel, C.; Kääb, A. (2007): Mountain permafrost dynamics within a recently exposed glacier forefield inferred by a combined geomorphological, geophysical and photogrammetrical approach. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 32 (12), S. 1797–1810. DOI: 10.1002/esp.1488.
- Kraus, K.; Karel, W.; Briese, C.; Mandlbürger, G. (2006). Local accuracy measures for digital terrain models. In: *The Photogrammetric Record* 21 (116), S. 342–354.
- Kraus, Karl (Hg.) (2004): *Photogrammetrie. Band 1: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. 7., vollst. bearb. u. erw. Aufl. Berlin: de Gruyter (De-Gruyter-Lehrbuch).

- Laliberte, Andrea S.; Rango, Albert (2011): Image Processing and Classification Procedures for Analysis of Sub-decimeter Imagery Acquired with an Unmanned Aircraft over Arid Rangelands. In: *GIScience & Remote Sensing* 48 (1), S. 4–23. DOI: 10.2747/1548-1603.48.1.4.
- Lange, Norbert de (Hg.) (2013): Geoinformatik in Theorie und Praxis. 3., vollst. überarb. u. Aktualisierte Aufl. Berlin [u.a.]: Springer spektrum (Lehrbuch).
- Leica Geosystems (2015): http://www.leica-geosystems.ch/de/Totalstationen-TPS_4207.htm. Abgerufen am 20.08.2015.
- M. Maisch; W. Haeberli; R. Frauenfelder; A. Käab; C. Rothenbühler: Lateglacial and Holocene evolution of glaciers and permafrost in the Val Muragl, Upper Engadin, Swiss Alps. In: *M. Phillips, S. M. Springman, & L. Arenson (Eds.), 8th International Conference on Permafrost, Proceedings. Lisse: Swets & Zeitlinger, S. 717–722.*
- Maune, David F. (Hg.) (2007): Digital elevation model technologies and applications. The DEM users manual. 2nd ed. Bethesda, Md.: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Maurer, H.; Hauck, C. (2007): Geophysical imaging of alpine rock glaciers. In: *Journal of Glaciology* 53 (180), S. 110–120.
- Möser, Michael (Hg.) (2012): Handbuch Ingenieurgeodäsie. Grundlagen. 4., völlig neu bearb. Aufl. Berlin [u.a.]: Wichmann (Handbuch Ingenieurgeodäsie, / Michael Möser ... (Hrsg.)[...]).
- Müller, Johann; Gärtner-Roer, Isabelle; Thee, Patrick; Ginzler, Christian (2014): Accuracy assessment of airborne photogrammetrically derived high-resolution digital elevation models in a high mountain environment. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 98, S. 58–69. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.09.015.
- Nex, Francesco; Remondino, Fabio (2014): UAV for 3D mapping applications: a review. In: *Appl Geomat* 6 (1), S. 1–15. DOI: 10.1007/s12518-013-0120-x.
- Niethammer, N.; James, M. R.; Rothmund, J.; Travelletti, Julien; Joswig, M. (2012): UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. In: *Geology* 128, S. 2–11.
- Nuth, C.; Käab, A. (2011): Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. In: *The Cryosphere* 5 (1), S. 271–290. DOI: 10.5194/tc-5-271-2011.
- PermaSense (2015): <http://data.permasense.ch/index.html#home>. Abgerufen am 24.08.2015.

-
- PERMOS (2013): Permafrost in Switzerland 2008/2009 and 2009/2010. In: *Noetzli, J. (ed), Glaciological Report Permafrost No. 10/11 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences* 80pp.
- Pfeifer, N.; Briese, C. (2007): Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (3/W52), S. 311–319.
- Przybilla, H. J.; Wester-Ebbinghaus, W. (1979): Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug. In: *Bildmessung und Luftbildwesen* 47(5), S. 137–142.
- RIEGL (2015): Laser Measurement System GmbH. <http://www.riegl.com/>. Abgerufen am 21.08.2015.
- Rödler, Tobias; Kneisel, Christof (2012): Influence of snow cover and grain size on the ground thermal regime in the discontinuous permafrost zone, Swiss Alps. In: *Geomorphology* 175-176, S. 176–189. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.07.008.
- Roer, I. (2005): Rockglacier Kinematics in a High Mountain Geosystem. In: *Ph.d thesis, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn*.
- Roer, I.; Haeberli, W.; Avian, M.; Kaufmann, V.; Delaloye, R.; Lambiel, C.; Käab, A. (2008): Observations and considerations on destabilizing active rock glaciers in the European Alps. In: *Ninth International Conference on Permafrost ((Vol. 2))*, S. 1505–1510.
- Rothenbühler, C. (2000): Erfassung und Darstellung der Geomorphologie im Gebiet Bernina (GR) mit Hilfe von GIS. *Diplomarbeit. Geografisches Institut Universität Zürich*.
- Salomon, W. (1929): Arktische Bodenformen in den Alpen. In: *Sitzungsbericht der Heidelberger Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse 5. Abhandlungen Walter de Gruyter* (31).
- Schott, John R. (2007): Remote sensing. The image chain approach. 2nd ed. New York: Oxford University Press.
- senseFly (2015): <https://www.sensefly.com>. Abgerufen am 18.08.2015.
- Settele, J.; R. Scholes; R. Betts; S. Bunn; P. Leadley; D. Nepstad et al. (2014): Terrestrial and in land water systems. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi,

- Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)). In: *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*, S. 271–359.
- Springman, S.; Arenson, L. U.; Yamamoto, Y.; Maurer, H.; Kos, A.; Buchli, T.; Derungs, G. (2012): Multidisciplinary investigations on three rock glaciers in the Swiss alps: legacies and future perspectives. In: *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 94 (2), S. 215–243. DOI: 10.1111/j.1468-0459.2012.00464.x.
- Stoffel, M.; Huggel, C. (2012): Effects of climate change on mass movements in mountain environments. In: *Progress in Physical Geography* 36 (3), S. 421–439. DOI: 10.1177/0309133312441010.
- swisstopo (2015c): Bundesamt für Landestopografie. <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/dhm25.html>. Abgerufen am 12.08.2015.
- swisstopo (2015b): Bundesamt für Landestopografie. <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/swissALTI3D.html>. Abgerufen am 12.08.2015.
- swisstopo (2015a): Bundesamt für Landestopografie. <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/images/ortho/swissimage.html>. Abgerufen am 05.08.2015.
- swisstopo (2015d): Bundesamt für Landestopografie. <https://map.geo.admin.ch>. Abgerufen am 17.08.2015.
- swisstopo (2015e): <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/apps/calc/reframe.html>. Abgerufen am 25.03.2015.
- Taubenböck, Hannes (Hg.) (2015): Globale Urbanisierung. Perspektive aus dem all. Berlin, heidelberg: Springer spektrum.
- Vonder Mühll, D. S. (1993): Geophysikalische Untersuchungen im Permafrost des Oberengadins. In: *Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich* (122), S. 1–222.
- Vonder Mühll, D. S.; Arenson, L. U.; Springman, S. M. (2003): Temperature conditions in two Alpine rock glaciers. In: *Proceedings of the Eighth International Conference on Permafrost*, S. pp. 21–25.
- Wallace, Luke; Lucieer, Arko; Watson, Christopher; Turner, Darren (2012): Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory. In: *Remote Sensing* 4 (12), S. 1519–1543. DOI: 10.3390/rs4061519.

- Whitehead, K.; Moorman, B. J.; Hugenholtz, C. H. (2013): Brief Communication: Low-cost, on-demand aerial photogrammetry for glaciological measurement. In: *The Cryosphere* 7 (6), S. 1879–1884. DOI: 10.5194/tc-7-1879-2013.
- Wirz, Vanessa; Geertsema, Marten; Gruber, Stephan; Purves, Ross S. (2015): Temporal variability of diverse mountain permafrost slope movements derived from multi-year daily GPS data, Matternal, Switzerland. In: *Landslides*. DOI: 10.1007/s10346-014-0544-3.
- Woodget, A. S.; Carbonneau, P. E.; Visser, F.; Maddock, I. P. (2015): Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 40 (1), S. 47–64. DOI: 10.1002/esp.3613.

Persönliche Erklärung:

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.