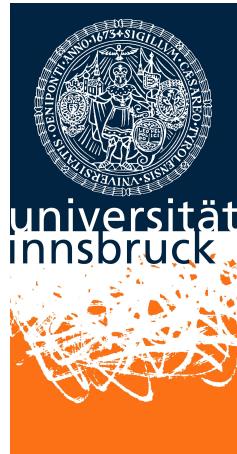


Laserscanmessung zur Bestimmung der Ablation im schuttbedeckten Teil des Hintereisferners

Eine Diplomarbeit eingereicht am
INSTITUT FÜR METEOROLOGIE UND GEOPHYSIK,
UNIVERSITÄT INNSBRUCK



zur Erlangung des akademischen Grades
MAGISTER DER NATURWISSENSCHAFTEN

von
MARTIN JUEN

INNSBRUCK, JÄNNER 2010

Meinen Eltern

Abstract

Laserscanning is a relatively new technology, which is used in this thesis to acquire topographic data, providing information about the ablation on the debris covered part of the Hintereisferner. Currently many alpine glaciers show negative mass balances. Because of the related retreat of the ice masses, there is an increasing number of debris covered dead ice areas, which have lost the dynamic contact with the actual glacier. The coverage with unstable sediments is typical for dead ice. The direct glaciological method cannot be applied in these areas, because the ablation stakes are damaged by the moving debris. Terrestrial laser scanning (TLS) offers the possibility to obtain high-resolution point clouds of the topography. The entire death ice area and a part of the glacier tongue were examined and georeferenced using a differential GPS. Two field surveys have been carried out on 18.08.2008 and on 10.09.2008 in the investigation area. In course of the ALS-X project (Combination and Evaluation of Airborne Laser Scanning Data and TerraSAR-X Data for Glacier and Snow Monitoring) the area around the Hintereisferner situated in the inner Oetztal has been recorded by airborne laser scanning. The data from two flights, that correspond well in time with the measurements carried out in the field, were used for the analysis. The resulting multi-temporal terrain models are examined for changes and compared with each other. Since massbalance studies are ongoing on the Hintereisferner, the data from ablation stakes in the tongue area have been included in the analysis. Furthermore the airborne laser scan data were used to determine the slope and the aspect of the terrain. Using this data three-dimensional grids of global radiation and sunshine duration have been generated. The surface of the dead ice area was classified by the analysis of the back scattered intensity. Using a gray-scale filter, two classes, namely bare ice and debris cover have been distinguished. The calculated thickness changes show the different melting behaviour of debris covered and debris free areas on the death ice and the glacier tongue. The results of the TLS surveys, which had an interval of 23 days, show an average thickness change in the debris covered parts of about 15 cm and about 40 cm in the bare ice areas. This corresponds to an ablation reduction by 62 % and is consistent with the values of other authors. On the entire dead ice body an average ablation of 24 cm has been measured. The results of both methods, ALS and TLS, have been compared. The variations in the dead ice area have an average amount of 28 cm, in the glacier tongue area 57 cm. The accumulated sediments at the bottom of the dead ice could not be registered with the ALS-method, TLS data shows an altitude change of 7 cm.

Kurzzusammenfassung

Die Erfassung von topografischen Daten mittels Laserscanning stellt eine relativ neue Technologie dar, die in dieser Arbeit angewandt wird, um Informationen über die Ablation am schuttbedeckten Teil des Hintereisfners zu erlangen. Aktuell weisen zahlreiche Gletscher negative Massenbilanzen auf. Durch den damit verbundenen Rückzug der Eismassen bleiben immer häufiger schuttbedeckte Toteisbereiche zurück, welche den dynamischen Kontakt zum eigentlichen Gletscher verloren haben. Typisch für Toteiskörper ist die Bedeckung mit instabilen Sedimenten, welche die Anwendung der direkten glaziologischen Methode zur Massenhaushaltsbestimmung, aufgrund der mechanischen Zerstörung der Messpegel, verhindern. Terrestrisches Laserscanning (TLS) bietet die Möglichkeit, hochauflöste Punktwolken der Topografie zu erhalten. Der gesamte Toteiskomplex und ein Teil der Gletscherzunge wurden erfasst und mittels differentiellem GPS georeferenziert. Dazu wurden zwei Messkampagnen am 18.08.2008 und am 10.09.2008 am Hintereisferner durchgeführt. Im Rahmen des ALS-X Projekts (Combination and Evaluation of Airborne Laser Scanning Data and TerraSAR-X Data for Glacier and Snow Monitoring) wurden Airborne Laserscan Befliegungen im hinteren Ötztal durchgeführt. Für diese Arbeit wurden die Daten von zwei Flügen, die zeitlich gut mit den Messungen vor Ort übereinstimmten, zur Analyse herangezogen. Die so entstandenen Geländemodelle werden auf Veränderungen untersucht und miteinander verglichen. Da am Hintereisferner laufend Massenhaushaltsbestimmungen durchgeführt werden, konnte auch ein Messpegel im Zungenbereich zur Gegenüberstellung herangezogen werden. Weiters wurden die Airborne Laserscan Daten genutzt, um die Exposition und Neigung der Geländeoberfläche zu eruieren. Daraus wurden dreidimensionale Modelle mit Informationen über Globalstrahlung und Sonnenscheindauer generiert. Die Toteisoberfläche konnte durch die Auswertung der zurückgestreuten Intensitäten klassifiziert werden. Mit einem Grauwertfilter konnten die Klassen blankes Eis und Eis mit Schuttbedeckung unterschieden werden. Die berechneten Dickenänderungen zeigen das unterschiedliche Abschmelzverhalten von schuttbedeckten und schuffreien Bereichen am Toteis bzw. der Gletscherzunge. Mit dem TLS wurde im Zeitraum von 23 Tagen eine mittlere Dickenänderung im schuttbedeckten Bereich von ca. 15 cm, am blanken Eis von ca. 40 cm gemessen. Das entspricht einer Ablationsreduktion um 62 % und deckt sich mit den Werten anderer Autoren. Der gesamte vermessene Toteisbereich weist eine mittlere Ablation von 24 cm auf. Die Ergebnisse der beiden Messmethoden, ALS und TLS, wurden verglichen. Die Abweichungen im Toteisbereich betragen im Mittel 28 cm, im Gletscherzungengbereich 57 cm. Die am Fuß des Toteiskörpers angehäuften Sedimente konnten mit der ALS-Methode nicht registriert werden, aus den TLS-Daten geht eine Höhenänderung von 7 cm hervor.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	iii
Kurzzusammenfassung	v
Inhaltsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Forschung	3
1.2.1 Laserscanning als Anwendung für glaziologische Fragestellungen . . .	3
1.2.2 Ablation an freien und bedeckten Oberflächen	4
1.3 Methodik und Aufbau der Arbeit	6
2 Methodik und Daten	7
2.1 Geodätische Abbildungen	7
2.2 Laserscanning	8
2.2.1 Airborne Laserscanning	9
2.2.2 Terrestrisches Laserscanning (TLS)	14
2.3 Reflexionseigenschaften des Geländes	18
2.4 Differentielles GPS - Real Time Kinematik	19
2.5 Vorbereitung und Ablauf der Messungen	24
2.5.1 Ablauf der Messung	25
3 Postprocessing - Datenaufbereitung	29
3.1 GPS Koordinaten der Passkugeln	30
3.2 Der ILRIS Parser	33
3.3 Die Software PolyWorks	34
3.3.1 Einlesen und georeferenzieren der Punktwolken	36
3.3.2 Einlesen und vermaschen der Punktwolken	40
3.3.3 Zusammenfügen der Punktwolken	43
3.3.4 Erstellen eines Polygonmodells	46
3.3.5 Bearbeiten des Polygonmodells	47
3.3.6 Feature Tracking	48
3.4 Anwendung des Solar Radiaton Werkzeugs der Software ArcMap	49

4 Ergebnisse	51
4.1 Ergebnisse der GIS Auswertung der ALS Daten	51
4.2 Dickenänderungen	54
4.2.1 Vergleich der Modelle - Dickenänderung TLS	54
4.2.2 Vergleich der Modelle - Dickenänderung ALS	58
4.2.3 Vergleich Dickenänderung TLS - ALS	60
5 Zusammenfassung und Ausblick	63
A Anhang A	65
Literaturverzeichnis	73
Abkürzungsverzeichnis	77
Abbildungsverzeichnis	79
Tabellenverzeichnis	83
Curriculum Vitae	87

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Seit der maximalen Ausdehnung der Alpengletscher um 1850 wurde ein kontinuierlicher Rückzug beobachtet. Ausnahmen stellen die letzten Gletschervorstöße um 1920 und 1980 dar (Kuhn, 2005). Aktuell weisen zahlreiche Gletscher negative Massenbilanzen auf. Durch den damit verbundenen Rückzug der Eismassen bleiben immer häufiger schuttbedeckte Toteisbereiche zurück, die den dynamischen Kontakt zum eigentlichen Gletscher verloren haben. Typisch für Toteiskörper ist die Bedeckung mit instabilen Sedimenten. Durch die mechanische Zerstörung der Messpegel wird die Anwendung der direkten glaziologischen Methode zur Ablationsbestimmung verhindert.

So hat auch der Hintereisferner (HEF) im hinteren Ötztal im Laufe der Jahre massiv an Volumen und Fläche verloren (Abbildung 1.1). Im Jahre 1952 belief sich die Fläche noch auf 10,24 km², während 2009 nur mehr 6,97 km² vom Eis bedeckt waren (IMGI, 2009). Er ist einer der größten Gletscher Tirols, liegt im Rofental oberhalb von Vent und kann in die Kategorie der Talgletscher eingeordnet werden. Er erstreckt sich von der 3739 m hohen Weißkugel zunächst nach Osten und weiter Richtung Nordosten ins Rofental (Abbildung 1.2). Auf der orographisch rechten Seite des Tales hat sich im Laufe der Zeit ein Toteiskörper gebildet (Abbildung 1.3).

Eine Begriffserklärung zum Toteis bietet das Lexikon der Geowissenschaften:

Reste von Eis, die beim raschen Abschmelzen oder beim Zerfall des Eiskörpers im Vorfeld eines Gletschers oder Inlandeises (Eisschild) liegen und keinen Anschluß an das sich noch bewegende Eis mehr haben. Toteis kann von fluvioglazialen Sedimenten um- und verschüttet, in Grundmoränenmaterial eingebettet oder beim erneuten Gletschervorstoß in Stauchmoränen zusammengeschoben werden. Dort ist es vor dem schnellen Abschmelzen geschützt und kann längere Zeit überdauern. Nach dem Abschmelzen entstehen die für eine Toteislandschaft typischen Hohlformen, Sölle und Rinnenseen (Martin und Eiblmaier, 2002).

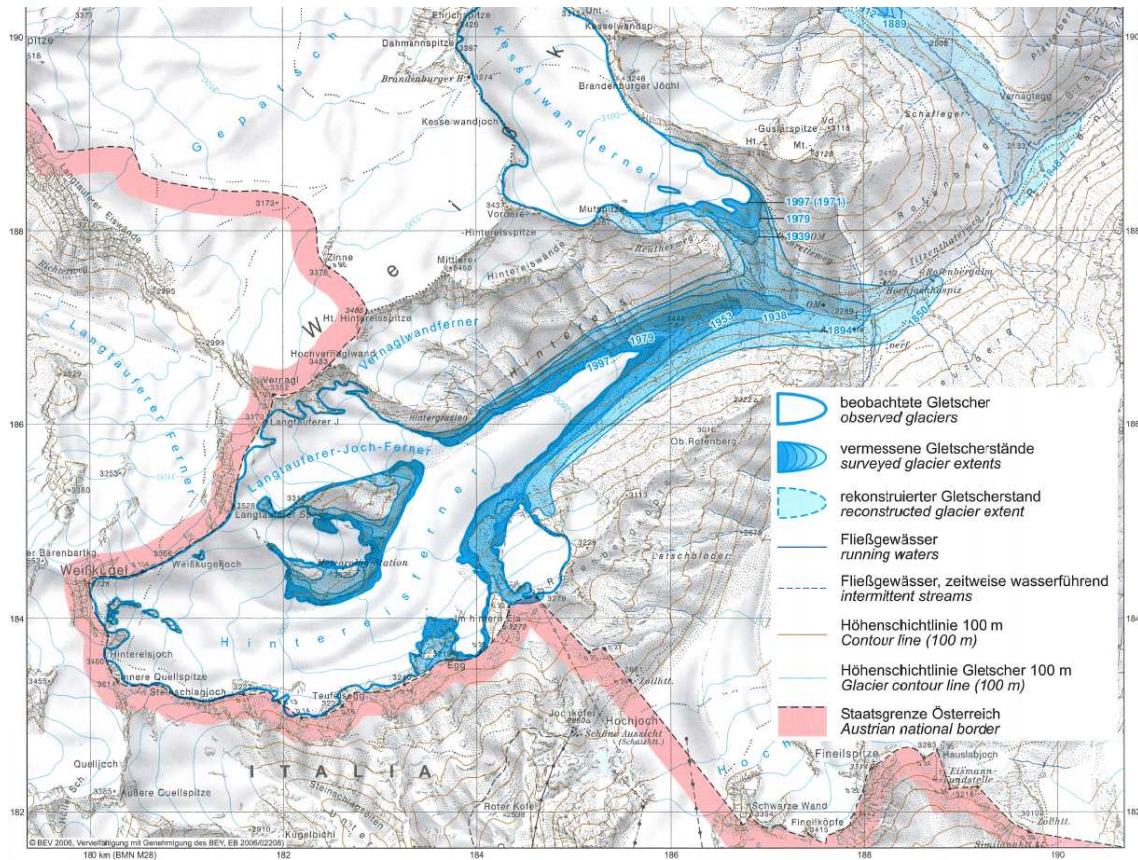


Abbildung 1.1: Rückzug des Hintereisferner seit seiner maximalen Ausdehnung um 1850. Die jeweiligen Gletscherstände sind mit Jahreszahlen versehen. Kartenquelle (Kuhn und Lambrecht, 2007) Hydrologischer Atlas Österreich.

Um Aussagen über die Dickenänderung treffen zu können, bietet sich die Erstellung und der Vergleich von multitemporalen digitalen Höhenmodellen mittels terrestrischem Laserscanning an. Zusätzlich stehen in dem rund 40 km² umfassenden Gebiet um den Hintereisferner auch Airborne-Laserscandaten aus dem ASL-X Projekt (Combination and Evaluation of Airborne Laser Scanning Data and TerraSAR-X Data for Glacier and Snow Monitoring) zur Verfügung. Aus den Airborne-Laserscandaten lassen sich ebenfalls Geländemodelle ableiten, die als Grundlage für Monitoring und Interpretation dienen. Die weit detaillierteren Oberflächen aus den terrestrischen Laserscan-Messungen können denen aus Airborne-Laserscan-Daten gegenübergestellt werden.

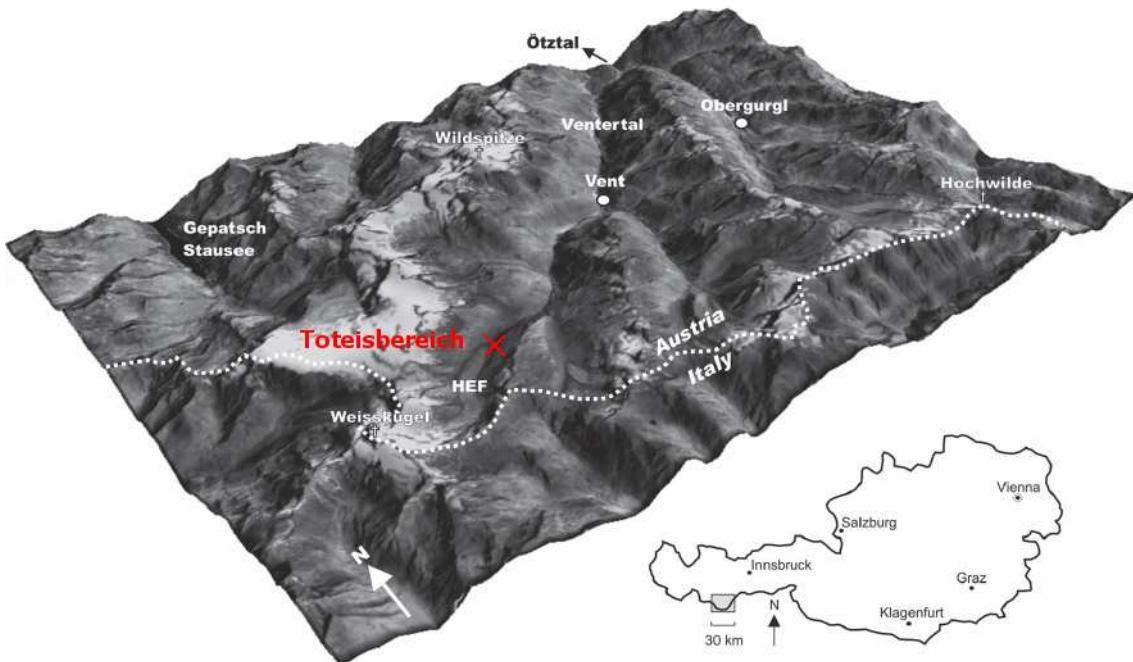


Abbildung 1.2: Lage des Untersuchungsgebiets in Österreich. Ausschnitt der Ötztaler Alpen samt Hintereisferner (HEF) und Toteisbereich. Kartenquelle (Johan P. M. und Petri, 2007).



Abbildung 1.3: Panoramaaufnahme des Toteiskörpers im Zungenbereich des Hintereisferner.

1.2 Stand der Forschung

1.2.1 Laserscanning als Anwendung für glaziologische Fragestellungen

Laserscanning bietet die Möglichkeit hochauflöste dreidimensionale Geländeoberflächen zu generieren. Der erfolgreiche Einsatz für glaziologische Fragestellungen wurde im Bereich des Airborne Laser Scanning (im folgenden als ALS bezeichnet) von Kennett und Eiken (1997) in Norwegen und Favey et al. (1999) am Unteraarferner in der Schweiz gezeigt. Auch in den Ötztaler Alpen stehen seit 2001 ALS-Daten zur Verfügung. Mittlerweile wurden dort etliche Befliegungen zunächst durch das OMEGA (Development of Operational Monitoring System for European Glacial Areas) und später durch das ALS-X Projekt ermöglicht. Aus diesen multitemporalen Datensätzen wurden für den Zeitraum 2001 bis 2003 aus zehn Befliegungen Oberflächenhöhenänderungen berechnet (Geist und Stötter, 2007).

Im Bereich des Terrestrische Laser Scanning(im folgenden als TLS bezeichnet) gibt

es nur wenige Messungen, die für glaziologische Fragestellungen durchgeführt wurden. Conforti et al. (2005) führte drei Vermessungen am Miage See (Mont Blanc, Italien), welcher direkt an einen Gletscher angrenzt durch. Der Vergleich der Messkampagnen zeigte einen klaren Rückgang der Eiskomplexe in der Länge mit Werten von mehreren zehn Metern pro Jahr. An der Zunge der Pasterze (Hohe Tauern, Österreich) wurden seit 2001 vier Messkampagnen mit TLS durchgeführt (Avian und Bauer, 2006). Die Resultate zeigen großräumige Änderungen des gesamten erfassten Gebietes. Drei zusammenbrechende Bereiche im Eiskörper wurden entdeckt und auch verschiedene Höhenänderungen am blanken Eis und am bedeckten Teil der Zunge konnten nachgewiesen werden. An der Zunge wurden Änderungswerte von bis zu 7 m, am angrenzenden schuttbedeckten Bereich von bis zu 3 m in einer Zeitspanne von einem Jahr registriert.

1.2.2 Ablation an freien und bedeckten Oberflächen

Beim Abschmelzen und Verdunsten von Schnee und Eis (Ablation) entstehen charakteristische Formen. Nach Troll (1942) lassen sich zwei Grundformen der selektiven Ablation unterscheiden:

1. *Formen der bedeckten Ablation* infolge der Auflagerung von Fremdkörpern
2. *Formen der freien Ablation* ohne Beteiligung von Fremdkörpern.

Die Formen der bedeckten Ablation gliedern sich in Hohl- und Vollformen. Welche Form entsteht, hängt von der Mächtigkeit des auflagernden Schuttes ab. Dünne Sedimentlagen und kleinere Einzelkörner erwärmen sich bei Einstrahlung, infolge der von Eis verschiedenen Albedo und spezifischen Wärmekapazität, stärker als Schnee und Eis und sinken in die Unterlage ein. Mächtigere Schuttkörper wirken dagegen als Strahlungsschutz für die Unterlage. Die Ablation wird durch die geringere Albedo bei einer teilweise unterbrochenen Sedimentauflage von weniger als ca. 2 cm verstärkt. Wohingegen bei durchgehenden Schichten größerer Dicke der isolierende Effekt überhand nimmt und die Ablation verringert wird (Olefs, 2009).

Bei einer Schuttdicke von 0,1 m wird die Verringerung der Abschmelzrate um 35 % bis 66 % angegeben. Die Reduktion bei 0,4 m Schuttauflage liegt bei 59 % bis 85% (Skogsberg und Lundberg, 2005). Diese Relation wird in Abbildung 1.4 von verschiedenen Autoren in mehreren Gebieten dargestellt. Die freien Schnee- und Eisoberflächen der Umgebung weisen höhere Schmelz- und Verdunstungswerte auf und verlieren somit mehr an Volumen.

Die physikalische Deutung der Bildungsbedingungen wurde von Kraus (1966) anhand von Messungen im Himalaya erarbeitet. Er stellte fest, dass bei der bedeckten Ablation sowohl eine Förderung als auch eine Verzögerung im Eisabtrag festzustellen ist. Ob die Ablation durch Schuttauflagerungen relativ zur freien Eisoberfläche größer oder kleiner ist, hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Er berücksichtigt Albedo, Globalstrahlung, Lufttemperatur, Wasserdampfspannung, Wärmeübergangszahl, Wärmedurchgangszahl (abhängig

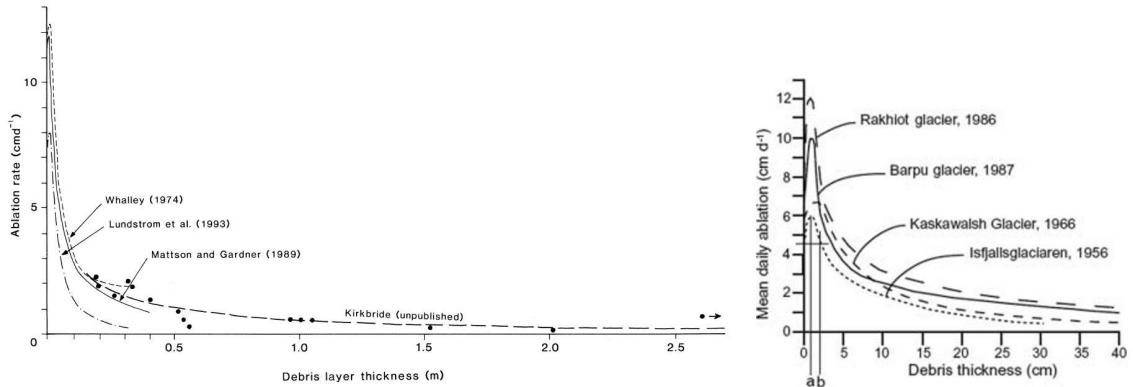


Abbildung 1.4: Zusammenhang zwischen der Mächtigkeit der Schuttauflage und der Ablationsrate. Links: Kurve aus (Kirkbride und Warren, 1999). Rechts: Kurve aus (Nicholson und Benn, 2006).

von der Schichtmächtigkeit) und Luftdruck.

Ablationskegel sind bekannte Erscheinungsformen der bedeckten Ablation, die wir auch während den Messkampagnen am HEF beobachten konnten. Laut Wilhelm (1974) sind bei



Abbildung 1.5: Ablationskegel an der Zunge des HEF.

den Ablationsvollformen Gletschertische und Schneeschmelztische, deren Eissockel durch eine überlagernde Gesteinsplatte vor Insolation geschützt sind, bekannte Erscheinungen. In Abhängigkeit von der Größe der Gesteinsplatte und den klimabedingten Ablationsbe-

tragen können sie 2 bis 4 m hoch werden. Von den Ablationshohlformen sind vor allem Kryokonitlöcher bekannt. Dabei handelt es sich um senkrechte Röhren im Eis mit einem Durchmesser von 1 bis 10 cm, die meist mit Wasser gefüllt sind. Auf ihrem Grund befindet sich stets eine Ablagerung von feinem Schlamm. Durch die höhere Absorption des Sonnenlichts gegenüber den freien Eisflächen erwärmt sich die Schlammschicht schneller und sinkt ein.

1.3 Methodik und Aufbau der Arbeit

Im August bzw. September 2008 wurde mit Terrestrischem Laserscanning in zwei Messkampagnen ein Toteisbereich am Hintereisferner vermessen. Die Georeferenzierung der Passpunkte erfolgte mit differentiellem GPS in Real Time Kinematik. Weiters wurden die Daten von Airborne-Laserscanning-Befliegungen zur vergleichenden Auswertung verwendet. Die Feldarbeiten sind Teil der Diplomarbeit und wurden im Rahmen des ALS X (Combination and Evaluation of Airborne Laser Scanning Data and TerraSAR-X Data for Glacier and Snow Monitoring) Projekts der Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) unterstützt.

Die vorliegende Arbeit ist in fünf einzelne Kapitel unterteilt. Nach der Einleitung wird im Kapitel 2 auf die angewandte Methodik und die verwendeten Daten eingegangen. Auf einen kurzen Exkurs über geodätische Abbildungen, in dem die wichtigsten verwendeten Koordinatensysteme erläutert werden, folgt eine Begriffserklärung des Laserscannings. Die Messprinzipien und die verwendeten Geräte von ALS (Airborne Laserscanning) und TLS (Terrestrischem Laserscanning) werden vorgestellt. Es folgt ein Abschnitt über differentielles GPS (Global Positioning System). Hier wurde im Feld die Real Time Kinematik Methode angewandt, um eine exakte Georeferenzierung zu ermöglichen. Weiters wird über die Vorbereitungen und den Ablauf der Messungen am Hintereisferner berichtet. Kapitel 3 beschreibt die durchgeführten Datenaufbereitungen, die verwendete Software und welche Arbeitsprozesse ausgeführt wurden, um zu Ergebnissen zu kommen. Das Kapitel 4 widmet sich der Diskussion und Interpretation der erhaltenen Ergebnisse. Die mit GIS Software erstellten Rasterdatensätze lassen sich dreidimensional darstellen und beinhalten Informationen über Hangneigung, Exposition, Globalstrahlung und Sonnenscheindauer. Im Abschnitt 4.2, der das Thema Dickenänderungen zum Inhalt hat, werden TLS und ALS zunächst getrennt betrachtet und schließlich miteinander verglichen. In Kapitel 5 werden Schlussvorlgerungen erläutert und ein kurzer Ausblick über die Zukunft der Technologien wird gegeben.

Kapitel 2

Methodik und Daten

2.1 Geodätische Abbildungen

Um einen Laserscan-Datensatz, der zunächst nur im scannereigenen Koordinatensystem vorliegt, richtig auf der Erdoberfläche platzieren zu können, muss der Datensatz in ein übergeordnetes Koordinatensystem transformiert werden.

Geodätische Abbildungen entstehen durch die Projektion der Breiten- und Längenkreise der Erde in die Ebene. Dabei wird ein ebenes, geodätisches Koordinatensystem durch ein kartesisches Koordinatensystem gebildet, bei dem die positive X-Achse nach Norden (im Gauß-Krüger System: Hochwert) und die positive Y-Achse (im Gauß-Krüger System: Rechtswert) nach Osten gerichtet sind.

Das **Gauß-Krüger-System** entspricht einer transversalen (d.h. querliegenden), konformen Zylinderprojektion mit einem längentreu abgebildeten Meridian (d.h. Mercatorprojektion).

Das **UTM-Koordinaten-System** (Universales Transversales Mercator Koordinatensystem) ist eine konforme, transversale, zylindrische Abbildung, ähnlich der Gauß-Krüger Abbildung, bezieht sich jedoch auf ein anderes zugrundeliegendes Ellipsoid. Die Zählung der X-Koordinaten beginnt am Äquator (angegeben mit N für North), die der Y-Koordinaten jeweils am Mittelmeridian (angegeben mit E für East). Die Koordinaten werden in Metern angegeben (de Lange, 2002).

Das **Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989 (ETRS89)** ist ein dreidimensionales geozentrisches Bezugssystem, das auf dem weltumspannenden Internationalen Terrestrischen Referenzsystem (ITRS) basiert. Als Bezugsfäche für das ETRS89 wird das geozentrisch gelagerte Erdellipsoid des Geodätischen Referenzsystems 1980 (GRS80) verwendet. Das ETRS89 definiert ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem mit Ursprung im Massenschwerpunkt der Erde (Geozentrum). Die Z-Achse ist die Erdachse, die X-Z-Ebene steht senkrecht auf der Äquatorebene und enthält den Ortsmeridian der Sternwarte von Greenwich, ihre Schnittgerade mit der Äquatorebene ist die X-Achse. Die Y-Achse ist durch 90°-Drehung der X-Achse gegen den Uhrzeigersinn definiert (Abbildung 2.1) (Landesamt für Vermessung und Geoinformation, 2007).

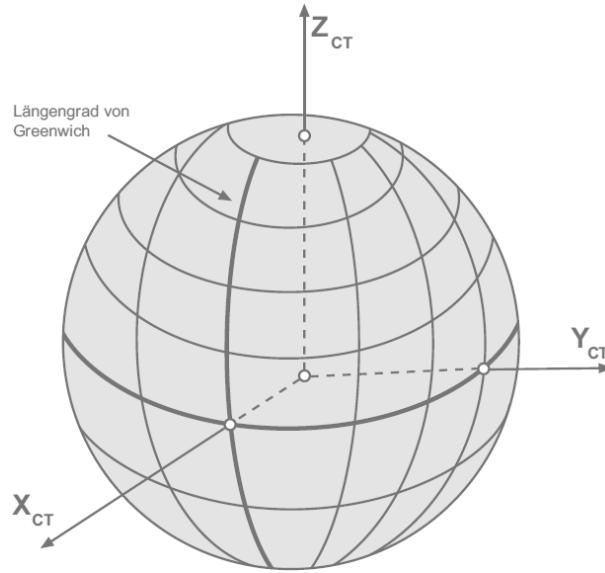


Abbildung 2.1: Das ETRS89, ein dreidimensionales, geozentrisch-kartesisches Koordinatensystem (Landesamt für Vermessung und Geoinformation, 2007).

2.2 Laserscanning

Die Erstellung von digitalen Geländemodellen mit Hilfe der Laserscanning Technik basiert auf dem Prinzip des LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) und hat sich in den letzten Jahrzehnten als präzise und zuverlässige Methode zur Gewinnung topographischer Daten für glaziologische Anwendungen etabliert (Geist, 2005). Beim Laserscanning sendet ein aktiver Sender einen stark gebündelten, gepulsten und monochromatischen Lichtstrahl (**L**ight **A**mplification **b**y **S**timulated **E**mission **o**f **R**adiation), welcher auf dem beobachteten Objekt reflektiert wird. Ein Teil des Lichts wird zum Empfänger reflektiert und dort von einer Photodiode registriert. Über die Messung der Laufzeiten oder der Phasendifferenzen von Lichtimpulsen kann so die Entfernung vom Sensor zum Objekt bestimmt werden. In Figur 2.2 sind die Komponenten eines Laserscansystems dargestellt.

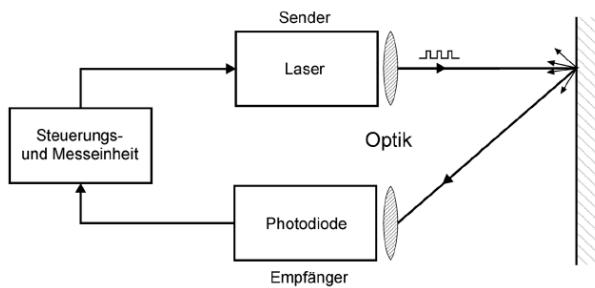


Abbildung 2.2: Vereinfachtes Blockdiagramm eines Laserscanners (Wagner et al., 2003).

Bei den Scannern kann zwischen ALS- und TLS-Systemen unterschieden werden. ALS-Systeme sind flugzeug- oder hubschraubergetragene Systeme und werden vorwiegend zur Erstellung von **D**igitalen **H**öhen **M**odellen (DHM) und **D**igitalen **O**berflächen **M**odellen

(DOM) genutzt. Zum Einsatz kommt ALS in Bereichen wie Waldmanagement, Küstenschutz, Stadtplanung und Naturgefahrenmanagement (Ackermann, 1999). Terrestrische Laserscanner unterscheiden sich von flugzeuggetragenen Systemen in erster Linie dadurch, dass während des Abtastvorganges der Laserscanner nicht bewegt wird. Bei dieser Methode wird das Objekt von mehreren, Standpunkten aus so abgetastet, dass sich die Punktwolken der einzelnen Standpunkte am Objekt geringfügig überlappen (Kraus, 2004b). Anwendung finden TLS in vielen Bereichen wie z.B. Bauwerksdokumentationen, Umweltmonitoring, Überwachung von Steinbrüchen und Tagebauen sowie Industrievermessungen.

2.2.1 Airborne Laserscanning

Das ALS System besteht aus drei Hauptkomponenten (Geist et al., 2003). Einem **Global Positioning System (GPS)** zur Bestimmung der absoluten Position des Sensors, einer **Inertial Measuring Unit (IMU)** zur Bestimmung der Fluglage sowie einem Laserscanner. Ein Computer steuert die Einzelkomponenten und speichert die Daten zeitsynchron 2.3. Beim Airborne Laserscanning wird der Abstand zwischen dem Sensor am Flugzeug und

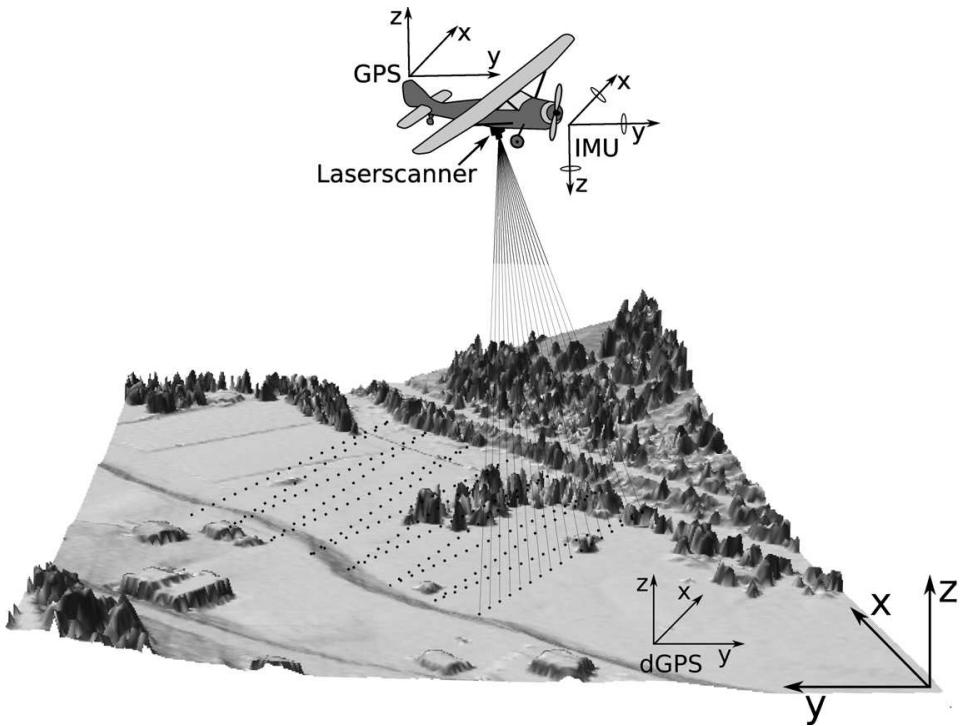


Abbildung 2.3: Schematische Beschreibung der Komponenten eines ALS Systems (Abo Akel et al., 2003).

dem erfassten Punkt auf der Erdoberfläche durch Laufzeitmessung ermittelt. Sind die Position des Scanners und die Richtung des Laserstrahls bekannt, können die Koordinaten des reflektierenden Objekts berechnet werden. Zusätzlich wird der Laserstrahl quer zur Flugrichtung durch eine optomechanische Einrichtung mit jedem Puls geringfügig abgelenkt (siehe Abbildung 2.3). Zusammen mit der Bewegung des Flugzeugs entsteht so eine

Art Zickzacklinie, entlang derer ein breiter Streifen gescannt wird. Werden nun mehrere Streifen nebeneinander abgeflogen, können große Gebiete flächendeckend vermessen werden. In Abbildung 2.4 sind die Flugstreifen der Befliegung vom September 2008 abgebildet. Entlang eines Messstrahls können an verschiedenen Stellen Reflexionen auftreten. Neuere

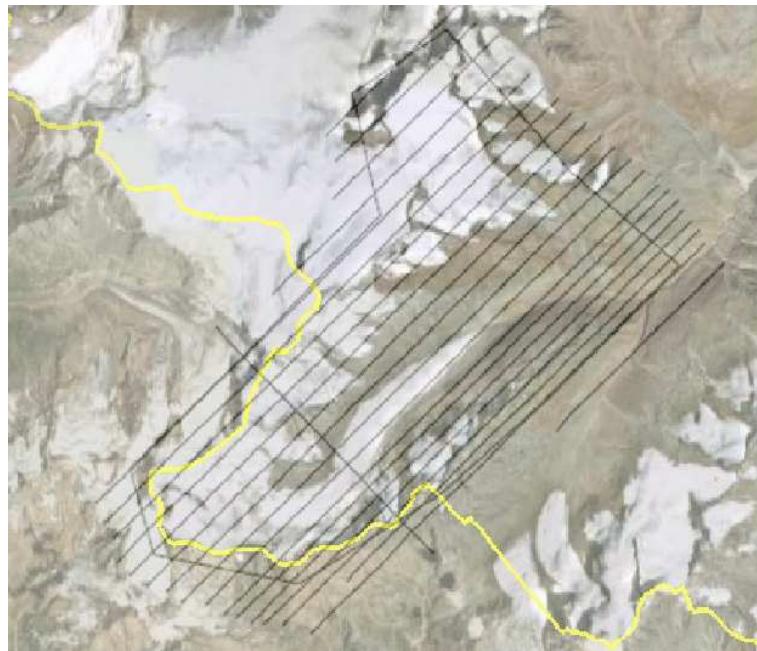


Abbildung 2.4: Flugstreifenübersicht der Befliegung im Bereich des Gletschers Hintereisferner, September 2008 (Topscan, 2008).

ALS-Systeme können zwischen der ersten Reflexion (z.B. an einem Fels) und der letzten Reflexion (z.B. am Gletscher) unterscheiden (Abbildung 2.5) und besitzen heute die Möglichkeit beide Echos zu registrieren, so können im postprocessing (digitale Nachbearbeitung des Datensatzes) digitale Höhenmodelle (DHM) sowie digitale Oberflächenmodelle (DOM) erzeugt werden. Ein digitales Höhenmodell ist ein lage- und höhenmäßiges Ab-

bild der Erdoberfläche ohne Bewuchs oder Gebäude und wird aus der Registrierung des Last-Pulse erzeugt. Ein digitales Oberflächenmodell (DOM) beinhaltet Gebäude und Vegetation und wird aus der Erfassung des First-Pulse erzeugt.

Für die Datenerfassung am Hintereisferner wurde das von der Firma Optech Inc. vertriebene ALTM 3100 mit einer Scanfrequenz von bis zu 70.000 Hz, einer Reichweite von 80 m bis zu 3500 m sowie einer Erfassung der Reflexionsintensität genutzt. Das System bietet die Option vier verschiedene Reflexionen zu registrieren. Die Systemeinstellungen für die Befliegung sind in Tabelle (2.1) dargestellt:

Die Auswertung einer Laserscanneraufnahme gliedert sich in folgende Arbeitsschritte (Topscan, 2008):

1. Datenaufbereitung:

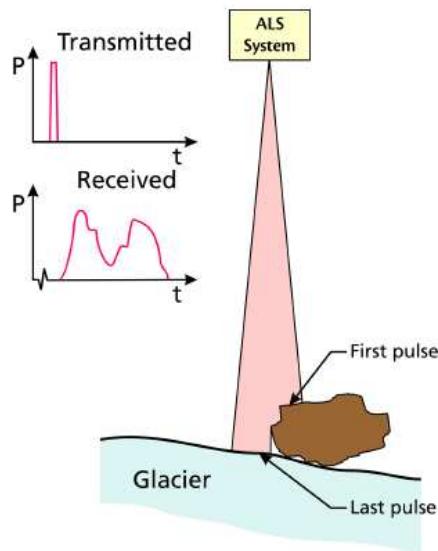


Abbildung 2.5: Mehrfachecho beim ALS. Die Diagramme zeigen die ausgesendete und die empfangene Leistung (Kodde, 2006).

Scannerparameter	ALTM 3100
Messrate	100.000 Hz
Laserstrahldivergenz	0.003°
GPS	Trimble 2 Hz
IMU	POS AV 510
Genauigkeit Position	8 mm @ 100 m
Laser Wellenlänge	1064 nm
Scanwinkel	20°
Messmodi	4 Pulse
Abmessungen	Scanner (L x B x H) 320 x 320 x 347 mm Rotationsbasis (L x B x H) 300 x 280 x 127 mm
Genauigkeit vertikale Distanz	<15 cm @ 1200 m; 1 sigma <25 cm @ 2000 m; 1 sigma <35 cm @ 3000 m; 1 sigma
Genauigkeit horizontale Distanz	1/200 x vertikale Distanz
Datenspeicherung	wechselbare SCSI-Festplatten

Tabelle 2.1: Die wichtigsten Parameter des ALTM 3100.

Die Berechnung der Laserpunkte erfolgte im ETRS 89 (Europäisches Terrestrisches Referenzsystem). Das heisst, die Punkte liegen bezüglich dem GRS 80 (Geodetic Reference System 1980) vor und wurden mittels UTM abgebildet. Dies ist ein Erdmodell, das die wichtigsten Parameter der Erdfigur, ihres Schwerefeldes und der Erdrotation umfasst. Das UTM-System (Universal Transverse Mercator 1980) unterteilt die Erde in 60 vertikale Streifen von 6 Längengraden bzw. maximal 800 km Breite. Diese werden einzeln auf einem kartesischen Koordinatensystem abgebildet.

2. GPS-Auswertung:

Die GPS-Beobachtungen des Flugzeugempfängers und der Bodenstationen wurden zunächst einzeln dekodiert und auf Vollständigkeit (kontinuierliche Datenaufzeichnung) überprüft. Bei der Befliegung standen auch die italienischen GPS-Stationen Sterzing und Mals zur Verfügung. Vor der Verwendung wurde zunächst eine Qua-

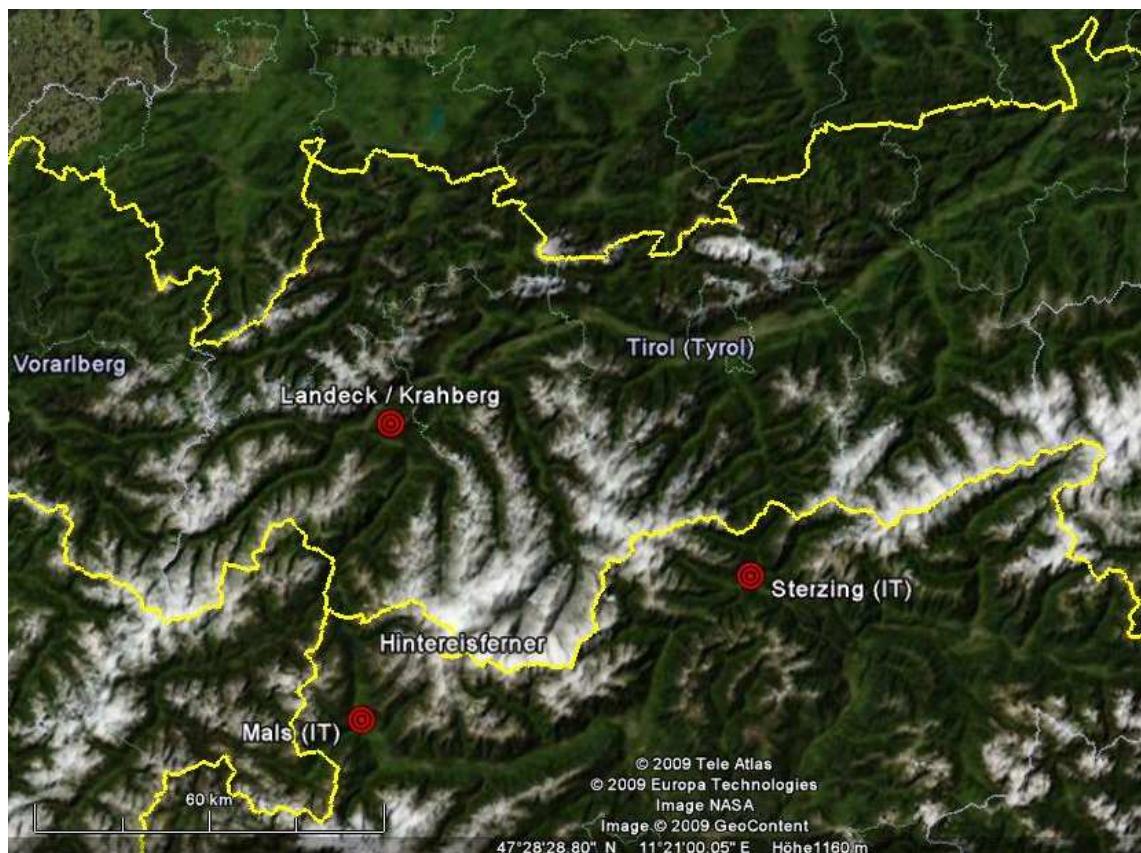


Abbildung 2.6: Karte der verfügbaren GPS Referenzstationen. Kartenquelle: (Google Earth, 2009).

litätsprüfung durchgeführt. Hierzu wurden jeweils die Beobachtungen von zwei GPS-Bodenstationen verwendet. Die Beobachtungen einer Station wurden bei der Positionsbestimmung wie die eines Flugzeugs behandelt, d.h. es wurde angenommen sie bewege sich. Für jeden Beobachtungszeitpunkt wurde eine neue Position berechnet. Bei diesem Vergleich zeigten sich Abweichungen in der Höhe von bis zu 18 cm zu der bisher genutzten Bodenstation Krahberg. Es handelt sich hierbei nicht um konstante Fehlereinflüsse. Die hohen Differenzen werden vermutlich durch die unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen der einzelnen Standorte verursacht (Höhenunterschied ca. 1000 m). Analog zu den früheren Befliegungen und aufgrund der Untersuchungsergebnisse wurde daher für die GPS Auswertung ausschließlich die Permanentstation Krahberg genutzt. Die Berechnung des Flugweges basiert auf einem Modell zur relativen kinematischen Positionsbestimmung unter Verwendung

von doppelten Differenzen der Phasenbeobachtungen.

3. Überprüfung der Systemkalibrierung:

Die Überprüfung der Systemkalibrierung erfolgte mit Hilfe der Querstreifen sowie der Kontrollfläche und wurde mittels einer empirischen Genauigkeitsanalyse überprüft. Die Untersuchung der relativen (inneren) Genauigkeit der Laserpunkte erfolgte durch den Vergleich von Längs- und Querstreifen. Streifenverkippungen sind in den Laserpunktdata nicht vorhanden. Die Analyse der Absolutgenauigkeit basierte auf dem Vergleich der Laserpunkte mit der bereitgestellten Kontrollfläche. Für die Kontrollfläche wurde aus den gemessenen Höhenpunkten ein 'Soll-DHM' mit einer Rasterweite von 1 m berechnet. Für jeden auf der Kontrollfläche gemessenen Laserpunkt wurde eine Höhe aus dem 'Soll-DHM' interpoliert und mit der gemessenen Laserpunktthöhe verglichen.

4. Berechnung der Koordinaten aller Laserpunkte:

Die Laserpunkte wurden unter Verwendung der GPS-Trajektorie, der Aufzeichnungen des Inertialen Navigations Systems, der Laufzeitmessung und der Spiegelablenkung berechnet.

5. Ausgabe der Ergebnisse.

Als Ergebnis einer Befliegung erhält man eine flächendeckende dreidimensionale Punktwolke. Um ein digitales Geländemodell zu generieren wird durch diese Punktwolke eine ausgleichende Fläche gelegt. Das DGM verläuft also gemittelt durch die gemessenen Laserpunkte (Kraus, 2004b).

2.2.2 Terrestrisches Laserscanning (TLS)

2.2.2.1 Prinzip des terrestrischen Laserscanning

Ein TLS-System besteht aus einem Laserentfernungsmesser und einem mechanischen Abtastmechanismus (Scanner), der den Laserstrahl in möglichst kurzen Zeitabständen in verschiedene Richtungen rasterförmig ablenkt (Kern, 2003). Der für diese Diplomarbeit verwendete Laserscanner ILRIS-3D der Firma Optech Inc. verwendet ein Impulslaufzeitverfahren zur Messung der Distanz. Hierzu wird ein sehr kurzer, aber intensiver Laser-Impuls vom Scanner ausgesendet, am Objekt reflektiert und so zum Sensor zurückgestrahlt. Das genaue Zeitintervall zwischen Aussenden und Zurückkehren des Impulses wird gemessen. Wie in Abbildung 2.7 ersichtlich, lässt sich über die Laufzeitmessung mittels der Gleichung

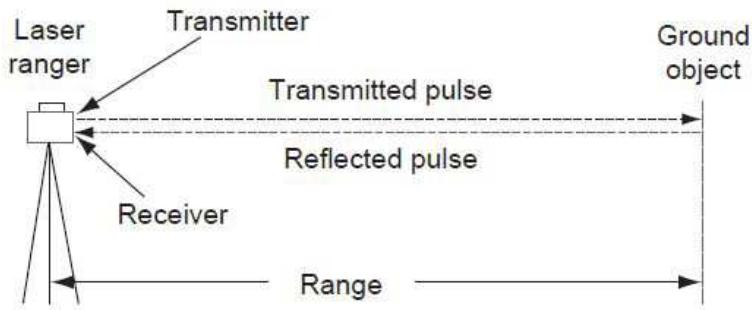


Abbildung 2.7: Prinzip eines TLS mit Impulslaufzeitmessung.

2.1 die Distanz ermitteln.

$$R = \frac{v\Delta t}{2} \quad (2.1)$$

wobei R der Abstand vom Gerät zum Objekt, v die Geschwindigkeit der elektromagnetischen Strahlung und Δt das gemessene Zeitintervall ist.

Während der gesamten Messung wird der Laserstrahl über rotierende bzw. oszillierende Spiegel zeilenweise abgelenkt. Entlang einer horizontalen Scan-Zeile wird der Horizontalwinkel solange schrittweise erhöht, bis das Ende der Zeile erreicht ist. Danach wird der Scanner um einen kleinen Vertikalwinkel verdreht und die nächste horizontale Scan-Zeile abgetastet. Dieses Prinzip ist in Abbildung 2.8 dargestellt. So wird das zu vermessende Objekt kontinuierlich von einem Laserstrahl abgetastet. Für jeden Strahl werden folgende Rohdaten abgespeichert: Der **horizontale und vertikale Winkel**, die **Distanz** zur Objektoberfläche sowie die **Intensität** des reflektierten Signals.

Dadurch erhält man für jeden gemessenen Punkt dreidimensionale Koordinaten, deren Ursprung im Scanner liegen. Das Ergebnis einer Aufnahme ist eine dreidimensionale Punktwolke im lokalen Scanner-Koordinatensystem (Haring, 2003).

Der Terrestrische Laserscanner ILRIS-3D von Optech Inc.

In den späten 90-er Jahren entwickelte die Firma Optech Inc. das ILRIS (Intelligent Laser Range Imaging System), welches ursprünglich für die Canadian Space Agency (CSA) konzipiert wurde. Im Jahr 2000 wurde der auf einem Dreifußstativ montierbare TLS ILRIS-3D

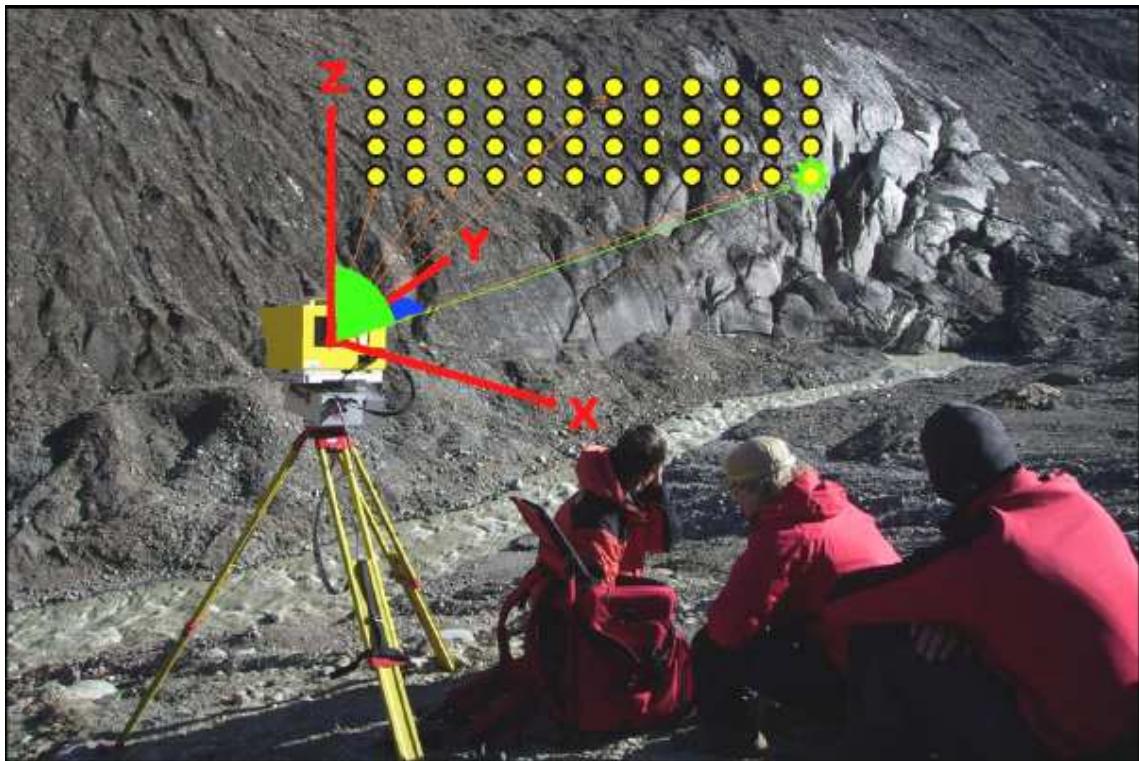


Abbildung 2.8: Scanprinzip des ILRIS-3D (Ludwig, 2009).

präsentiert. Der Scanner benutzt einen Klasse 1 Laser, der infrarote Strahlung mit einer Wellenlänge von 1550 nm emittiert. Die Messfrequenz liegt bei 2500 Punkten pro Sekunde und das Gesichtsfeld des 'Kamerascanners' liegt bei $40 \times 40^\circ$. Der Scanner kann über Ethernet-Kabel oder über W-Lan mit einem PC oder Pocket-PC angesteuert werden. Die gemessenen Daten werden auf einen USB-Stick geschrieben und können anschließend auf einen PC transferiert werden. Im Jahr 2005 wurde der Scanner mit einer Rotations-Kippbasis erweitert, die fortan ermöglichte, einen Bereich von $360^\circ \times 230^\circ$ pro Standpunkt zu scannen, indem das Gesichtsfeld mit Hilfe der motorisierten Basis weitergedreht bzw. gekippt werden konnte. In der Tabelle 2.2 sind die wichtigsten Parameter des ILRIS-3D dargestellt.



Abbildung 2.9: Der ILRIS-3D mit Rotations- und Kippbasis (Optech, 2008).

Scannerparameter	Spezifikation
dynamische Reichweite	3 - 1,500 m bei 80% Reflektivität 3 - 800 m bei 20% Reflektivität 3 - 350 m bei 4% Reflektivität
Messgeschwindigkeit	2,500 Punkte pro Sekunde
Laserstrahldivergenz	0,00974°
Minimaler Punktabstand (Auflösung):	0,00115°
Genauigkeit Distanz	7 mm @ 100 m
Genauigkeit Position	8 mm @ 100 m
Laser Wellenlänge	1500 nm
Augensicherheit:	Laser Klasse 1 (augensicher)
Digitale Kamera	Integrierte digitale Kamera (6 Megapixel)
Scanfeld mit Rotationsbasis	-20° bis +90° vertikal x 360° horizontal -90° bis +20° vertikal x 360° horizontal
Gesichtsfeld	40° x 40°
Gewicht	23 kg
Abmessungen	Scanner (L x B x H) 320 x 320 x 347 mm Rotationsbasis (L x B x H) 300 x 280 x 127 mm
Datenspeicherung	USB memory stick

Tabelle 2.2: Die wichtigsten Parameter des ILRIS-3D. *Herstellerangabe - unter Testbedingungen (Optech, 2008).

Die Steuerung des Scanners erfolgte während der Messungen über einen Pocket-Computer, auch PDA (**Personal Digital Assistant**) genannt. Die geeignete Steuerungs-Software, wel-

che grundlegende Einstellungen wie Kontrast, Helligkeit etc. ermöglicht, stellte die Firma Optech zur Verfügung. Darüber hinaus lässt sich am PDA das Gesichtsfeld des Scanners (40° vertikal und 40° horizontal) darstellen. Anschließend werden jene Regionen markiert, die gescannt werden sollen. Für die markierten Bereiche wird ein mittlerer Abstand vom Scanner zum Zielobjekt ermittelt. Dies geschieht mit einem kurzen Scandurchgang auf einem sehr groben Raster. Basierend auf der Abschätzung der mittleren Entfernung kann die gewünschte Punktdichte mit der Steuerungs-Software eingestellt werden. Es ist jedoch zu bemerken, dass diese Distanzannäherung nur eine grobe Schätzung darstellt und nur als Richtwert für die Anpassung der Punktdichte verwendet werden kann. Der eigentliche Punkt zu Punkt Abstand variiert in den einzelnen Scans und betrachteten Regionen.

Folgend wird eine vereinfachte Übersicht der notwendigen Schritte gegeben, die bei einem Scavorgang durchzuführen sind:

1. System einschalten. Dies geschieht durch Anschließen an eine Stromquelle. In unserem Fall ist dies ein Stromaggregat. Am Display ist erkennbar, wann das System betriebsbereit ist. Jetzt kann der USB-Stick angeschlossen werden.
2. Der Scanner wird mit dem PDA über Wireless LAN verbunden. Die Wireless LAN-Schnittstelle ermöglicht eine drahtlose Kommunikation zwischen Laserscanner und PDA, was sich im Feld als äußerst praktisch erweist.
3. Ausrichtung des Scanners auf das Zielgebiet. Der Laserscanner muss nicht horizontaliert werden. Soll die Wippe an der Rotationsplattform benutzt werden kann jetzt der gewünschte Vertikalwinkel eingestellt werden. Nachdem man die integrierte Kamera den Lichtverhältnissen angepasst hat erstellt der Scanner automatisch ein 360° Panoramabild, dass am PDA angezeigt wird.
4. Auswahl der zu scannenden Region in der Steuerungs-Software. Im Panoramabild können nun rechteckige Bereiche, auch ROI (**R**egion **O**f **I**nterest) genannt, markiert werden.
5. Ermittlung der mittleren Distanz innerhalb der ausgewählten Regionen.
6. Einstellen der Punktdichte, um die gewünschte Auflösung des Scans zu erlangen. Die geschätzten Werte für Scandauer, Gesamtdatenpunkteanzahl und Datenmenge werden angezeigt. Anschließend wird ein Dateiname für den Scan eingegeben. Zusätzlich können Notizen beigefügt werden, welche in die Scandatei geschrieben werden.
7. Scan starten. Am PDA wird der Fortschritt des Scavorganges sowie die verbleibende Zeit angezeigt.
8. System ausschalten, indem die Stromquelle entfernt wird.
9. USB-Stick entfernen. Die Daten können anschließend auf einen PC übertragen werden.

2.3 Reflexionseigenschaften des Geländes

Die Geländeoberflächen am Toteiskomplex verhalten sich gegenüber der auftreffenden Strahlung sehr unterschiedlich. Die Reflexionseigenschaften hängen überwiegend von den physiochemischen Materialeigenschaften, dem Beleuchtungswinkel, der Wellenlänge und den morphologischen sowie den geometrischen Verhältnissen ab. Ob und wieviel Strahlung an einer Oberfläche reflektiert wird, hängt hauptsächlich von den Einstrahlungseigenschaften, der Oberflächenrauheit und dem physikalischen Zustand der Oberfläche ab. Ist die Rauheit einer Oberfläche im Vergleich zur Wellenlänge der auftreffenden Strahlung klein, erfolgt die Reflexion spiegelnd und die Fläche erscheint blank. Ist die Unebenheit einer Oberfläche allerdings größer als die Wellenlänge, erscheint sie matt, weil sie diffus reflektiert (Abbildung 2.10). Bei natürlichen Oberflächen liegt meist eine Mischung aus spiegelnder und diffuser Reflexion vor. Die auftreffende Strahlung wird zwar in alle Richtungen zurückgeworfen, jedoch nicht mit derselben Intensität.

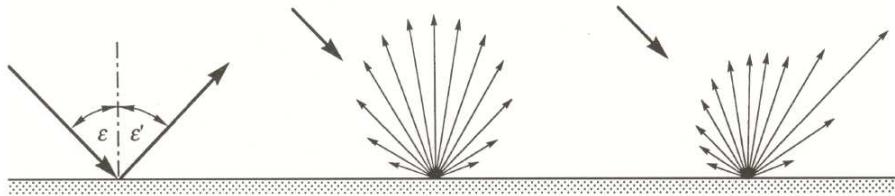


Abbildung 2.10: Verschiedene Arten der Reflexion an einer Oberfläche. Links: spiegelnde Reflexion, Mitte: diffuse Reflexion, Rechts: gemischte Reflexion. Abbildung aus (Albertz, 2007).

Die Abhängigkeit des Reflexionsvermögen von der Wellenlänge wird auch als spektrale Signatur der Oberfläche bezeichnet und ist in der Grafik 2.11 für Schnee und verschiedene Eisarten dargestellt. Die Albedo beschreibt das Verhältnis von reflektierter zu einfallender Strahlung, kurzum die Fähigkeit, einfallende Sonnenstrahlung zu reflektieren.

Weil die Wellenlänge des Laserlichtes beim ILRIS TLS 1500 nm beträgt, ist der Scanner eigentlich weniger gut für Scans von Eisflächen geeignet. Bei einem ersten Test am Parkplatz des Rettenbachferner im August 2008 lieferte dieser jedoch plausible Ergebnisse. Die Wellenlänge des beim ALS verwendeten Scanners liegt im nahen Infrarot bei 1064 nm. Wie in Abbildung 2.11 zu sehen ist, hat die Albedo von Gletschereis einen Wert von ca. 0,1. Das heißt, es werden nur mehr 10 % der einfallenden Strahlung reflektiert, während eine Neuschneeoberfläche eine Albedo von ca. 0,8 besitzt. Das Rückstrahlvermögen des am Toteiskörper verteilten Gesteinsmaterial, das auf dem Toteiskörper liegt, ist geringer als die Albedo von Schnee oder Eis. Obwohl die Reflexionskurven unter Laborbedingungen und Außenmessungen durch die unterschiedlichen Aufnahmeparameter variieren, lässt sich für viele Oberflächenarten ein charakteristischer Verlauf angeben. Dies wiederum ist hilfreich für die Interpretation (Albertz, 2007).

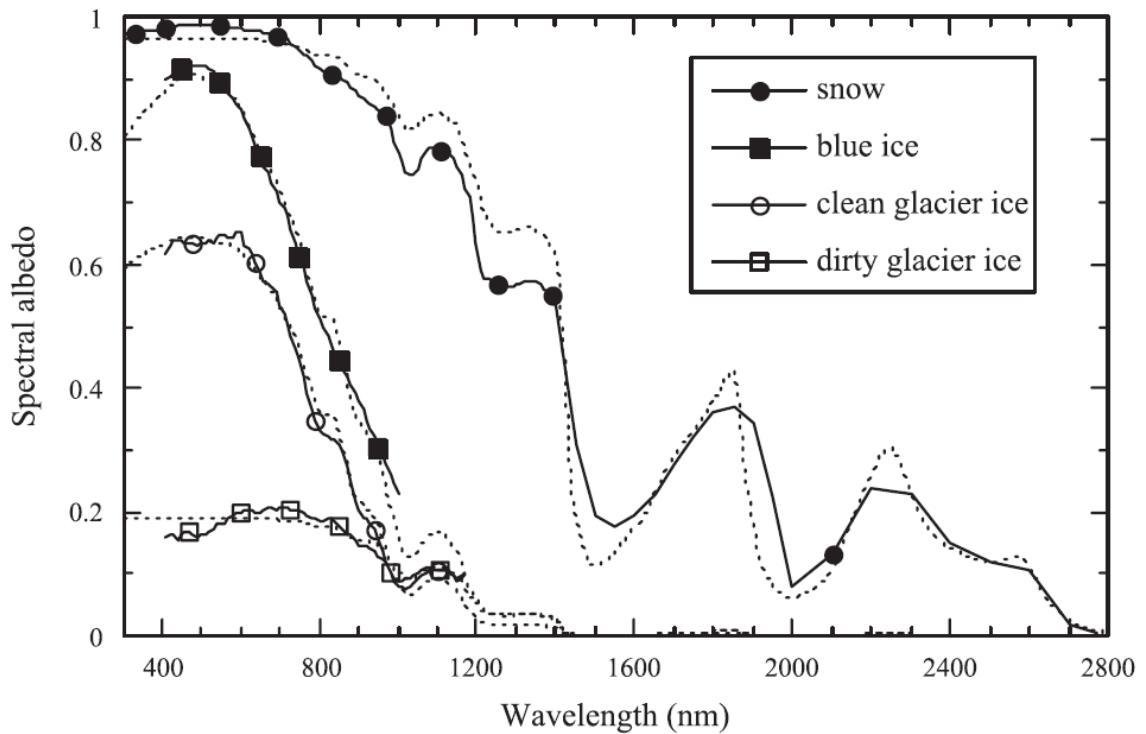


Abbildung 2.11: Die durchgezogenen Linien stellen die gemessene spektrale Albedo für Schnee (Grenfell et al., 1994), blaues Eis (Warren und Brandt, 1993), sauberes und dreckiges (Zeng et al., 1984) Gletschereis dar. Abbildung aus (Greuell und Oerlemans, 2004).

2.4 Differentielles GPS - Real Time Kinematik

Um eine exakte Georeferenzierung der gewonnenen Daten zu ermöglichen, wurden sämtliche verwendete Passkugeln mit differentiellen GPS vermessen. Ähnlich wie beim Laserscanning wird bei der Positionsbestimmung mit GPS das Prinzip der Entfernungsmessung mittels Zeitmessung angewandt. Zu diesem Zweck werden die Laufzeiten der Signale, die vom Satelliten auf zwei verschiedenen Frequenzen ausgesandt werden und beim GPS-Empfänger wieder ankommen, gemessen. Daraus lassen sich die Distanzen und weiters die Koordinaten ableiten. Dieses Verfahren wird in der Vermessung auch als "Triangulation" bezeichnet (Seeber, 2003). Voraussetzung für dieses Methode ist die zeitliche Synchronisation der Satelliten und des Empfängers. Das von einem Satelliten ausgesandte Signal kann als Kugelsphäre um den Satelliten gesehen werden, auf deren Oberfläche das Signal gleichzeitig empfangen wird (Abbildung 2.12). Im Schnittpunkt der Kugelsphären liegt die Position des Empfängers. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung bewegt sich in einer Größenordnung von ca. 10 m und ist somit für eine exakte Georeferenzierung nicht brauchbar. Für diese Abweichungen gibt es physikalische und gerätetechnische Ursachen, die korrigiert werden können (Dieter, 1996).

Es treten mehrere Fehlerarten und -einflüssen bezüglich der Positionsbestimmung auf, die korrigiert werden müssen um die gewünschte Exaktheit zu erlangen:

- Satellitengeometrie:

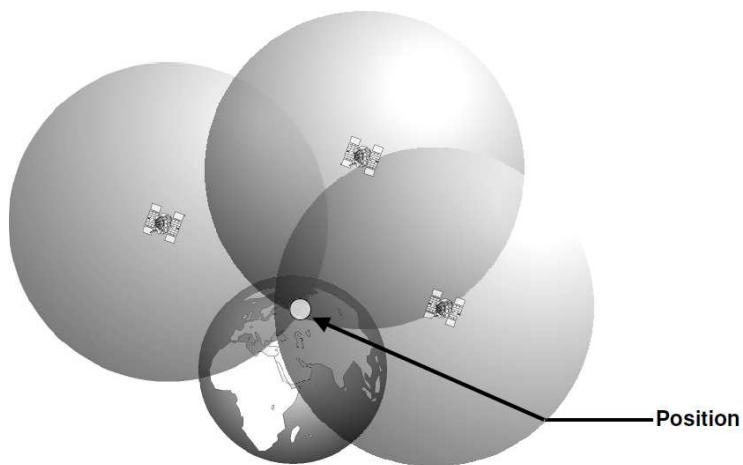


Abbildung 2.12: Der Schnittpunkt dreier Kugeln bestimmt die Position (Zogg, 2009).

Die Konfiguration der Positionen der Satelliten bezüglich des Empfangsgerätes kann die Genauigkeit der Positionsbestimmung beeinträchtigen. Wie in Abbildung 2.13 zu

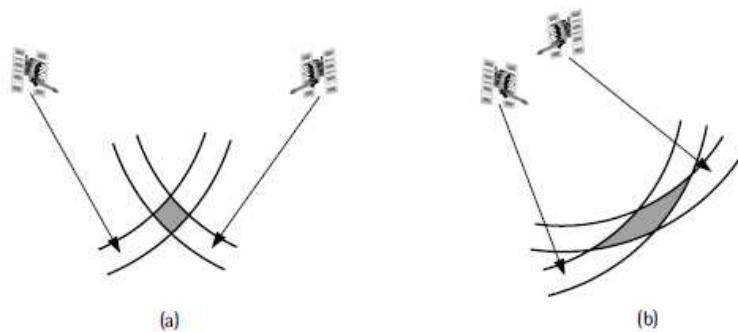


Abbildung 2.13: Der Einfluss der Anordnung von Satelliten - (a) günstige Satellitengeometrie; (b) ungünstige Satellitengeometrie (El-Rabbany, 2002).

erkennen ist, wird sich die Genauigkeit erhöhen, je besser die Satelliten am sichtbaren Himmel verteilt sind. Dieser Effekt wird auch Dilution of Precision (DOP) genannt und beschreibt die Höhe der Streuung der Messwerte. Der DOP gibt somit Auskunft über die Güte der Satellitenanordnung. Folglich wirkt sich die "Bedeckungsgeometrie" auf die Größe der restlichen Fehler aus.

- Satellitenumlaufbahnen:

Durch Gravitationskräfte können die Umlaufbahnen der Satelliten geringfügig beeinträchtigt werden. Die exakten Daten der Umlaufbahnen werden jedoch regelmäßig kontrolliert, korrigiert und in den Ephemeridendaten zu den Empfängern gesandt.

- Mehrwegeeffekt:

Die Satellitensignale werden durch Reflexion an Objekten auf der Erdoberfläche zum GPS Empfangsgerät gesendet. Das reflektierte Signal benötigt eine längere Zeit-

spanne als das direkte Signal und verursacht so einen Fehler. Da die vom Satelliten gesendeten Radiowellen rechtsdrehend polarisiert sind und sich die Polarisationsrichtung bei einer Reflexion ändert, kann der Mehrwegeeffekt durch eine geeignete Antenne unterdrückt werden.

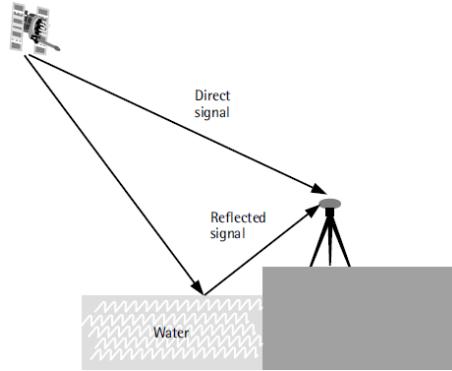


Abbildung 2.14: Mehrwegeeffekt - Das reflektierte Signal legt eine längere Strecke zurück (El-Rabbany, 2002).

- Atmosphärische Effekte:

Im Vakuum breitet sich elektromagnetische Strahlung mit Lichtgeschwindigkeit aus. In der Troposphäre und in der Ionosphäre breiten sich die Radiowellen mit geringerer Geschwindigkeit aus. Als Ionosphäre wird der Bereich zwischen 60 km und 1000 km Höhe bezeichnet. Durch die Strahlung der Sonne bilden sich hier zahlreiche Elektronen und Ionen. Je nach Aktivität der Sonne verändert sich also der Brechungs- und Reflektionsfaktor, was wiederum eine längere Laufzeit der elektromagnetischen Wellen des Satelliten mit sich bringt. Da sich Wellen mit niedrigen Frequenzen stärker verlangsamen als jene mit hohen Frequenzen, werden Signale mit zwei verschiedenen Wellenlängen (Frequenz 1: 1575,42 MHz; Frequenz 2: 1227,6 MHz) ausgesendet. Aufgrund der gemessenen Laufzeitdifferenzen kann die ionosphärische Laufzeitverlängerung berechnet werden (Abbildung 2.15).

Auch in der Troposphäre (bis ca. 15 km) kommt es durch unterschiedliche Wasserdampfkonzentrationen zu einer Verringerung der Geschwindigkeit des Signals. So haben auch die Wetterverhältnisse einen Einfluss auf die Positionsbestimmung. Der verursachte Fehler ist im Vergleich zur ionosphärischen Laufzeitenverlängerung gering.

- Uhrenungenauigkeit:

Die exakte Positionsbestimmung ist hauptsächlich von der Zeitgenauigkeit abhängig. Bei kleinsten Messzeitfehlern der Signallaufzeit treten sehr große Fehler in der Distanzberechnung auf. Während die Atomuhren in den Satelliten einen Fehler von ca. 60 ns aufweisen liegt der Fehler der Quartzuhren in den Empfangsgeräten bei ca. 20 ms. Aus diesem Grund werden die Uhren während der Positionsbestimmung synchronisiert.

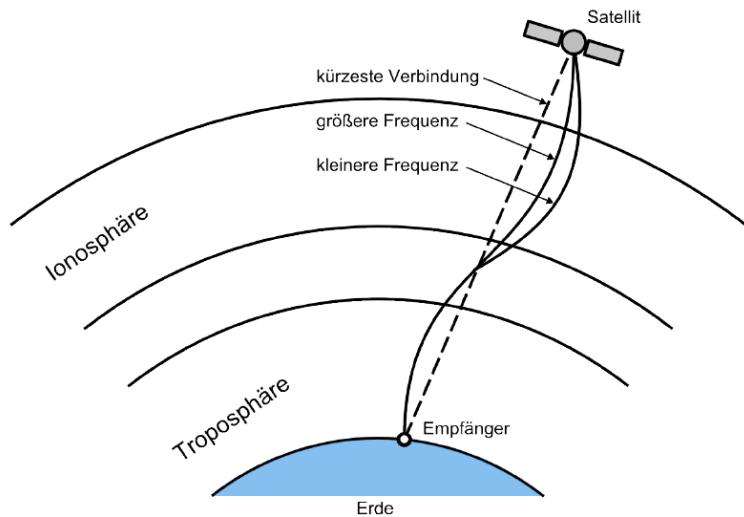


Abbildung 2.15: Wellenausbreitung zweier Frequenzen (Kahmen, 2006).

- Relativistische Effekte:

Bedingt durch die hohe Geschwindigkeit der GPS-Satelliten müssen bei der Zeitmessung an Bord die Effekte der Relativitätstheorie berücksichtigt werden (Schlueter und Pesec, 1982). Ohne die Berücksichtigung dieser Abweichungen, würde die GPS-Zeit gegenüber der internationalen Atomzeit "vorgehen".

Aus der speziellen Relativitätstheorie geht hervor, dass die Zeit für ein sich bewegendes System im Vergleich zum ruhenden Beobachter langsamer vergeht.

Aus der allgemeinen Relativitätstheorie ist bekannt, dass der Unterschied im Gravitationspotential von Satellit und Empfänger einen Einfluss auf die Uhren der künstlichen Trabanten hat.

Tabelle 2.3 listet die Fehlerursachen mit Angabe der in der Horizontalen entstandenen Fehler auf.

Fehlerursache	Fehler
Ephemeridendaten	1,5 m
Satellitenuhren	1,5 m
Einfluss der Ionosphäre	3,0 m
Einfluss der Troposphäre	0,7 m
Mehrwegempfang	1,0 m
Einfluss des Empfängers	0,5 m
Totaler RMS-Wert	4,0 m

Tabelle 2.3: typischer RMS-Fehler der Fehlerursachen bei GPS Messungen (Zogg, 2009)

Um eine höhere ortsbezogene Genauigkeit zu erlangen, können die oben angegebenen Fehler korrigiert werden. Zu diesem Zweck bedient sich das DGPS-System einer stationären Referenzstation (Abbildung 2.16), deren genaue Koordinaten bekannt sind. Die Diffe-

renzen zwischen den gemessenen Distanzen und den tatsächlichen Sollwerten werden als Korrekturdaten für den Empfänger, der die eigentlichen Punkte vermisst, zur Verfügung gestellt. Dieser Empfänger wird auch Rover genannt. Wenn die Korrekturdaten in Echtzeit



Abbildung 2.16: Verwendung von Referenzstation und Rover für die Real Time Kinematik DGPS-Messung am HEF.

an den Rover übermittelt werden und somit die endgültigen Punktkoordinaten sofort bei der Messung erzeugt werden, spricht man von einem **Real Time Kinematic System** (2.17).

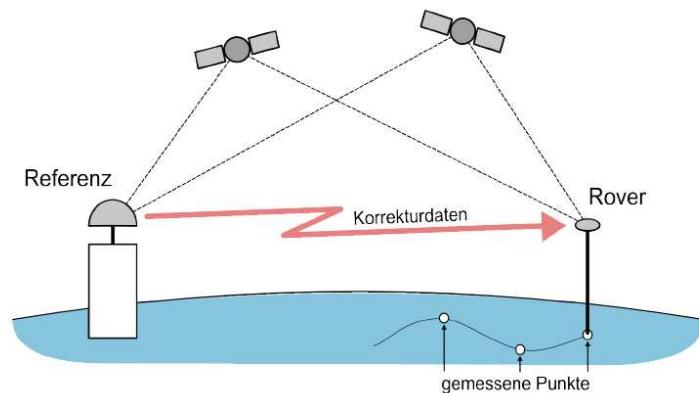


Abbildung 2.17: Prinzip des Real-Time-Kinematik-Verfahrens (Niederwald, 2008).

2.5 Vorbereitung und Ablauf der Messungen

Die geplanten Geländeaufnahmen wurden im Zungenbereich des Hintereisferner durchgeführt. Dort befindet sich auf der orographisch rechten Seite des Tales ein Toteiskörper, dessen Dickenänderung mit TLS vermessen werden sollte (Abbildung 2.18). Der Trans-



Abbildung 2.18: Panoramafoto vom 18.08.2008 des schuttbedeckten Toteisbereichs der vermessene wurde. Im hellen Bereich ist rechts das alte Gletschertor zu erkennen, welches den nördlichen Rand des Toteisbereichs darstellt. Ebenfalls in der Mitte, gut zu erkennen, der spaltige Bruch. Im unteren, dunklen Bereich ist der erste Standpunkt sichtbar.

port der umfangreichen Ausrüstung erwies sich als sehr anstrengend und nahm viel Zeit in Anspruch. Die Anfahrt erfolgte von Innsbruck aus, über das Ötztal, in das Venterthal bis nach Vent, weiter in das Rofental bis zu den Rofenhöfen. Ca. 2 km entfernt von Vent befindet sich diese höchst gelegene Dauersiedlung der Ostalpen (2014 m Seehöhe). Das gesamte benötigte Material wurde von dort aus über das Hochjoch Hospiz bis zum Messgebiet von einer achtköpfigen Mannschaft getragen. Für den 9 km langen Fussmarsch benötigte die Gruppe drei bis vier Stunden. In Tabelle 2.4 eine Auflistung der verwendeten Messausrüstung:

Messausrüstung, Spezifikation	Anzahl
Laserscanner inkl. Plattform und PDA	1 Stk.
Stromerzeuger inkl. Benzinkanister	1 Stk
Kabelrolle	1 Stk.
Stative für TLS und DGPS-Referenzstation	2 Stk.
Prismenstäbe	5 Stk.
Spinnen	6 Stk.
Kunststoffpasskugeln \varnothing 20 cm	3 Stk
Kunststoffpasskugeln \varnothing 7,8 cm	3 Stk
Adapter für Kugeln	6 Stk.
GPS 500-Systeme von Leica	3 Stk.

Tabelle 2.4: Messausrüstung für die beiden Messkampagnen am Hintereisferner.



Abbildung 2.19: Zustieg zum Vermessungsgebiet. Von den Rofenhöfen über das Hochjoch Hospiz zum Toteisbereich

2.5.1 Ablauf der Messung

Der erste Vermessungstermin für den Toteisbereich am Hintereisferner war für den 18. und 19.08.2008 festgelegt. Angekommen an der Zunge des Gletschers, konnte eine Gruppe sofort mit dem Aufbau der differentiellen GPS-Referenzstation beginnen. Die verbleibenden Mitglieder kümmerten sich um den Aufbau des Scanners samt Stromaggregatoren und der Passkugeln. Da möglichst der gesamte Toteisbereich erfasst werden sollte, wurde der erste Standpunkt so gewählt, dass der äußerste Bereich mit dem alten Gletschertor noch erfasst werden konnte. Diese Passkugeln wurden als Verknüpfungspunkte verwendet, um die einzelnen Scans im postprocessing zu einer Punktwolke zusammenzufügen. Die Platzierung (Abbildung 2.20) gestaltete sich recht schwierig, da diese von möglichst vielen Standpunkten aus sichtbar sein sollten. Um beim zweiten Vermessungstermin wieder dieselben Passpunktpositionen verwenden zu können, wurden die Punkte am Boden markiert.

Zuerst wurden die Passkugeln mit hoher Punktdichte gescannt. Eine Auflösung von 2 mm wurde angestrebt. Es stellte sich schon bald heraus, dass die kleinen Passkugeln (\varnothing 7,8 cm) am Display des PDA's kaum auszumachen sind. Im Laufe der Vermessung wurde eine Methode entwickelt, um die Markierung am pixeligen Display des Minicomputers auch für diese Passkugeln richtig zu positionieren. Dazu wurde ein rechteckiger Bereich am Display markiert, in dem die zu scannende Passkugel vermutet wurde. Beim Starten des Scans wird der markierte Bereich am großen Display des Scanners angezeigt und für



Abbildung 2.20: Passkugel $\varnothing 20$ cm auf Prismenstab, gestützt durch Spinne.

einige Sekunden mit einem Live-Bild der Scanner-Kamera hinterlegt. Eine Person stellt sich mit einem Bekleidungsstück, welches sich farblich möglichst vom Hintergrund abhebt, vor die Passkugel. Nun lässt sich am Scanner-Bildschirm überprüfen ob der Bereich richtig gewählt wurde. Steht die Person im gewählten Bereich, kann der Scan fortgesetzt werden, sonst wird abgebrochen und der Bereich neu definiert. Im Laufe der Messung stellten sich die Hütten schlafsäcke als geeignetes Hilfsmittel heraus. Mit dieser Methode konnte zügig gearbeitet werden. Der Vorteil war der, dass die zu scannende Region für die Kugeln minimal gehalten werden konnte. Dies brachte eine große Zeittersparnis mit sich, da durch die hohe Auflösung mit der die Passkugeln gescannt wurden, dieser Scandurchgang bis zu einer Stunde dauerte. Somit konnte die Anzahl der zu messenden Punkte gering gehalten werden.

Im weiteren Verlauf wurde die erste Aufnahme des Geländes durchgeführt, welcher den Bereich vom nördlichen Rand des Toteiskörpers bis zum spaltigen Bruch umfasste. Die gewünschte Auflösung für die Vermessung des Geländes wurde auf ca. 5 cm in mittlerer Entfernung eingestellt, wodurch sich eine Scandauer je nach Standort von ein bis zwei Stunden ergab. Diese Zeit konnte genutzt werden, um die Koordinaten der Passkugeln mittels differentiellem GPS exakt zu erfassen. Am ersten Tag der Messkampagne konnte von zwei Standpunkten aus gescannt werden. Während des zweiten Scans war am Display des Scanners erkennbar, dass die zurückgestreute Intensität speziell im Bereich des Bruchs zu gering war, um noch Daten zu liefern. Deswegen wurde entschieden, am nächsten Tag, sofern es die Zeit zulassen würde, den Bruchbereich noch einmal von einem näheren Standpunkt aus zu scannen. Der Retourmarsch zum Hochjoch Hospiz dauerte ca. eine Stunde.

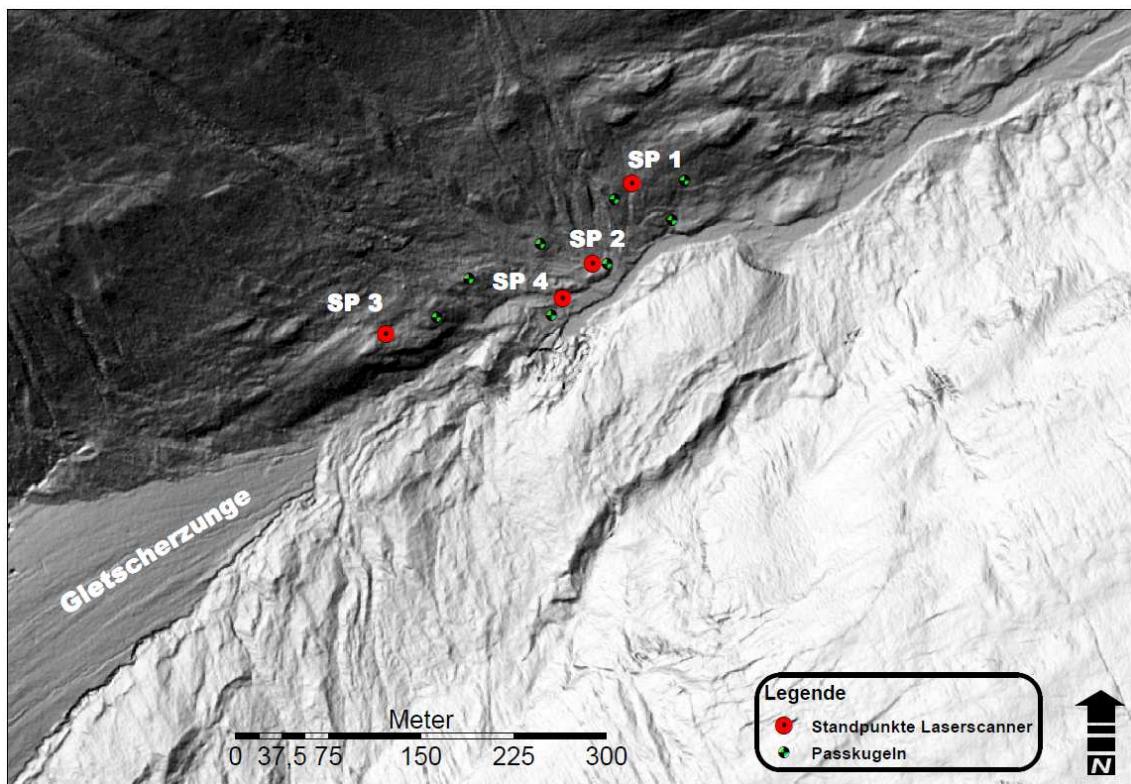


Abbildung 2.21: Übersicht über das vermessene Gebiet. Die Karte wurde mit ArcGIS als Hills-hade erzeugt. (Kartengrundlage: ALS Daten einer Befliegung vom 07.08.2008.) Gauß-Krüger-Koordinatensystem.

Am darauffolgenden Tag wurde vom dritten Standpunkt aus der Bereich bis zur Zunge des Hintereisferner gescannt. Auch der geplante Scan im Bereich des Bruchs konnte noch durchgeführt werden.

Am 9. September 2008 startete die zweite Messkampagne. In zwei aufeinanderfolgenden Tagen wurde derselbe Bereich von den bereits festgelegten Standpunkten aus gescannt. Die Erfahrungen des vorigen Messtermins erleichterten das Arbeiten vor Ort und es wurden nicht mehr so viele Gletscherknechte benötigt.

Kapitel 3

Postprocessing - Datenaufbereitung

Die Auswertung der GPS Rohdaten wurde von Thomas Niederwald bereitgestellt, der sich in seiner Diplomarbeit dem Thema ausführlich widmet (Niederwald, 2008).

Das Datenvolumen einer Messkampagne beträgt ca. 700 Megabyte. Ein USB-Stick pro Termin reichte aus, um die Daten zu speichern. Der TLS legt für jeden einzelnen Scanauftrag, der über die Controller-Software erstellt wird, einen separaten Ordner an. Im Ordner befinden sich die Bilder des gescannten Bereiches. Die Rohdaten sind in einer eigenen Datei mit der Endung .blk zu finden. In einer Textdatei liegen die dem Scan beigefügten Notizen.

Um die Rohdaten in ein brauchbares Format umzuwandeln, stellte Optech eine Standardsoftware, den ILRIS Parser zur Verfügung. Damit werden die einzelnen Scans als ASCII Dateien exportiert und können in die Software PolyWorks eingebunden werden.

PolyWorks ermöglicht es, die einzelnen Scans zu einer Punktwolke zusammenzufügen. Anschließend können TIN (triangulated irregular network) Modelle erstellt werden. Auch die Georeferenzierung lässt sich bewerkstelligen. Weiters bietet das Programm umfangreiche Möglichkeiten, die erstellten Modelle miteinander zu vergleichen.

3.1 GPS Koordinaten der Passkugeln

Um die Passkugeln mit einer Genauigkeit von ca. 2 cm in Lage und Höhe zu erfassen, musste zunächst ein neuer Festpunkt bestimmt werden. In unmittelbarer Nähe des Messareals befindet sich ein im österreichischen M28 bekannter Festpunkt. Für diesen Punkt wurden die ETRS-89-Koordinaten mit einer Genauigkeit von ca. 0,5 mm bestimmt, um ihn als Referenzstation für die RTK Messungen nutzen zu können (Niederwald, 2008).



Abbildung 3.1: Messaufbau einer DGPS Referenzstation (Niederwald, 2008).

Zur Georeferenzierung der Laserscans wurden die Koordinaten der Kugeln im System ETRS 89 UTM Abbildung mit ellipsoidischen Höhen und Adriahöhen verwendet.

Koordinaten der Passpunkte der ersten Messreihe:

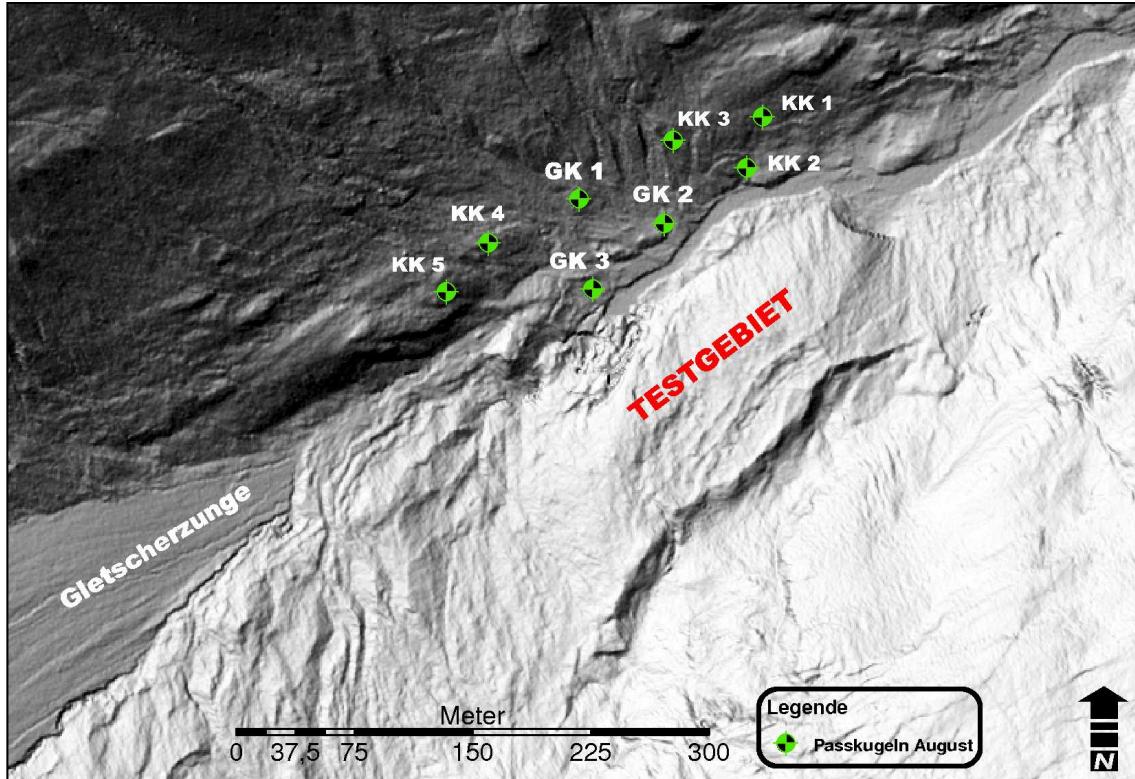


Abbildung 3.2: Netzbild der Passkugelkoordinaten vom 18.08.2009.

Punkt	Ostwert	Nordwert	ellip. Höhe für Bodenpunkt	Kugel ü. Boden	ellip. Höhe für Kugelmitte	Adriahöhe für Kugelmitte
GK1	32637230.053	5186574.970	2491.447	1.152	2492.599	2439.901
GK2	32637284.218	5186559.011	2477.357	1.150	2478.507	2425.809
GK3	32637239.019	5186517.684	2477.504	1.147	2478.651	2425.953
KK1*	32637336.663	5186594.331	2475.252	1.568	2476.820	2424.122
KK2	32637346.843	5186626.557	2487.132	1.231	2488.363	2435.665
KK3	32637289.935	5186611.694	2491.821	1.231	2493.052	2440.354
KK4	32637172.367	5186546.811	2502.113	1.231	2503.344	2450.646
KK5	32637146.102	5186515.901	2503.933	1.568	2505.501	2452.803

Tabelle 3.1: Koordinaten der Kugeln im System ETRS 89 UTM Abbildung mit ellipsoidischen Höhen und Adriahöhen der Augustmessung.* Die Koordinaten der Kugel kk1 konnten aus der Messung vom 18.08.2008 nicht bestimmt werden, sie sind aus der Messung vom 09.09.2008

Koordinaten der Passpunkte der zweiten Messreihe:

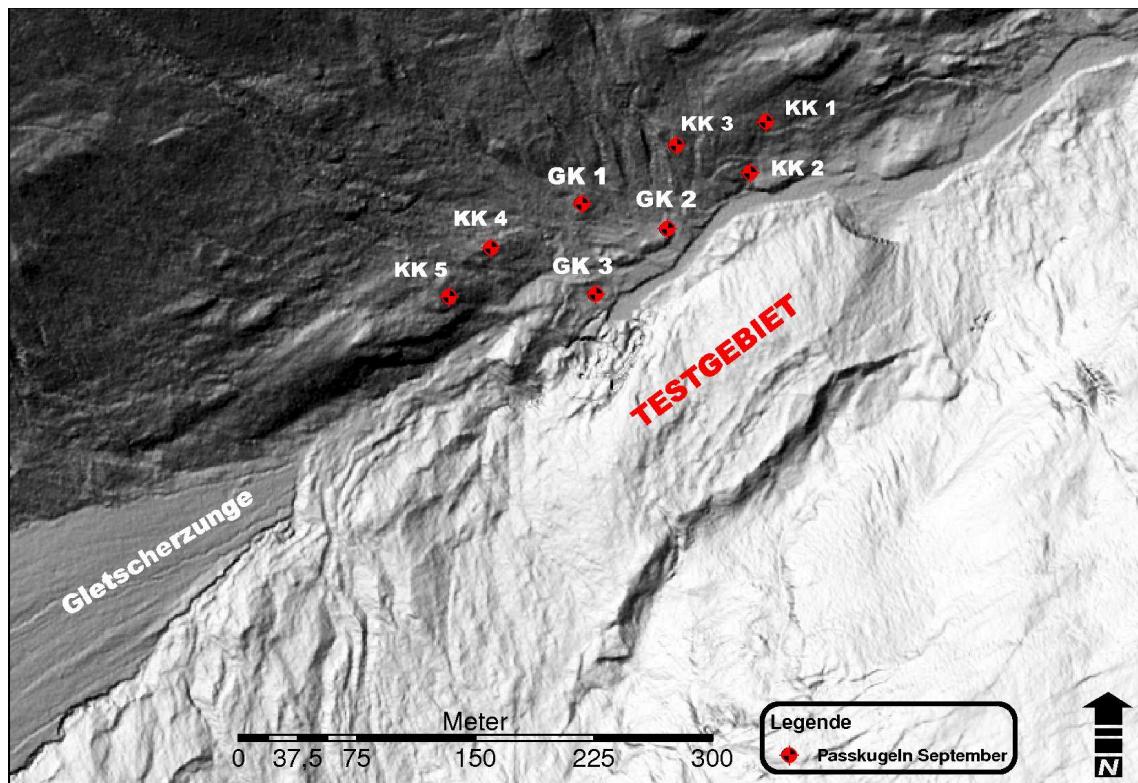


Abbildung 3.3: Netzbild der Passkugelkoordinaten vom 09.09.2009.

Punkt	Ostwert	Nordwert	ellip. Höhe für Bodenpunkt	Kugel ü. Boden	ellip. Höhe für Kugelmitte	Adriahöhe für Kugelmitte
GK1	32637230.056	5186574.961	2491.451	1.154	2492.605	2439.907
GK2	32637284.215	5186559.041	2477.343	1.146	2478.489	2425.791
GK3	32637239.031	5186517.721	2477.474	1.146	2478.620	2425.922
KK1	32637336.663	5186594.331	2475.252	1.568	2476.820	2424.122
KK2	32637346.840	5186626.541	2487.108	1.231	2488.339	2435.641
KK3	32637289.931	5186611.670	2491.796	1.205	2493.001	2440.303
KK4	32637172.370	5186546.821	2502.141	1.208	2503.349	2450.651
KK5	32637146.090	5186515.909	2503.928	1.210	2505.138	2452.440

Tabelle 3.2: Koordinaten der Kugeln im System ETRS 89 UTM Abbildung mit ellipsoidischen Höhen und Adriahöhen der Septembermessung.

3.2 Der ILRIS Parser

Um die mit dem TLS gewonnenen Daten weiter zu bearbeiten, müssen die Rohdaten mit der Parser Software umgewandelt werden. Hier stehen viele verschiedene Datenformate zur Auswahl. Ein ASCII Format mit der Endung .xyz wurde verwendet. Die 3D Koordinaten jedes gemessenen Punktes werden bei diesem Format in eine eigene Zeile geschrieben. Pro Zeile gibt es vier Spalten, in denen die Werte für x (Wert in x-Richtung), y (Wert in y-Richtung), z (Höhe) und die Intensität des zurückgestreuten Signales geschrieben werden. Der Ursprung dieses Koordinatensystems liegt im Scanner. Wurde die Rotationsplattform verwendet, muss eine weitere Transformation vom Parser durchgeführt werden. Als Ergebnis erhält man pro Scan eine ASCII Datei und eine Textdatei, in der die wichtigsten Eckdaten, wie in Tabelle 3.3 zu sehen, angeführt sind.

Spezifikation	Anzahl
Parser version:	4.3.5.4
Time stamp:	Mon Aug 18 18:23:11 2008 (UTC,1219083791)
Horizontal angle resolution(μ Rad):	26
Vertical angle resolution(μ Rad):	26
Unit title:	ILRIS-3D
Unit software version:	4.2.5.1
Number of shots:	174724
Number of scan lines:	418
Number of points per line:	418
Pulse mode:	First Pulse
Scan start position:	Lower Left
Scan orientation:	Horizontal
Roi start point:	(-14.696472,-10.213875)
Scan average range(m):	80.50
X spot spacing(counts/mm):	10/21.4
Y spot spacing(counts/mm):	10/21.4

Tabelle 3.3: Auszug aus dem Inhalt der Log-Datei, die der ILRIS Parser zu jedem Scan erstellt.

Der in Abbildung 3.4 rot umrandete Bereich umfasst 174.724 gemessene Punkte, die ausgegebene Datei hat eine Größe von 4 Megabyte und kann mit der Software Polyworks als Punktwolke dargestellt werden. (Abbildung 3.4 b)).

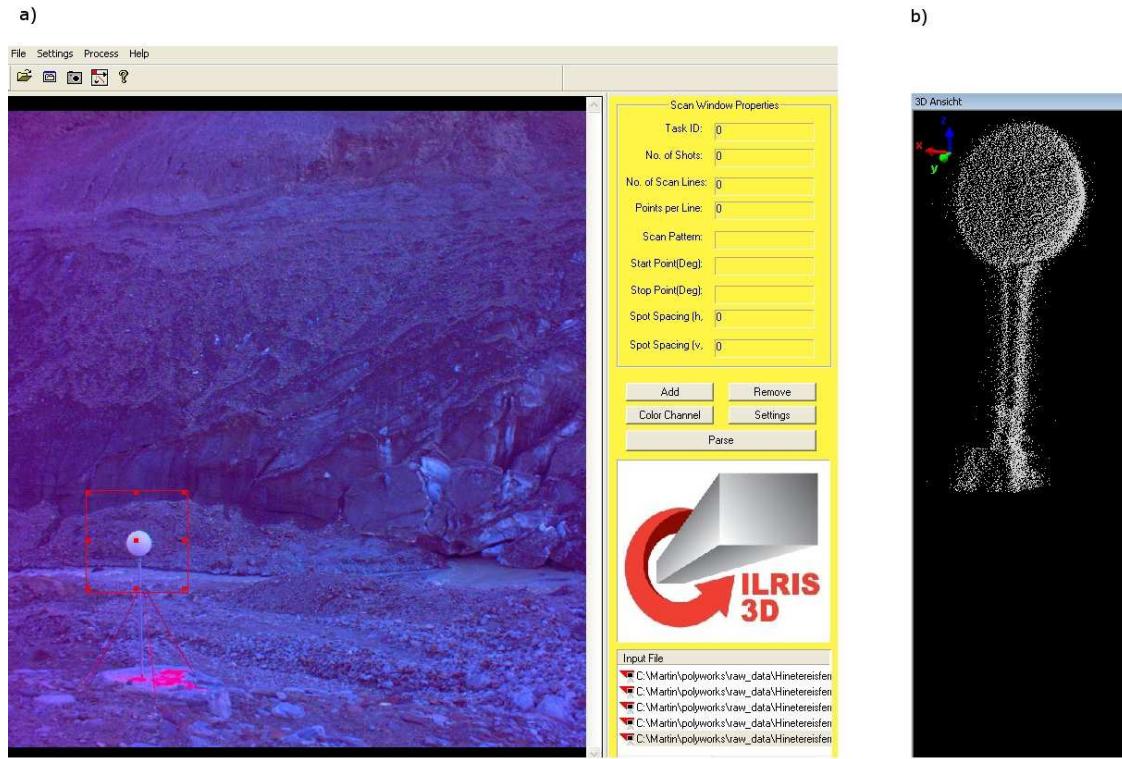


Abbildung 3.4: a) Die Benutzeroberfläche des ILRIS Parsers am Beispiel einer Passkugelaufnahme. Der rot umrandete Bereich wurde gescannt und mit der Software in einem scannereigenen Koordinatensystem ausgegeben. b) Punktwolke des Scans, dargestellt mit der Software PolyWorks.

3.3 Die Software PolyWorks

PolyWorks ist ein Software-Paket, bereitgestellt durch die Firma InnovMetric. Es ist eine leistungsfähige Softwarelösung zur Bearbeitung von Daten, die mit 3D Laserscannern gewonnen werden. PolyWorks bietet Scan-Ausrichtung, Georeferenzierung, Messungen, Merkmalsextraktion und Visualisierungsfunktionen.

Es besteht die Möglichkeit, mehrere einzelne Scans zu einer Aufnahme zusammenzufassen. Für die Georeferenzierung sind mindestens drei Punkte, die im Scan einfach zu erkennen sind, notwendig. Weiters bietet die Software Messwerkzeuge, um in den erstellten Modellen zu messen. Es können einfache Formen, wie z.B. Kugeln oder Ebenen in die Punktwolken eingepasst werden. Zudem bietet sich die Möglichkeit TIN Oberflächen aus den Daten zu generieren. Das TIN kann dann für den Einsatz in andere Anwendungen exportiert werden. Polyworks besteht aus mehreren Modulen, wie in Abbildung 3.5 ersichtlich ist.



Abbildung 3.5: Die PolyWorks Module nach Prozessen und Art des Interface klassifiziert.

Hier eine kurze Beschreibung der einzelnen Module:

- IMAlign:

Das IMAlign Modul bietet die Möglichkeit einzelne Scans einzulesen, zu vermaschen und zu einer einzigen Punktwolke zusammenzufügen. Der große Vorteil der Software liegt darin, dass keine physikalischen Zielobjekte notwendig sind, um die einzelnen Aufnahmen zusammenzuführen. Das Modul nützt stattdessen die geometrische Form der überlappenden Scan-Flächen.

- IMMerge:

IMMerge ist ein automatisiertes Software-Werkzeug mit dem die vermaschten Oberflächen des IMAlign Projektes in ein einziges Polygonmodell (TIN Modell) umgewandelt werden.

- IMEdit:

Das IMEdit Modul bietet umfangreiche Möglichkeiten Polygonmodelle zu editieren und in andere Datenformate zu exportieren.

- **IMIInspect:**

Das IMInspect Modul wird dazu benutzt, Punktwolken mit Referenzflächen zu vergleichen, verschiedene Messoperationen durchzuführen und Vergleichsberichte herzustellen.

- **IMCompress:**

Mit dem IMCompress Modul können 3D Polygonmodelle reduziert werden um die Datenmenge gering zu halten und somit eine schnellere Bearbeitung zu ermöglichen.

- **IMTexture:**

IMTexture ermöglicht es fotorealistische Modelle zu erstellen, indem Texturen von Fotos auf Flächen zugewiesen werden.

- **IMView**:

IMView ist ein 3D Betrachtungsprogramm, das gratis von der Herstellerwebseite www.innoymetric.com heruntergeladen werden kann.

3.3.1 Einlesen und georeferenzieren der Punktwolken

Die mit dem ILRIS Parser erstellten ASCII Dateien können im Modul IMInspect eingelesen werden. Hierbei können alle Aufnahmen, die von einem Standpunkt aus aufgenommen wurden auf einmal bearbeitet werden, da diese im selben Koordinatensystem vorliegen. Das 3D Koordinatensystem hat den Ursprung im Scanner selber. Importiert werden pro Punkt die Koordinaten und die dazugehörige Intensität.

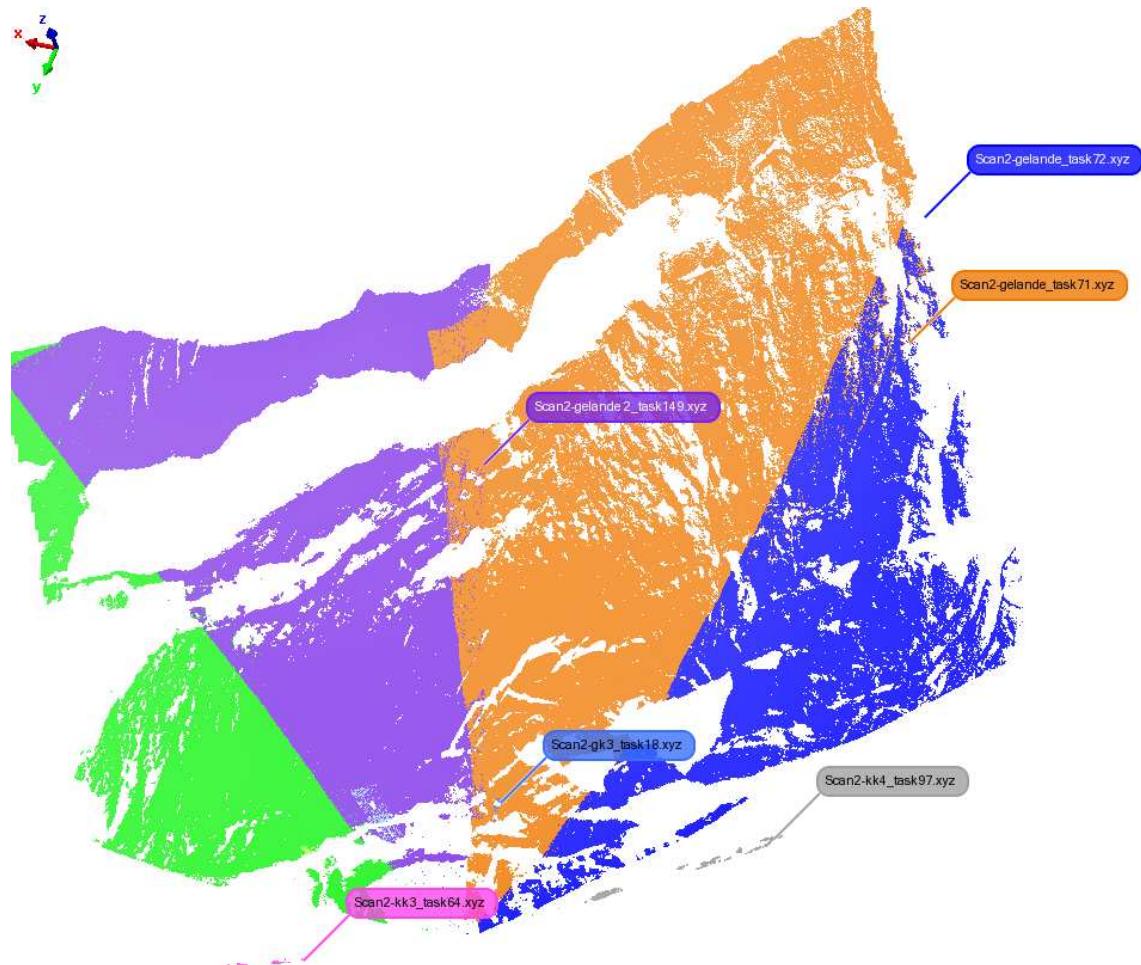


Abbildung 3.6: Die einzelnen Aufnahmen sind mit verschiedenen Farben dargestellt. Die großflächigen Scans wurden mit einer Auflösung von ca. 5 cm durchgeführt, während bei den Passkugelscans eine Auflösung von 2 mm angestrebt wurde.

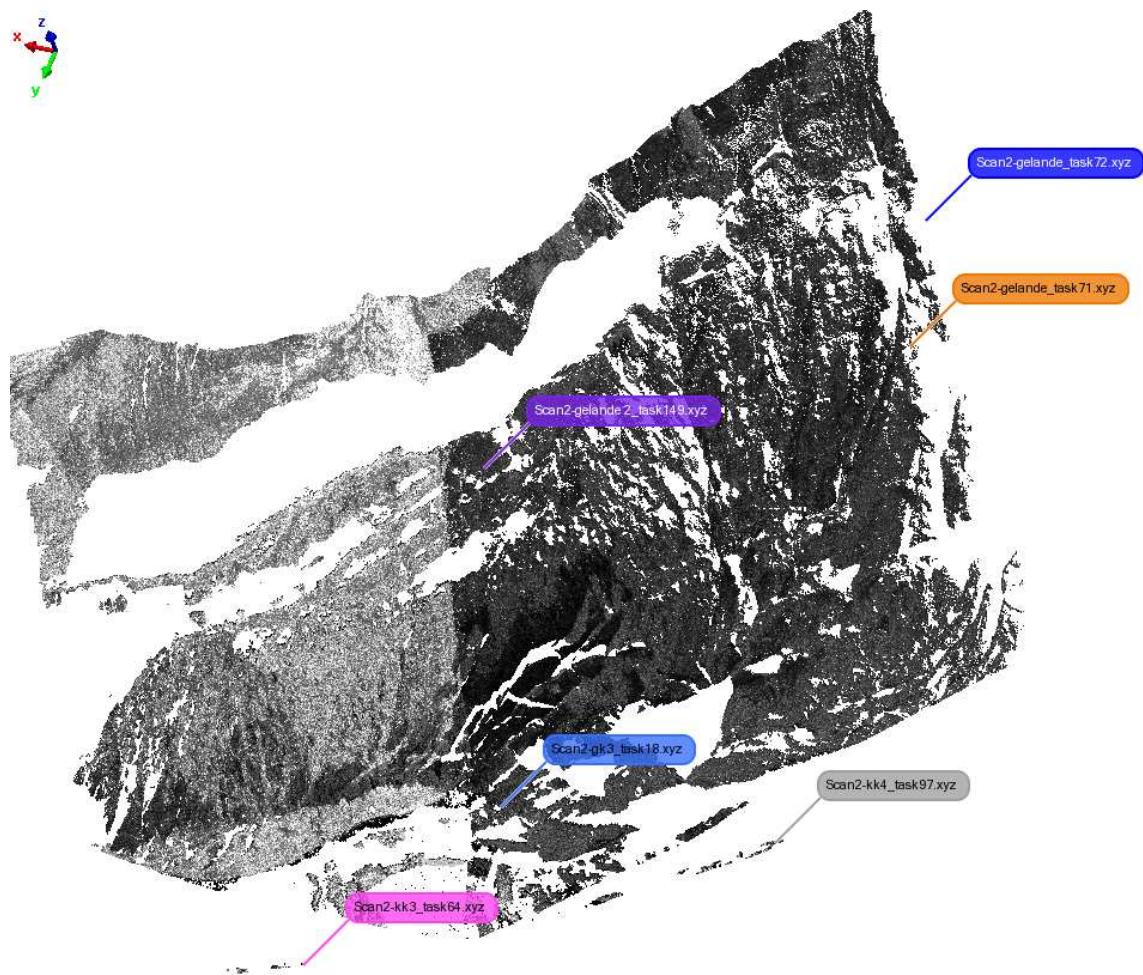


Abbildung 3.7: Hier werden die Intensitäten der Punkte zusätzlich mit einer Grauwertskala (0 bis 255) angezeigt.

In zwei Punktwolken wurden Fehler entdeckt, wie in Abbildung 3.8 zu sehen ist. Diese Teilsticks wurden nicht zur Auswertung herangezogen, was kein Problem darstellte, da die betroffenen Bereiche auch von anderen Standpunkten aus abgedeckt wurden.

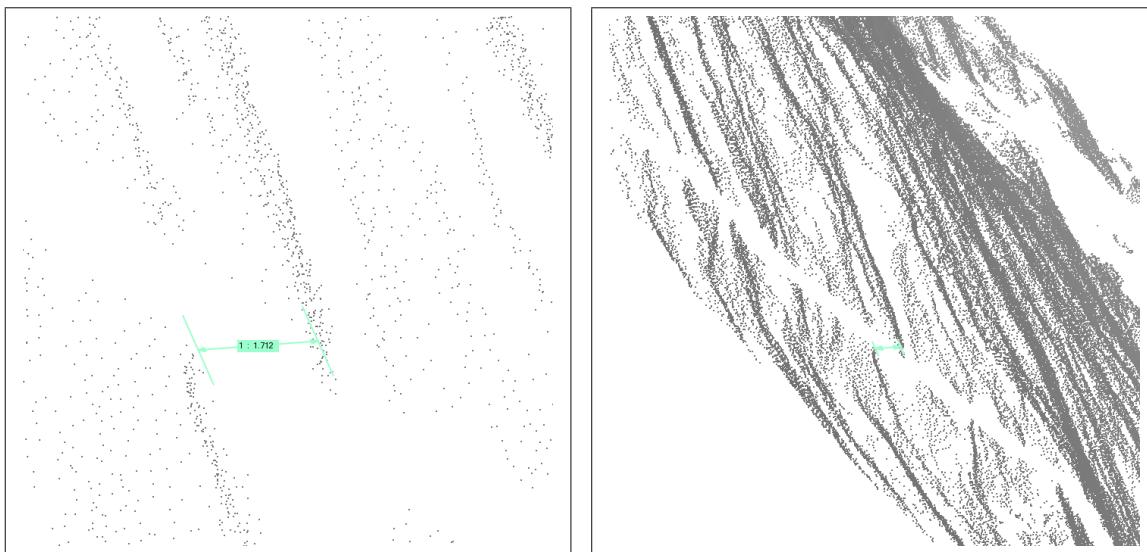


Abbildung 3.8: Fehler in einer Punktwolke. Versatz von 1,7 m.

Vermutlich kam der Fehler in der Punktwolke durch eine Bewegung des Stativs des TLS zustande. Dieser Standpunkt war nahe des Bachufers, an dem es schwierig war einen standfesten Aufstellplatz zu finden.

Im nächsten Schritt werden die gescannten Passkugeln, auch Targets genannt, bearbeitet. PolyWorks bietet die Option, verschiedene Merkmale, wie Kugeln oder Ebenen, aus einer Punktwolke zu erstellen. Dazu werden die einzelnen, hochgenauen Scans der Targets herangezogen und alle Punkte der Passpunktobерfläche markiert. Mit der Funktion *Fitten* und der Option *fester Radius* wird nun eine Kugel mit bekanntem Radius in die markierten Punkte eingeschrieben.

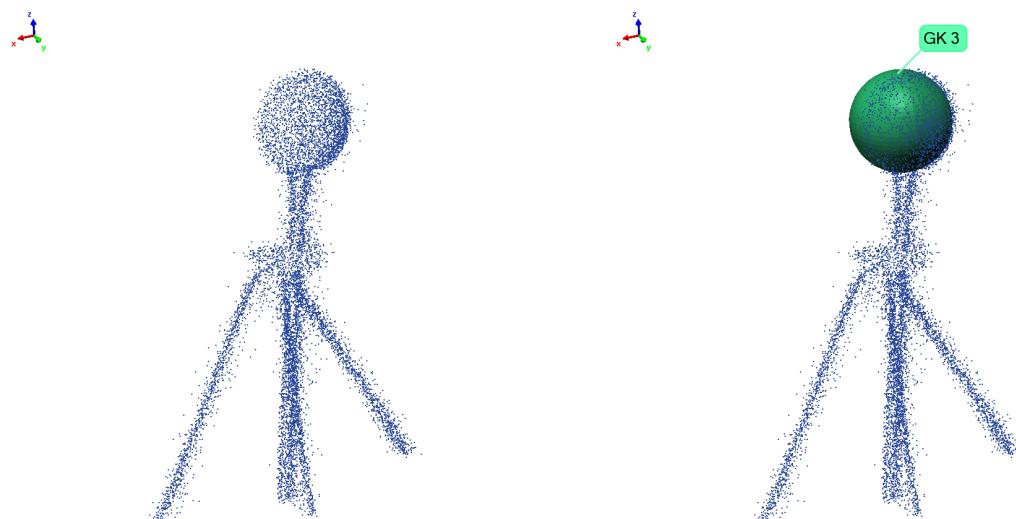


Abbildung 3.9: Erstellen einer Kugel aus einem hochauflösten Passpunktscan.

Die Koordinaten der Kugelmitte können nun ausgelesen werden. Dieser Prozess wird für alle Targets wiederholt.

Nun wird ein neues Projekt mit dem IMInspect Modul erstellt und die Koordinaten der

Kugeln im System ETRS 89 UTM Abbildung importiert. Dazu wurde aus den GPS Daten eine einfache Textdatei mit Ostwert, Nordwert und Höhe erstellt. Die Punkte können nun mit dem Befehl *Regelgeometrie importieren* eingelesen werden.

Um die Punktwolken samt den erzeugten Merkmalen in das globale UTM Koordinaten- system zu importieren, muss zunächst eine interne Translation der Daten erfolgen. Dies ist notwendig, da die georeferenzierten Daten weit vom Nullpunkt (Scannerintern) entfernt sind.

Die Bewerkstelligung der Koordinatentransformation vom scannerinternen Koordinaten- system in das gewünschte System wird mit dem Befehl *Ausrichtung N Mittelpunkte* aus- geführt.

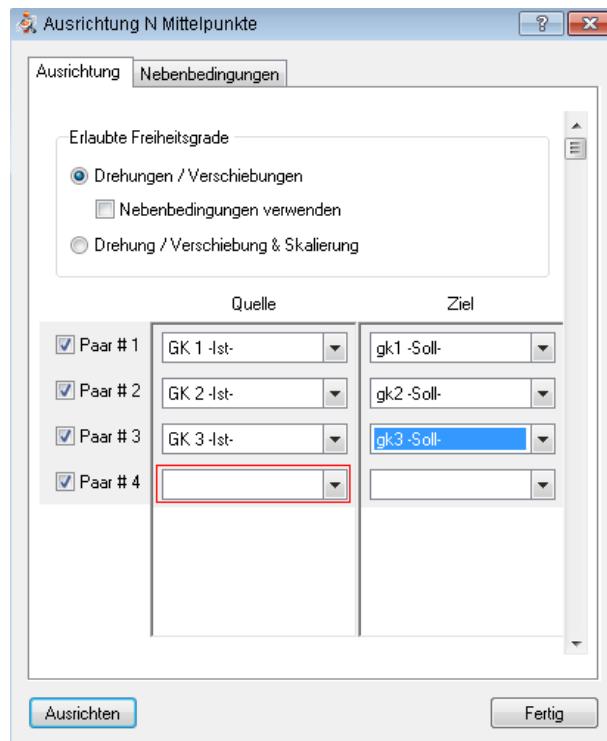


Abbildung 3.10: Ausführung der Koordinatentranslation mit dem Befehl *Ausrichtung N Mittelpunkte*.

Als Quelle werden die erzeugten Kugelmerkmale und als Ziel die Referenzpunkte ange- geben. Das Programm platziert durch Drehen und Verschieben die Merkmale auf den Referenzpunkten. Anschließend wird automatisch ein Report der Koordinatentranslation erstellt:

Name	Quelle (x)	Quelle (y)	Quelle (z)	Ziel (x)	Ziel (y)	Ziel (z)	Abstand
GK 1 -Ist-	5186574,963	32637230,061	2492,596	5186574,970	32637230,053	2492,599	0,011
GK 2 -Ist-	5186559,073	32637284,275	2478,509	5186559,011	32637284,218	2478,507	0,084
GK 3 -Ist-	5186517,630	32637238,955	2478,653	5186517,684	32637239,019	2478,651	0,084

Tabelle 3.4: Protokoll der Koordinatentransformation mit IMInspect automatisch erstellt.

Bei diesem Beispiel beträgt der maximale Fehler 8,4 cm und der minimale Fehler 1,1 cm. Dadurch ergibt sich ein mittlerer Fehler von 6 cm und eine Standardabweichung von 4,2 cm. Nun können die Punktwolken mit dem Befehl *ASCII Punktwolke exportieren* in eine neue Datei geschrieben werden, die mit dem Modul IMAlign eingelesen werden kann.

3.3.2 Einlesen und vermaschen der Punktwolken

Nun werden die Teilstans einzeln in das Modul eingelesen. Dazu steht der Assistent, *Point Cloud Organiser* zur Verfügung. Zunächst wird die Punktwolke angezeigt. Dabei gibt es die Möglichkeit, die Anzahl der Punkte vorab zu reduzieren. Es wird eine Blickrichtung ausgewählt, von der aus die Punktwolke vermascht werden soll. Die Punktwolke sollte einmal mit Blickrichtung von oben und einmal mit Blickrichtung aus der Scannerperspektive vermascht werden. Nach etlichen Versuchen stellte sich heraus, dass die Qualität der Vermaschung kaum darunter leidet, wenn ein Blickrichtungskompromiss zwischen Vogelperspektive und Scannerperspektive eingestellt wurde. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass die Datenmenge um die Hälfte reduziert werden kann. Anschließend können die Parameter für die Vermaschung der Punktwolke gewählt werden. Eine maximale Kantenlänge von 2,0 m, eine Rasterweite von 0,1 m und ein maximaler Winkel von 89° wurden verwendet. Dieselben Einstellungen wurden für alle importierten Punktwolken benutzt. Hierbei war es schwierig, einen Kompromiss zwischen guter Auflösung und Geschwindigkeit zu finden.

Ist ein gesamter Standpunkt eingelesen, sind die Teilstans untereinander leicht verschoben. Da der von uns verwendete TLS schlecht kalibriert war, ergaben sich relativ große Verschiebungen zwischen den Teilstans. Der Versatz kam dadurch zustande, dass sich bei jedem Drehen oder Kippen des TLS mit der Rotations- Kippbasis ein Fehler eingeschlichen hat. Das Bewegen des Scanners geschieht mechanisch und kommt daher nicht an die Genauigkeit der Optomechanik des TLS heran. Eine Analyse des Fehlers wurde durchgeführt und in der Abbildung 3.11 visualisiert. Der Betrag des Versatzes liegt im Bereich weniger Zentimeter bis zu 25 cm. Es stellte sich heraus, dass der Fehler entfernungsabhängig war.

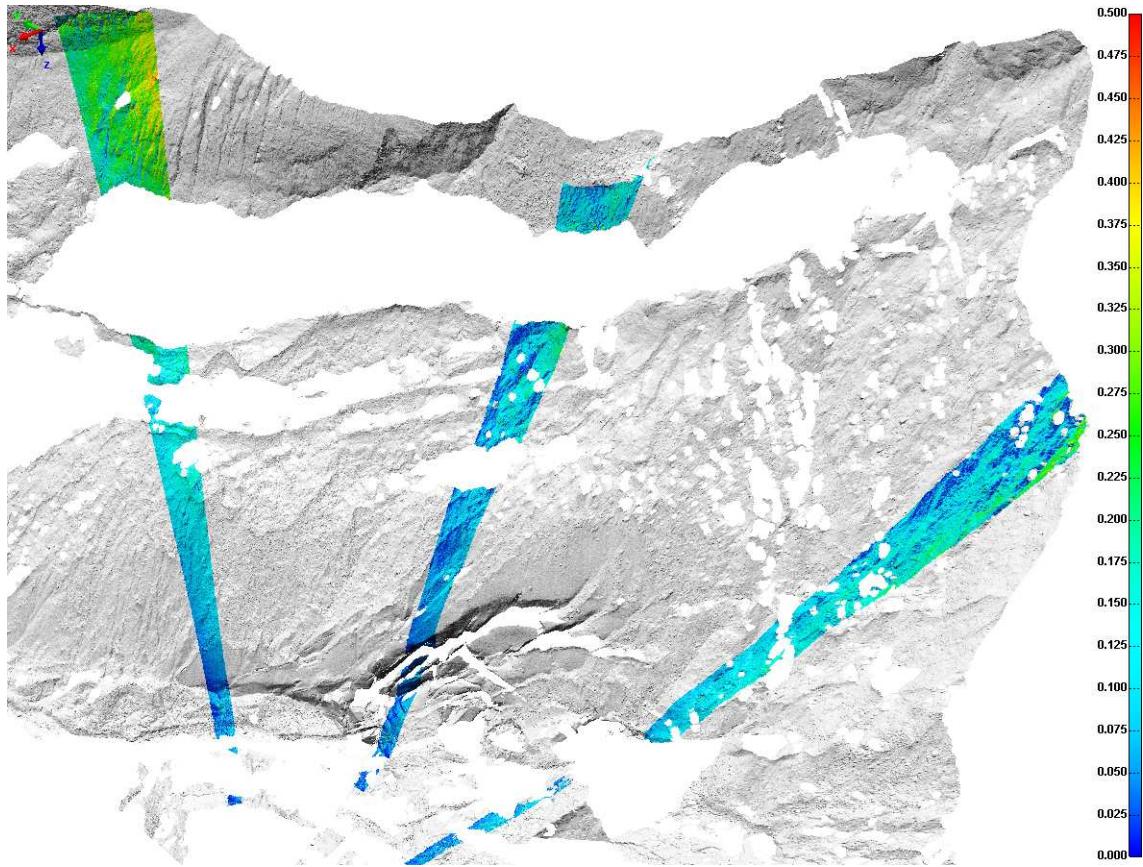


Abbildung 3.11: Analyse des Fehlers zwischen den einzelnen Teilsticks eines TLS Standpunkts. Die Einheit der Farbskala ist m.

Die großen Fehler (im linken oberen Bereich) von bis zu 0,5 m ergeben sich aus einem Zusammenspiel aus dem bereits beschriebenen Fehler und einem flachen Einfallswinkel des Laserstrahls auf die Geländeoberfläche. Durch die Divergenz des Laserstrahls ergibt sich beim Auftreffen auf eine geneigte Oberfläche eine Ellipse als "Abdruck" (footprint).

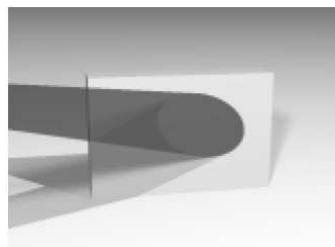


Abbildung 3.12: Der Laserstrahl trifft auf eine geneigte Oberfläche und hinterlässt einen ellipsenförmigen footprint (Kern, 2003).

Trifft der Laserstrahl im Vergleich dazu normal auf eine Oberfläche, wird ein Leuchtkreis abgebildet. Dieser Effekt wurde in einer Arbeit von (Kern, 2003) untersucht. Eine systematisch verkürzte Laufzeitmessung und damit eine zu kurze Entfernungsmessung wird registriert. Dieser Effekt ist umso deutlicher, je größer der Einfallswinkel und je größer die Strahldivergenz ist.

Um den Versatz zwischen den einzelnen Teilscans zu korrigieren, wird von der Firma Optech ein Makro bereitgestellt. Ein Makro ist ein kleines Programm, dass eine vorgegebene Abfolge von Befehlen automatisch ausführt. Durch das Ausführen des Makros im Modul IMAlign ist weniger Klickarbeit notwendig. Dazu wird jeder Teilscan, der in der Baumansicht markiert wurde, durch Verwendung des *Best-Fit Algorithmus* an den jeweils angrenzenden Teilscan angepasst. Dieser Algorithmus sucht zuerst im Umkreis von 1 m, im nächsten Schritt 10 cm und dann 5 cm redundante Informationen in den Oberflächen der anzupassenden Teilscans. Er führt solange eine Translation der Punktwolke durch, bis ein vorgegebenes Konvergenzlimit, oder eine Anzahl von 50 Iterationen erreicht ist. In der Abbildung 3.13 und in der Abbildung 3.11 ist der Fehler in den Überlappungsbereichen dargestellt. Durch Anwendung des Best-Fit Algorithmus lässt sich der Fehler auf einen akzeptablen Betrag von wenigen Zentimetern reduzieren.

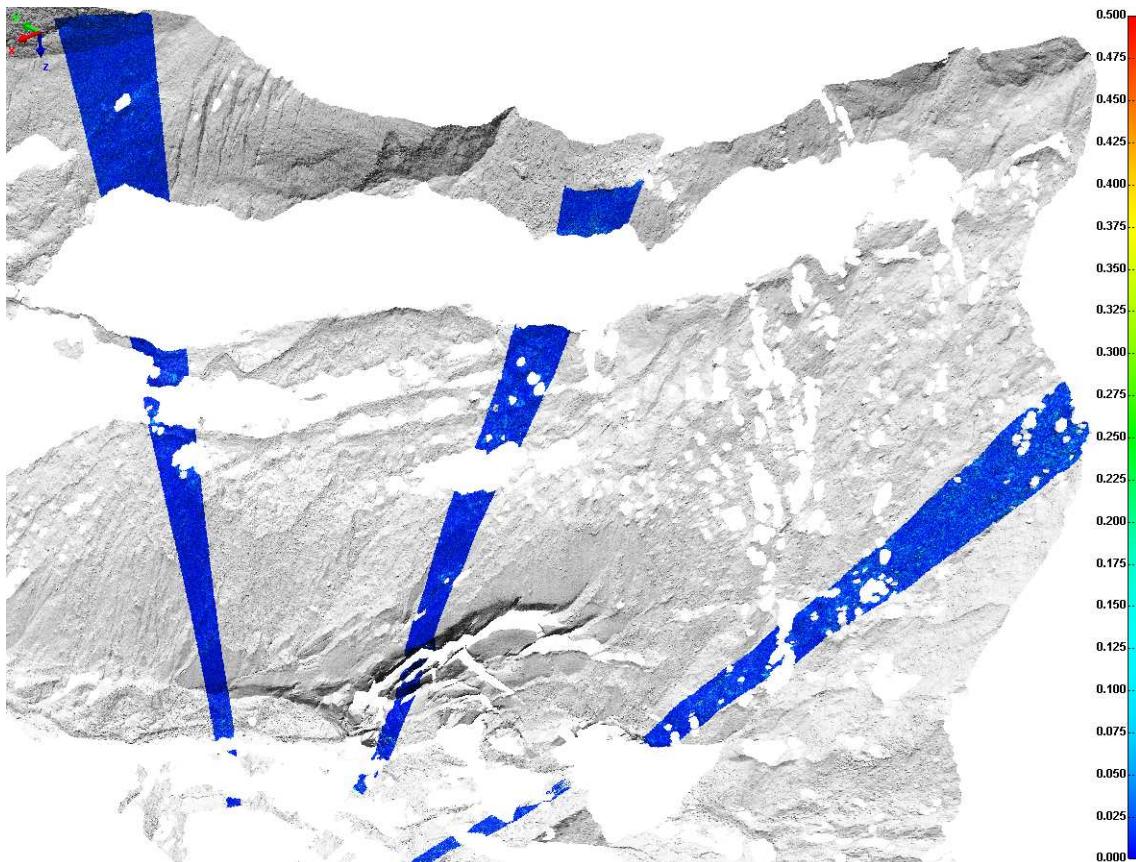


Abbildung 3.13: Analyse des Fehlers zwischen den einzelnen Teilscans eines TLS Standpunkts, nach Verwendung des Alignement Makro. Die Einheit der Farbskala ist Meter.

Das Makro schreibt automatisch eine Textdatei (Tabelle 3.5) in das Projektverzeichnis, in der die wichtigsten Ergebnisse der Anpassung der Teilscans zusammengefasst sind:

Name des Teilscans	maximale Distanz [m]	Konvergenz	mittlere Abweichung [m]	Standardabweichung [m]
SP2 149.pf	1.00	1,81E-08	4,17E-05	0,0138774
SP2 149.pf	0.10	4,38E-08	4,25E-05	0,0137991
SP2 149.pf	0.05	3,64E-07	-1,14E-05	0,0131683
SP2 71.pf	1.00	4,90E-09	3,67E-06	0,0161369
SP2 71.pf	0.10	3,86E-07	6,56E+05	0,0144439
SP2 71.pf	0.05	3,92E-08	3,42E-07	0,0132753
SP2 72.pf	1.00	9,07E-07	6,82E-06	0,0221031
SP2 72.pf	0.10	9,34E-08	5,82E-06	0,0213999
SP2 72.pf	0.05	6,51E-08	-1,44E-05	0,0184174

Tabelle 3.5: Protokoll der Ausrichtung der Teilscans mit dem Alignment Makro. Die Spalte maximale Distanz bezieht sich auf den Umkreis in dem mit dem Best-Fit Algorithmus nach redundanten Informationen gesucht wird.

Anschließend können die Überlappungsbereiche der Scans bearbeitet werden. In diesen Segmenten ist die Punktdichte doppelt so hoch wie im übrigen Scan. Durch das Ausführen einer Überlappungsreduktion wird die Datenmenge und somit der Rechenaufwand reduziert. Wie sich die Reduktion auf die Modelloberfläche auswirkt, ist in Abbildung 3.14 zu sehen.

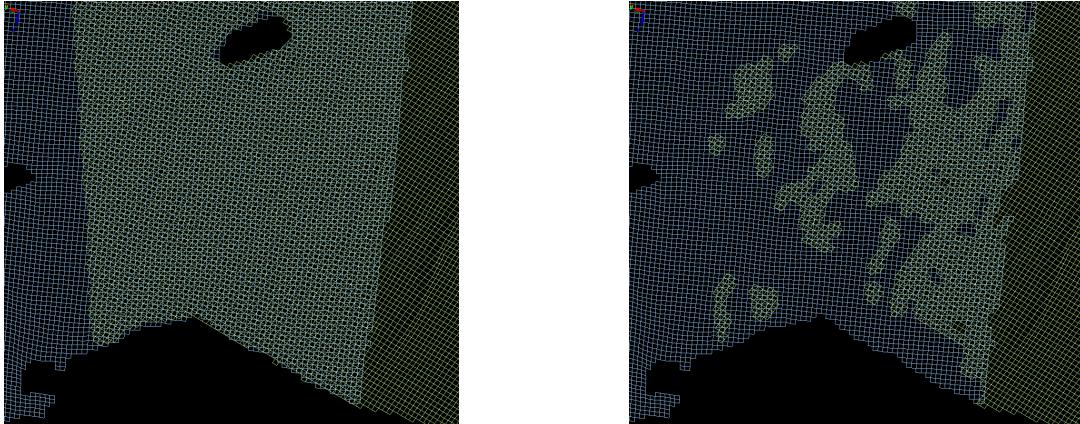


Abbildung 3.14: Zustand des Überlappungsbereich der Drahtmodelloberfläche vor und nach dem Ausführen der Überlappungsreduktion.

3.3.3 Zusammenfügen der Punktwolken

In den vorigen Abschnitten wurde beschrieben, wie die Punktwolken eines Standorts georeferenziert und vermascht werden können. Um ein Modell des gesamten Bereichs zu erhalten, müssen nun die Teilscans der einzelnen Standorte zusammengefügt werden. Die vermaschten Oberflächen werden in ein neues Projekt importiert und das Alignment Makro kann wieder angewandt werden. Auf diese Weise entsteht die erste komplette Geländoberfläche (Abbildung 3.15).

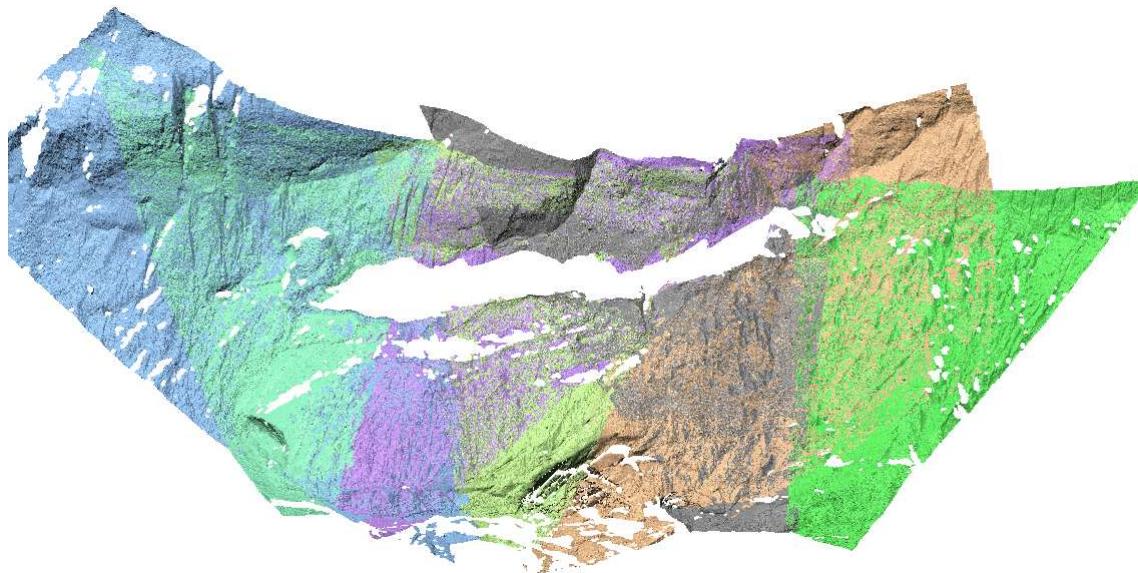


Abbildung 3.15: Gesamtübersicht aller vermaschten Teils cans der Septembermesskampagne.

Nachdem beide Messtermine auf diese Weise ausgewertet wurden, konnte ein erster Vergleich der Modelle gemacht werden. Da bei der Verknüpfung der Scans mit Passkugeln mit dem RTK GPS eine weitere Fehlerquelle in die Modelle miteinfließt, wurde versucht, diese zu umgehen. In beiden Modellen befinden sich Geländebereiche, in denen keine Veränderung der Oberfläche zu erwarten war. Diese Bereiche befinden sich über dem Toteiskomplex (Fels) sowie auf der gegenüberliegenden Seite des Bachs (größere Felsblöcke). Das Modul IMAAlign bietet die Möglichkeit, Punktwolken anhand von Punktepaaren auszurichten. In einem neuen Projekt wurden zwei Untergruppen für zwei Termine eingerichtet, in denen die einzelnen Teils cans abgelegt wurden. Anschließend wurden die Oberflächen in den Bereichen ohne Veränderung durch die Auswahl von Punktepaaren übereinander gelegt (Abbildung 3.16).

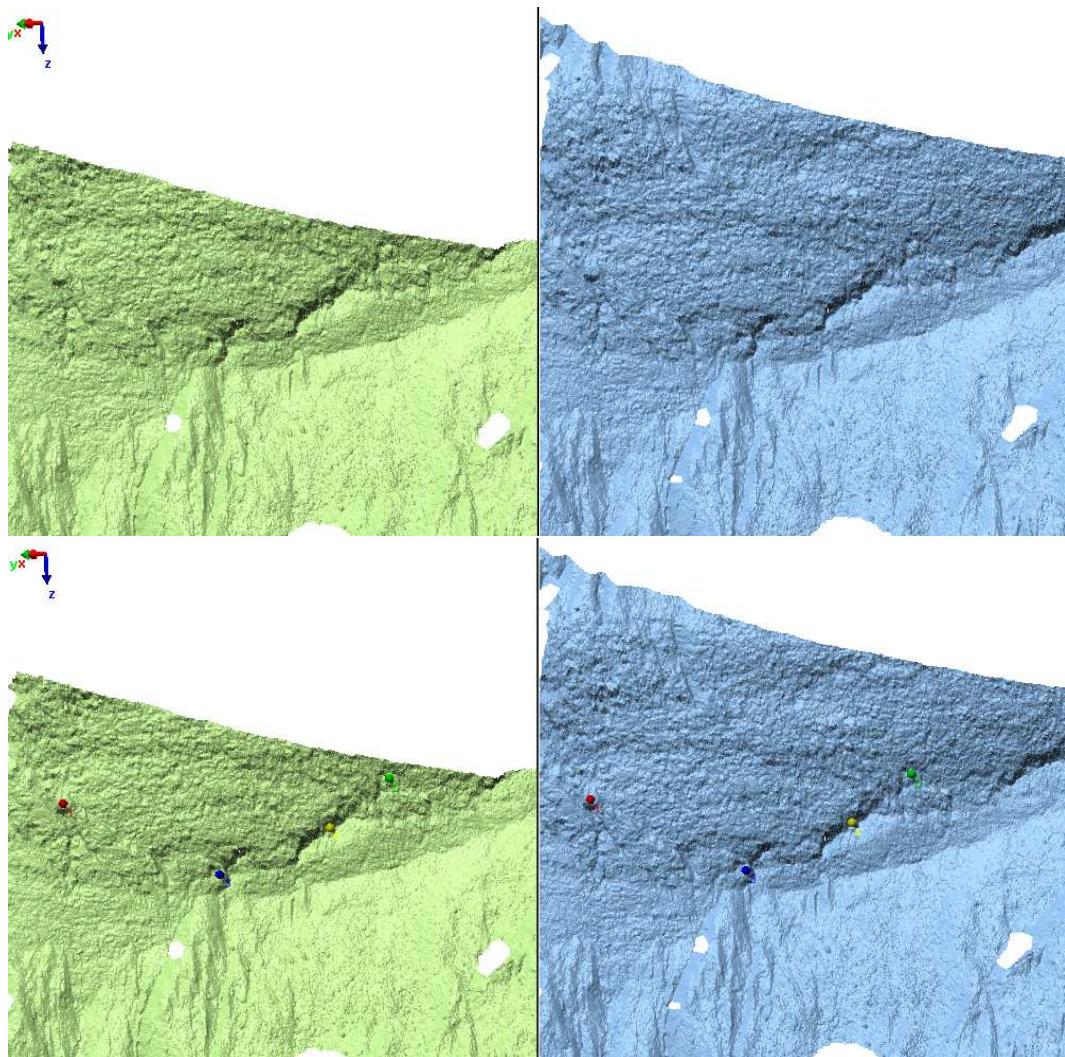


Abbildung 3.16: Ausrichtung der Modelle anhand von Punktepaaren. Blaues Modell: 18. September, grünes Modell: 10. August. Durch Auswählen von charakteristischen Punkten im Felsbereich werden die Oberflächen aneinander angeschmiegt.

Mit dieser Methode ist eine höhere Genauigkeit des Vergleichs der beiden Modelle gewährleistet. Die Abweichungen der Modelle, in den nicht veränderlichen Bereichen nach der Ausrichtung mit Punktepaaren, ist in Abbildung 3.17 ersichtlich.

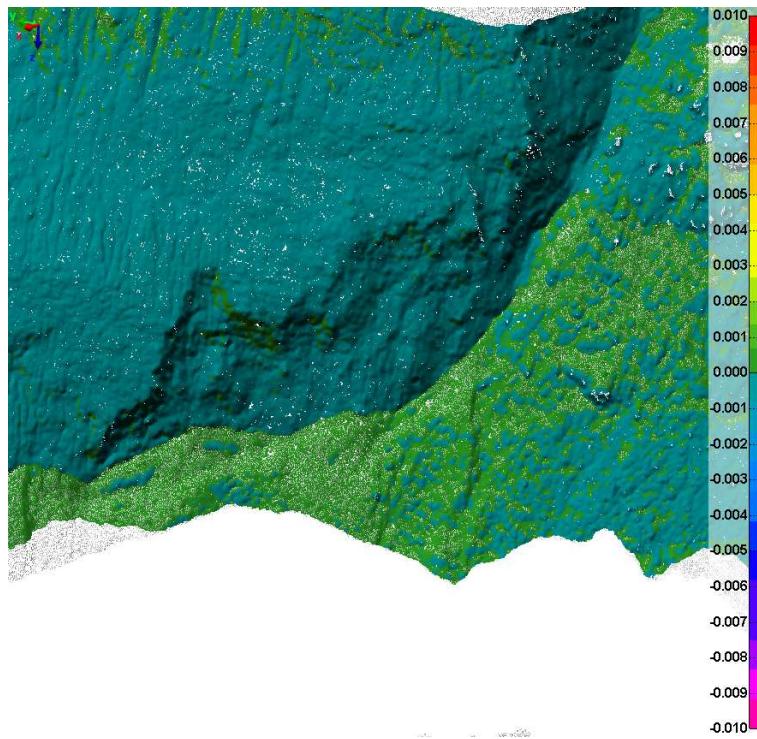


Abbildung 3.17: Fehlerdarstellung der angeschmiegten Oberflächen beider Modelle.

3.3.4 Erstellen eines Polygonmodells

Das IMMerge Modul der PolyWorks Software wurde eingesetzt, um das IMalign Projekt in ein TIN-Modell der gescannten Oberfläche umzuwandeln. Dieser Prozess benötigt eine immense Rechenleistung.

Hier können etliche Parameter zum Vernetzen der Oberfläche eingestellt werden:

- **Glättungsstufe:**

Die Modelle wurden mit einer niedrigen Glättungsstufe und einem Glättungsradius von 5 cm erstellt.

- **Vernetzung:**

Hier stehen drei verschiedene Parameter zur Verfügung: Der **Maximale Abstand**, den zwei 3D-Oberflächen zueinander haben dürfen wurde auf 0,5 m, der **Punktabstand** auf 0,1 m und die **Standardabweichung** auf 5 cm gestellt.

- **Nummer der Teilberechnungen:**

Das Modul IMMerge bietet die Option, die Nummer der Teilberechnungen einzustellen und so auf allen vier Prozessoren zu rechnen, oder einen Cluster Modus mit mehreren PC's zu betreiben. Ist die Vernetzung erfolgreich, wird das generierte Modell mit dem Modul IMEdit automatisch geöffnet.

3.3.5 Bearbeiten des Polygonmodells

Ziel der Bearbeitung mit dem Modul IMEdit ist es, eine vollständige, "wasserdichte" Oberfläche zu erzeugen. Das Modell kann nun als Gouraudmodell dargestellt werden. Das Gouraud-Shading ist eine Renderingmethode, die weiche Farbverläufe zwischen den Polygonflächen erzeugt, und so eine gleichmäßige Schattierung erzeugt.

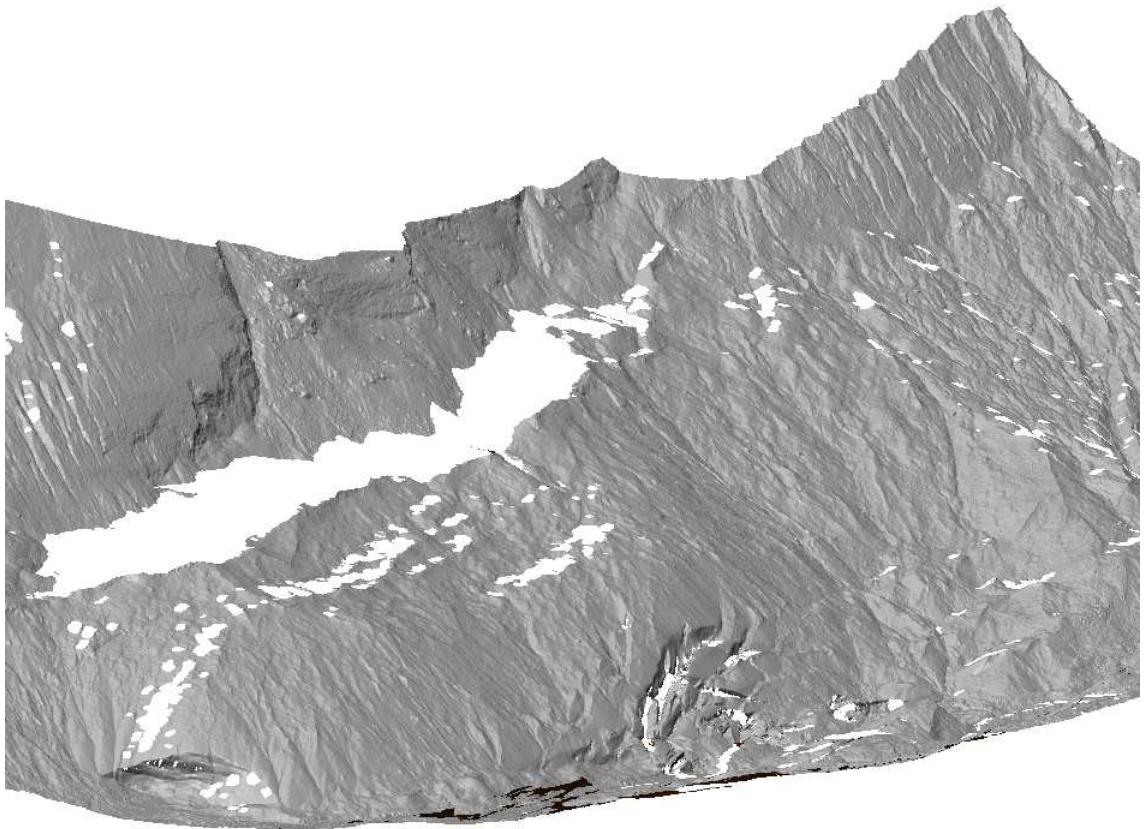


Abbildung 3.18: Gouraudmodell der gesamten Szene.

Wie in Abbildung 3.18 zu erkennen ist, sind noch sehr große Datenlücken vorhanden. Diese "Löcher" im Modell sind Bereiche, zu denen der Laserstrahl nicht vordringen konnte, sogenannte Abschattungsbereiche. Speziell im Übergangsbereich zwischen Toteis und Fels klafft eine große Lücke. Hier fällt die Oberfläche Richtung Fels hin ab und ist komplett abgeschattet.

In einem ersten Schritt wird der Datensatz reduziert, indem Gebiete, die nicht zur Auswertung benötigt werden, aus dem Polygonmodell gelöscht werden. Dazu zählen der Gletscherbruch, der oben anschließende Fels und auch der Toteisbereich bei der Zunge. Dort war die Punktedichte zu gering, um verlässliche Daten für einen Vergleich zu erhalten. Das Modul IMEdit bietet die Möglichkeit, Datenlücken zu schließen und Oberflächen zu rekonstruieren. Das Ergebnis der Nachbearbeitung eines Polygonmodells ist in Abbildung 3.19 dargestellt.



Abbildung 3.19: Gouraudmodell der gesamten Szene nach der Bearbeitung mit dem Modul IMEdit.

Das TIN-Modell kann nun in das Modul IMInspect zur Erstellung von Fehleranalysen exportiert werden.

3.3.6 Feature Tracking

Features sind Interessenspunkte in dreidimensionalen multitemporalen Modellen oder Bildern, die aufgrund von bestimmten charakteristischen Eigenschaften wiedererkannt und verfolgt werden können. Ist das Objekt in Aufnahmen zu mehreren Zeitpunkten auszumachen, kann ein Versatzvektor erstellt werden, der Geschwindigkeit und Richtung des betrachteten Objekts wiederspiegelt (Oppikofer et al., 2009).

Im Laufe der Messung und später in der Datenaufbereitung stellte sich heraus, dass die Toteisoberfläche ständigen Veränderungen unterliegt. Der Gesteinsschutt wird durch Schmelzwasser hangabwärts transportiert und lagert sich am Fuß des Toteiskomplexes ab. Die rasche Änderung der "features" durch den Transport der fluvioglazialen Sedimente verhindert somit eine mögliche Anwendung des "feature tracking".

3.4 Anwendung des Solar Radiaton Werkzeugs der Software ArcMap

Um den Einfluss der Strahlung genauer zu untersuchen wurde das Solar Radiaton Werkzeug der Software ArcMap angewandt. Als Berechnungsgrundlage diente ein digitales Höhenmodell der Airborne-Laserscanbefliegung vom 07.08.2008 (Abbildung 3.20). Dieses

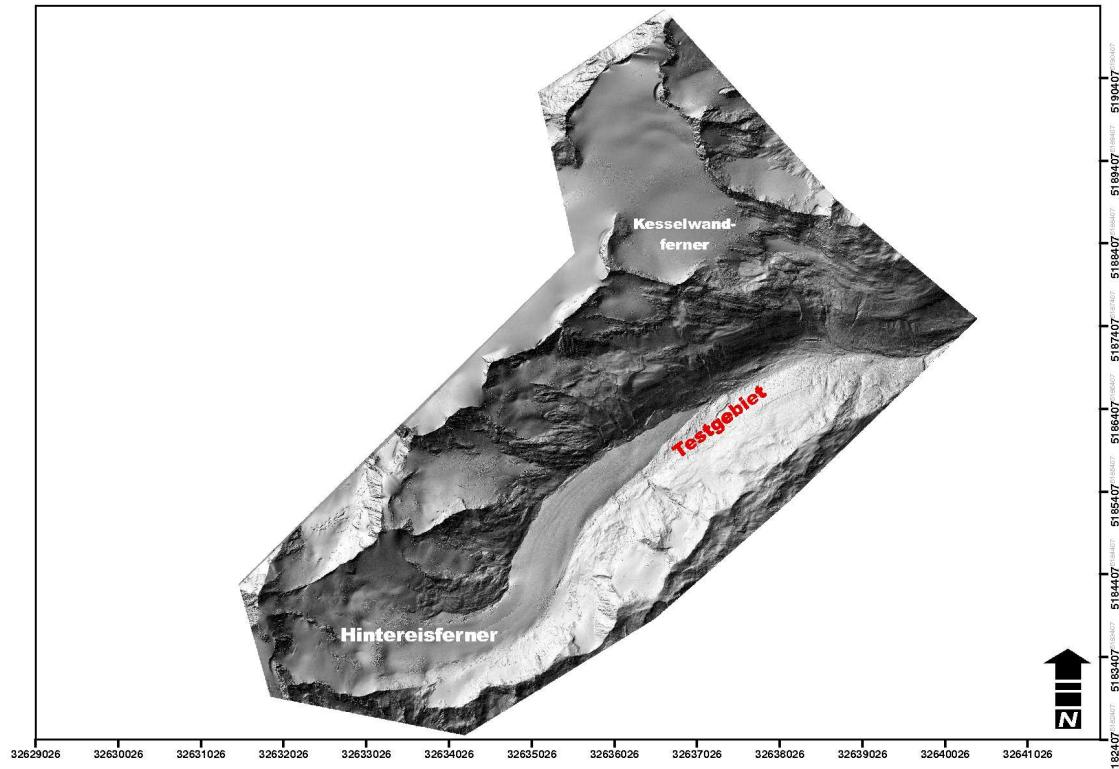


Abbildung 3.20: Hillshade erzeugt mit ArcMap aus dem DHM der Laserscanbefliegung vom 07.08.2008.

Strahlungsmodell bietet die Möglichkeit, die Globalstrahlung, die direkte und diffuse Strahlung sowie die Sonnenscheindauer für eine gewisse Zeitspanne oder bestimmte Tage auszugeben. Die Strahlungsflüsse werden dabei mit halbstündlicher zeitlicher Auflösung gerechnet. Die reflektierte Strahlung wird von dem Strahlungsmodell nicht berücksichtigt, da sie in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit, Geländeausrichtung und der Sonnenposition stark variiert (Pinde und Paul, 2004). Trotzdem können Aussagen über Abschattungseffekte, Dauer der Einstrahlung und den Energiezufluss gemacht werden.

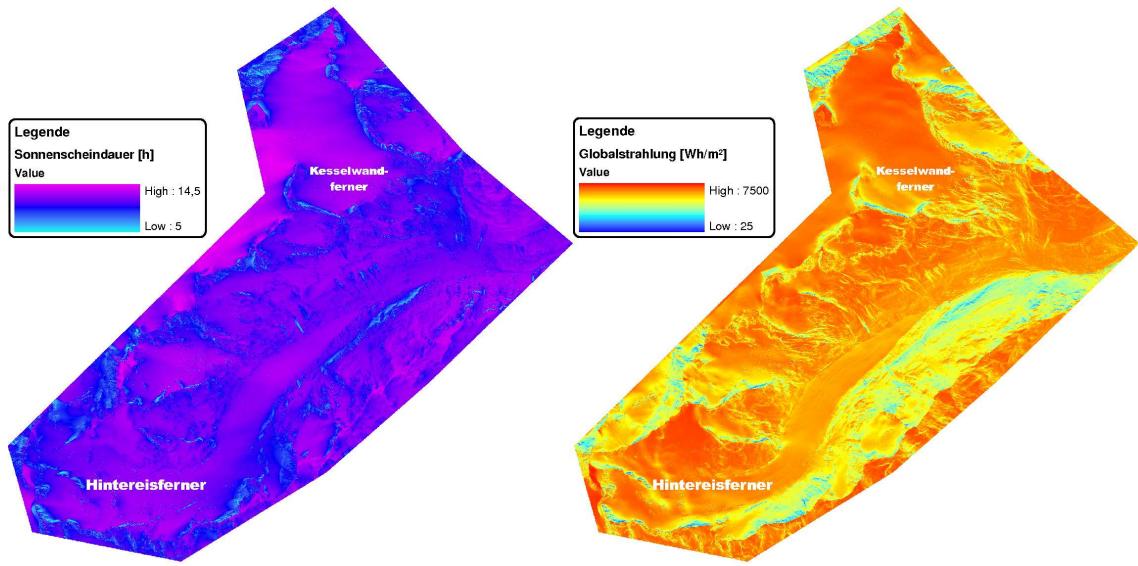


Abbildung 3.21: Globale Sonneneinstrahlung und Sonnenscheindauer berechnet mit dem Area Solar Radiation Tool für den 07.08.2008.

Für das gesamte Untersuchungsgebiet stehen somit Informationen über die Sonnenscheindauer und die Globalstrahlung als Rasterdatensatz mit einer Auflösung von 2 m x 2 m zur Verfügung.

Die Globalstrahlung setzt sich aus der direkten und der diffusen kurzweligen Strahlung zusammen. Die gesamte kurzwellige Strahlungsbilanz sieht laut (Kraus, 2004a) wie folgt aus:

$$Q_K = K \downarrow - K \uparrow = S + D - K \uparrow \quad (3.1)$$

Q_K ... solare (kurzwellige) Strahlungsbilanz

$K \downarrow$... gesamte solare Strahlung von oben = Globalstrahlung = $S + D$

$K \uparrow$... gesamte solare Strahlung von unten = solare Reflexstrahlung

S ... direkte Sonnenstrahlung als Strahlungsflussdichte an einer horizontalen Fläche

D ... diffuse Sonnenstrahlung = Himmelsstrahlung

Für das Reflexionsvermögen (Albedo) α ergibt sich:

$$\alpha = \frac{K \uparrow}{K \downarrow} \quad (3.2)$$

Kapitel 4

Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der GIS Auswertung der ALS Daten

Die ALS Daten wurden mit der Software ArcGIS als Rasterdatensatz bearbeitet. Zunächst wurden Neigung (Abbildung 4.1) und Exposition (Abbildung 4.2) für jede Rasterzelle des digitalen Höhenmodells bestimmt. Der Rasterdatensatz wurde mit einer Zellengröße von 1 x 1 m gerechnet. Die Gletscherzunge weist eine relativ einheitliche Neigung von ca. 10°

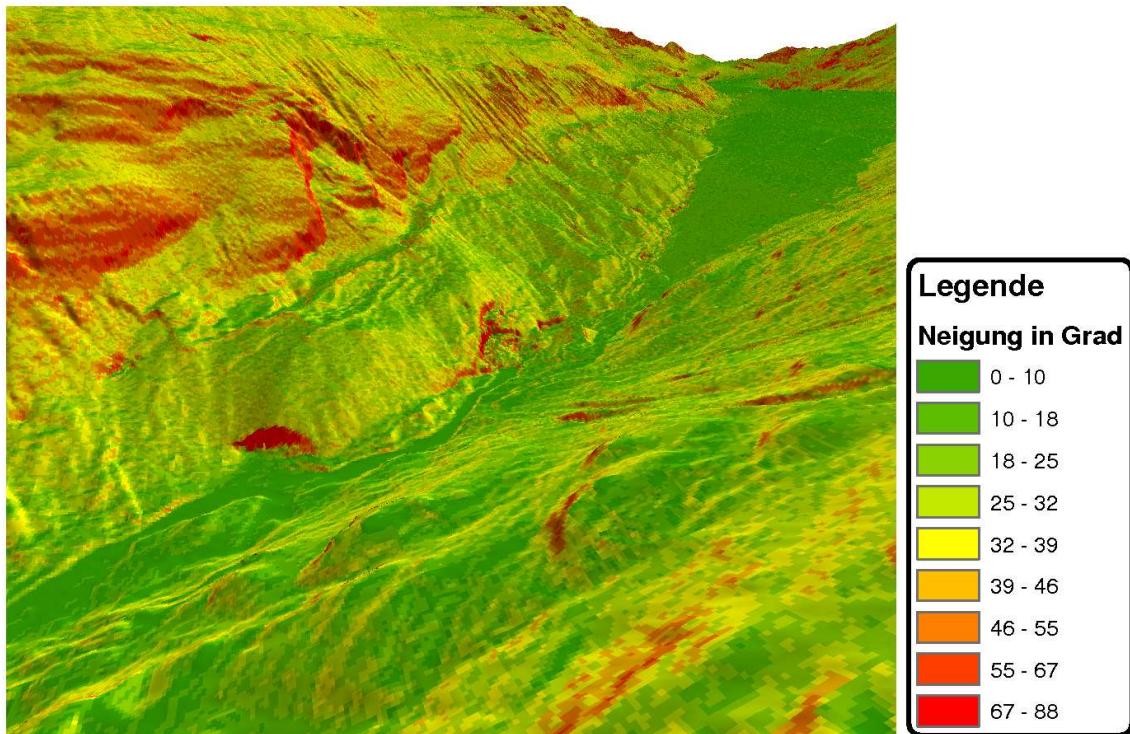


Abbildung 4.1: Hangneigung im Untersuchungsgebiet. Der Toteisbereich wird im unteren Bereich vom Gletscherbach und oben von der steilen Flanke begrenzt (Kartengrundlage: ALS Daten einer Befliegung vom 09.09.2008.).

auf. Die konvexe Form des Toteisbereichs ist gut erkennbar. Im oberen Bereich, zur steilen Flanke hin, ist das Gelände flach. Dort befindet sich eine moränenartige Anhäufung von

Sedimenten. Zum Gletscherbach hin wird das Gelände steiler. Den Abschluss zum Gletscherbach bildet wieder eine Anhäufung von Sedimenten.

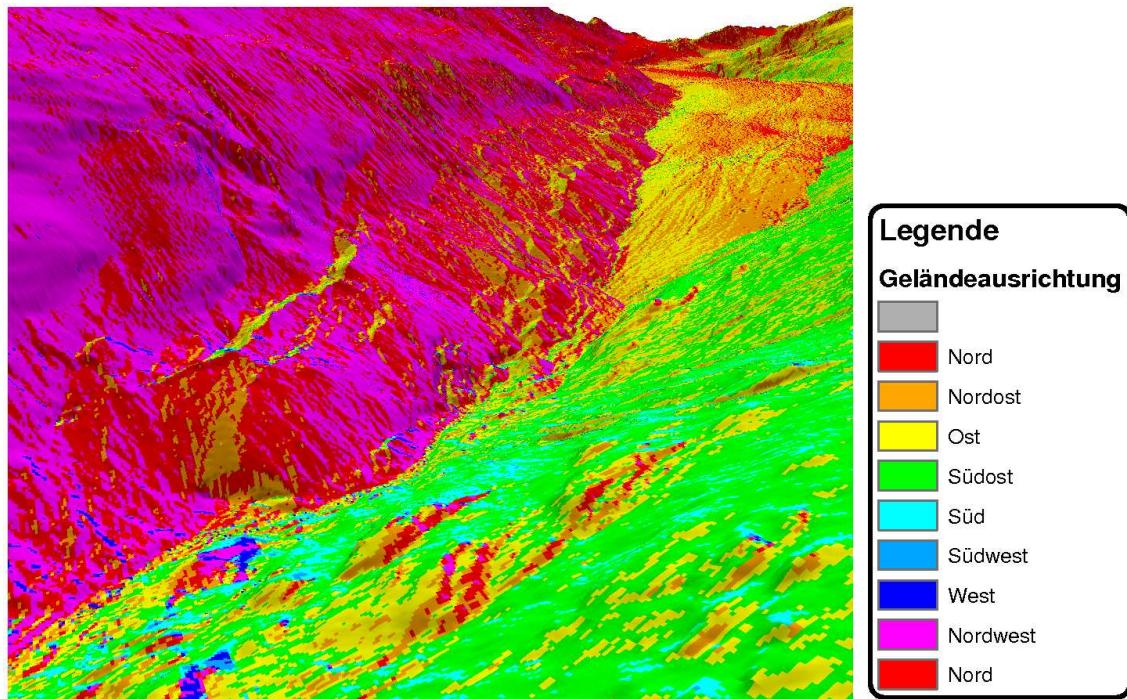


Abbildung 4.2: Exposition im Untersuchungsgebiet (Kartengrundlage: ALS Daten einer Befliegung vom 09.09.2008.).

In Abbildung 4.2 sind auf der Zungenoberfläche bachartige Strukturen zu erkennen, die typische Formen der freien Ablation darstellen. Der Abfluss von Schmelzwasser führt zur Bildung dieser Rinnen, in dem östlich bis nordöstlich exponierten Teil des Ablationsgebietes. Der Toteisbereich hat eine nördliche bis nordwestliche Ausrichtung.

Mit dem Tool *Area Solar Radiation* wurden Sonnenscheindauer, Globalstrahlung, direkte Strahlung und diffuse Strahlung ermittelt. Dieses Werkzeug berechnet die Sonneneinstrahlung basierend auf einem Abschattungsalgorithmus für spezielle Punkte oder Flächen (Rich et al., 1994). Die Berechnung startet am 18.08.2008 mit halbstündlicher zeitlicher Auflösung. Die Werte werden über 23 Tage bis zum 10.09.2008 aufsummiert. Grafik 4.3 zeigt den erheblichen Unterschied in der Sonnenscheindauer an den gegenüberliegenden Talseiten. Sehr steile Stellen an der Schattenseite weisen wenig bis keine Sonnenstunden auf. Auf der Toteisoberfläche liegen die Werte bei ca. 200 h/23 Tage, auf der Zunge bei ca. 245 h/23 Tage. Darazus lässt sich folgern, dass die Zunge täglich etwa zwei Stunden mehr direkte Einstrahlung bekommt. In der Abbildung 4.4 sind erhebliche Unterschiede in der Globalstrahlung zwischen freier Gletscheroberfläche und dem bedeckten Toteiskomplex zu sehen. Im Zungenbereich erreicht die summierte Globalstrahlung über die Messperiode von 23 Tagen Werte von ca. 120.000 Wh/m², während auf der Toteisoberfläche variierende Werte von 500 bis zu 100.000 Wh/m² auftreten. Um festzustellen ob sich die Unterschiede in der Abschmelzung durch die Strahlung oder die Schuttbedeckung ergeben, wird errechnet wieviel Eis man mit der jeweiligen Strahlungsenergie abschmelzen könnte. Zur

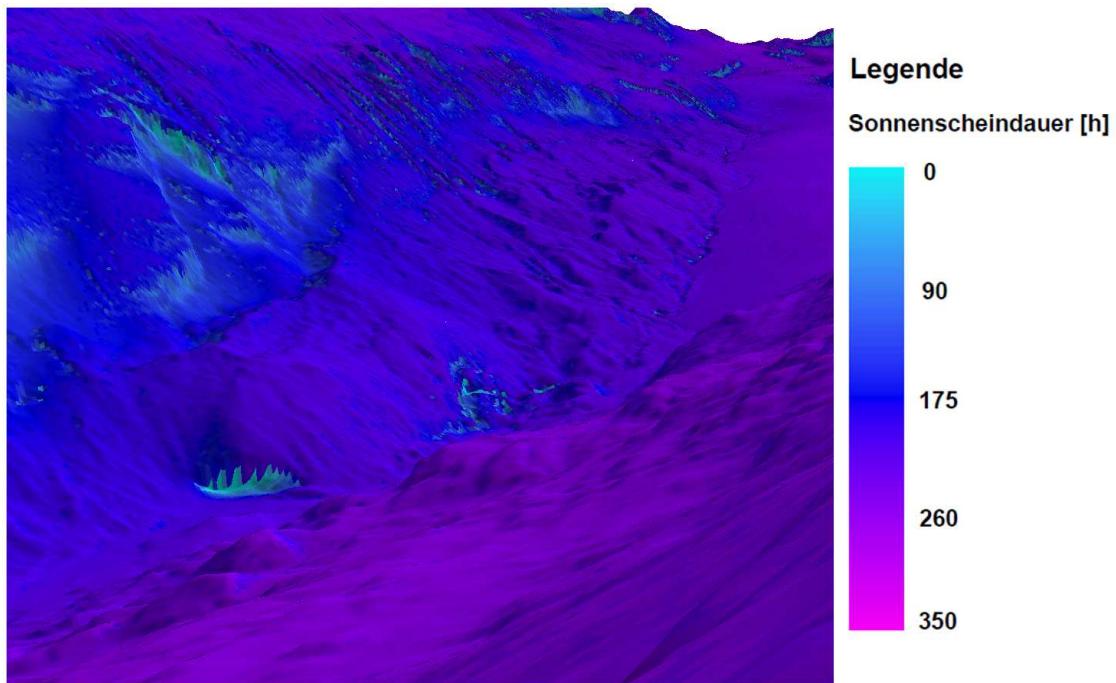


Abbildung 4.3: Sonnenscheindauer in Stunden, aufsummiert über einen Zeitraum von 23 Tagen (Kartengrundlage: ALS Daten einer Befliegung vom 09.09.2008.).

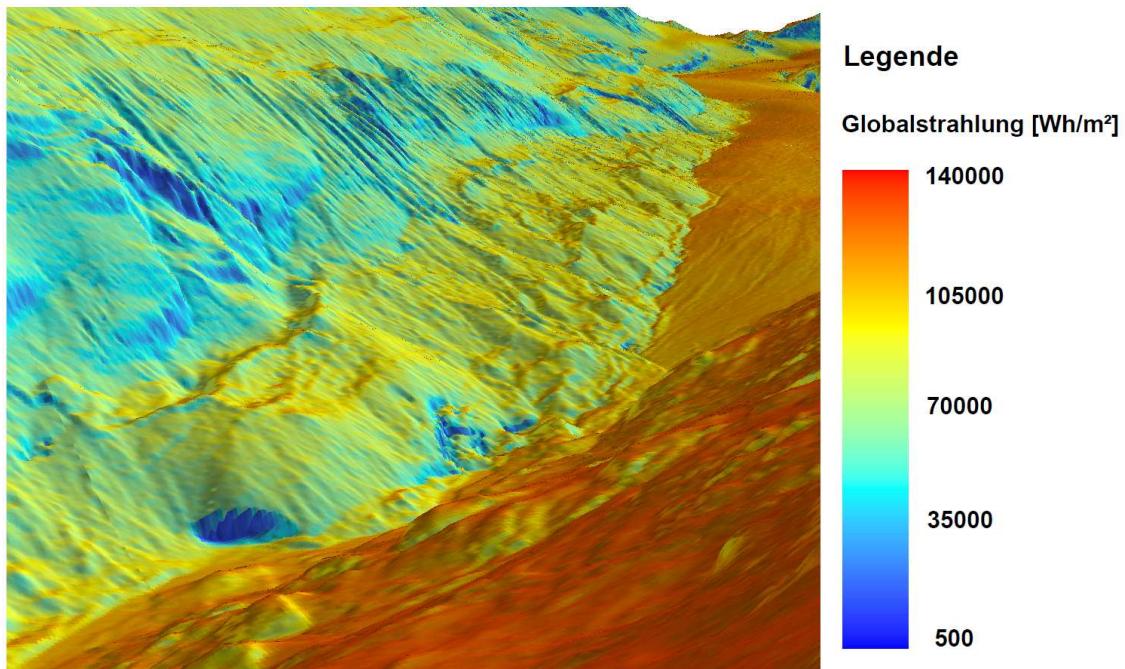


Abbildung 4.4: Globalstrahlung in Wh/m^2 , aufsummiert über einen Zeitraum von 23 Tagen (Kartengrundlage: ALS Daten einer Befliegung vom 09.09.2008.).

Berechnung werden drei Mittelwerte für blankes Eis, schuttbedecktes Eis und die Gletscherzunge herangezogen. Auch die Albedo wird berücksichtigt. Um 1 kg Eis zu schmelzen (bei 0°C) wird eine Energie von 334 kJ benötigt. Man nennt sie Schmelzenergie. Über die Dichte von Eis (913 kg/m^3) kann eine Abschmelzrate pro Tag und die Ablation in

der Periode zwischen den Messterminen berechnet werden (Tabelle 4.1). Diese Methode

	Globalstrahlung in 23 Tagen [Wh/m ²]	Albedo [%]	pot. Ablation in 23 Tagen [m]	gemessene Werte 23 Tage [m]
blankes Toteis	50000	50 %	0,30	0,44
schuttbedecktes Toteis	80000	20 %	0,19	0,15
Gletscherzunge	120000	50 %	0,71	1,30

Tabelle 4.1: potentiell schmelzbares Eis durch den Einfluss der Globalstrahlung unter Berücksichtigung der Albedo.

zur Berechnung der potentiellen Ablation basiert auf einem stark vereinfachten Modell. Der Einfluss der Atmosphäre auf die einfallende Strahlung (z.B. Wolken, Wetter) wird vernachlässigt.

Aus Tabelle 4.1 geht hervor, dass die unterschiedliche Ablation nicht alleine durch die Strahlung erklärt werden kann und auch die Schuttbedeckung Einfluss auf das Abschmelzen hat.

4.2 Dickenänderungen

4.2.1 Vergleich der Modelle - Dickenänderung TLS

Die erstellten Polygonmodelle werden in das Modul IMInspect importiert. Umfangreiche Vergleichstools stehen hier zur Verfügung. Zunächst werden die gesamten Modelle verglichen. Als Vergleichsmethode wurde "kürzester Abstand" gewählt. Die stärkste Minderung der Dicke ist im Bereich des ehemaligen Gletschertor und auch bei den beinahe blanken Eisflächen über dem Bruch erkennbar. Zwischen dem unteren Rand des Toteiskörpers und dem Gletscherbach zeichnet sich eine Volumenzunahme ab. Sedimente, die auf dem Toteiskörper liegen, werden nach und nach mit dem Schmelzwasser hangabwärts transportiert und lagern sich hier im Laufe der Zeit ab.

Bereiche, in denen größere Datenlücken des Modells nachträglich geschlossen wurden eignen sich weniger für die Vergleichsauswertung. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 4.5 zu sehen (rot umrandet).

Wird die Oberfläche eines Polygonmodells mit den Grauwerten der reflektierten Intensitäten ausgegeben, ergibt sich folgendes Bild: In Abbildung 4.6 sind dunkle Bereiche zu erkennen, in denen nur ein geringer Teil des ausgesendeten Impulses reflektiert wurde. Dies kommt daher, dass der TLS im nahen Infrarot arbeitet und Eis in diesem Wellenlängenbereich stark absorbiert (Abbildung 2.11).

Nun lassen sich mit Hilfe der reflektierten Intensitäten Bereiche klassifizieren, auf denen sich eine geringe Schuttauflage befindet. Auch die gefüllten Löcher des Modells sind in Abbildung 4.6 anhand der glatten Oberfläche und der beinahe einheitlichen Grauwertfärbung gut zu erkennen. Stellen, an denen eine dicke Schuttbedeckung vorherrscht sind heller dargestellt, hier wird ein größerer Anteil der Infrarotstrahlung reflektiert.

Das IMInspect Modul bietet die Möglichkeit nach Grauwerten, also zurückgestreuten In-

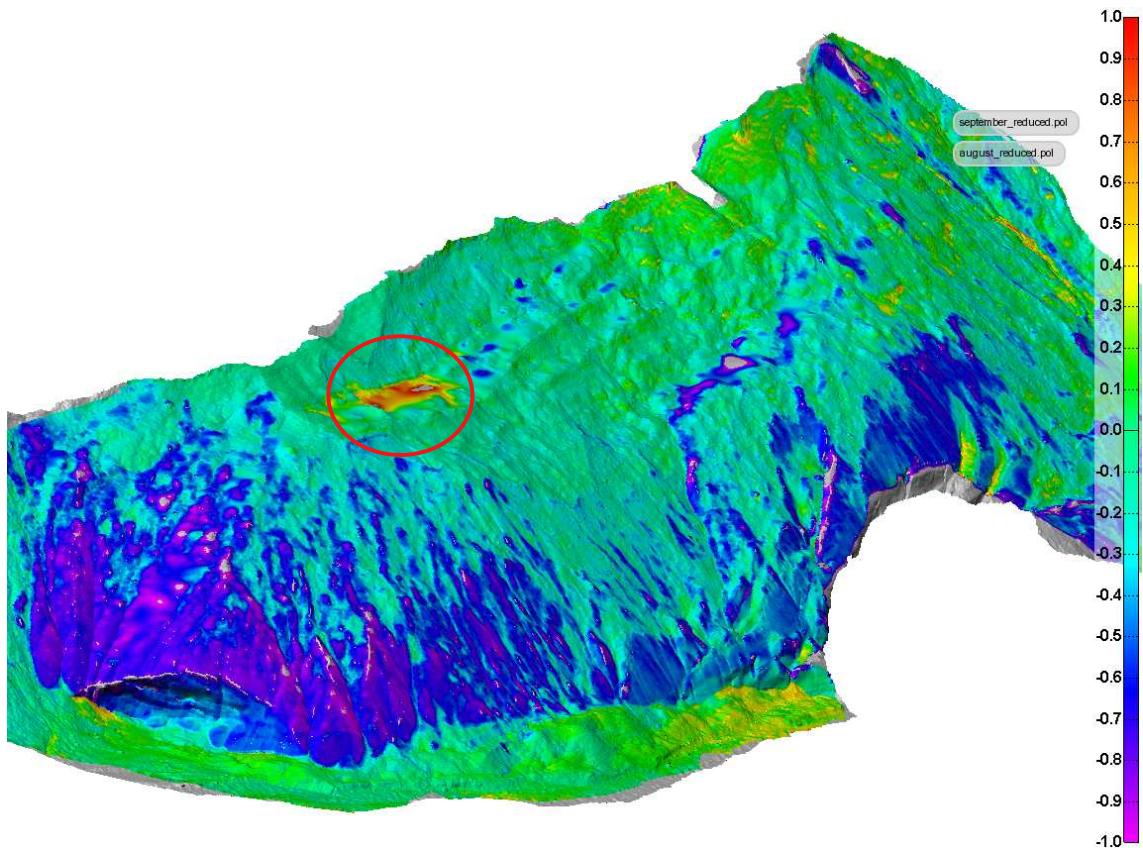


Abbildung 4.5: Vergleich der Polygonmodelle vom 18.08.2008 und dem vom 10.09.2008. Die Einheit der Farbskala ist Meter.

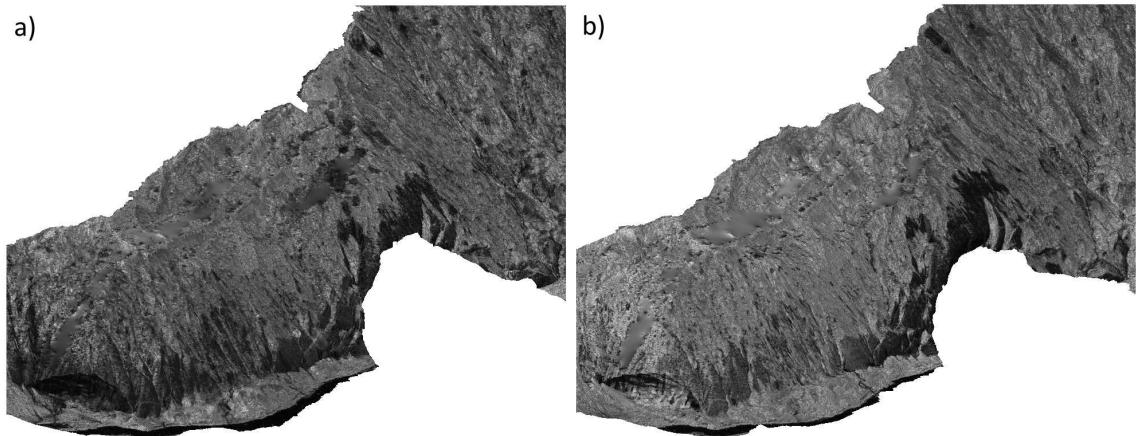


Abbildung 4.6: Die reflektierte Intensität wird in einer Grauwertskala (0-255) dargestellt. a) Messung vom 18.08.2008 b) Messung vom 10.09.2008

tensitäten zu filtern. Es wurde versucht Grenzwerte zu finden, und so eine Klassifizierung der Oberfläche zu erhalten.

Um die Schwellenwerte zu verifizieren wurden manuell Bereiche ausgewählt, die entweder eine starke Schuttbedeckung oder blankes Eis aufweisen. Hierzu waren die unzähligen Fotos sehr hilfreich. In Abbildung 4.7 sind die zum Vergleich herangezogenen Punkte rot

markiert. Durch die beschriebene Methode kann sauber zwischen Schuttbedeckung und

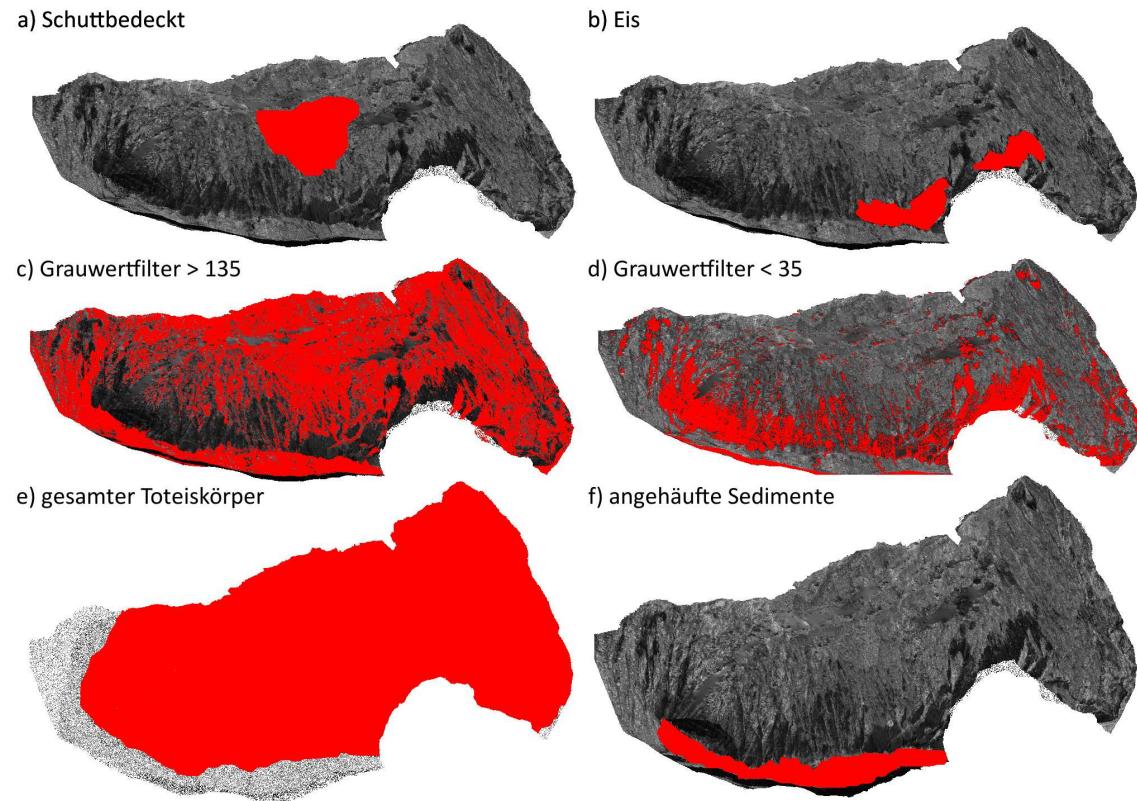


Abbildung 4.7: Alle rot markierten Punkte werden zum Vergleich herangezogen. a) manuell markierter Bereich einer schuttbedeckten Fläche. b) manuell markierter Bereich einer blanken Fläche. c) Markierung mit einem Grauwertfilter, alle Punkte deren Intensität größer 135 ist. d) Markierung mit einem Grauwertfilter, alle Punkte deren Intensität geringer als 35 ist. e) manuell markierter Bereich, Toteis. f) manuell markierter Bereich der abgelagerten Sedimente.

Eis unterschieden werden. Die Abschmelzungsunterschiede können quantifiziert werden. Für die markierten Bereiche können Vergleichsstatistiken ausgegeben werden. In Tabelle 4.2 ist die Output-Statistik für das gesamte Toteis (Abbildung 4.7 e)) zu sehen. Die Veränderungsergebnisse stellen eine Dickenänderung dar, da die Punkte der beiden Modelle mit der Option *kürzester Abstand* verglichen werden. Das heißt es wird die Änderung normal zur Oberfläche ausgegeben. Diese Statistik wurde für alle in Abbildung 4.7 gezeigten Bereiche erstellt. Die größte Dickenänderung ist bei den manuell markierten blanken Eisflächen mit 44 cm zu sehen. Die über die Intensitäten ermittelten Eisflächen weisen eine Änderung von 39 cm auf. Die manuell und mit dem Grauwertfilter markierten schuttbedeckten Bereiche zeigen mit 15 cm bzw. 14 cm weniger als die halbe Abschmelzung. Die Ablation wird um ca. 62 % vermindert. Dieser Wert stimmt recht gut mit den Angaben aus der Literatur überein (Nicholson und Benn, 2006; Kirkbride und Warren, 1999; Skogsberg und Lundberg, 2005). Der gesamte Toteisbereich hat im Mittel 24 cm verloren. Am Fuß des Toteisbereich sammelten sich zwischen den Messterminen Sedimente mit einer Höhe von durchschnittlich 7 cm an.

Tabellentyp	Daten zu Daten (Datenpunkt)
Einheiten	Meter
Vergleichsobjekt	september.reduced.pol
Referenz	august.reduced.pol
Vergleichsabstand	1,000
Toleranz \pm	$\pm 0,002$
Fehlerrichtung	Kürzester Abstand
Anzahl der Punkte	3.173.852
Mittelwert	-0,243
Standard Abweichung	0,266
RMS Fehler	0,360
Punkte innerhalb $\pm(1 * \text{StdAbw})$	2177674 (68.613%)
Punkte innerhalb $\pm(2 * \text{StdAbw})$	3038339 (95.730%)
Punkte innerhalb $\pm(3 * \text{StdAbw})$	3162709 (99.649%)
Punkte innerhalb $\pm(4 * \text{StdAbw})$	3171347 (99.921%)
Punkte innerhalb $\pm(5 * \text{StdAbw})$	3173852 (100.000%)
Punkte innerhalb $\pm(6 * \text{StdAbw})$	3173852 (100.000%)
Anzahl Punkte außerhalb Toleranz	3158336 (99.511%)

Tabelle 4.2: Vergleichsergebnisse für den gesamten Toteisbereich, der in Abbildung 4.7 e) rot markiert ist.

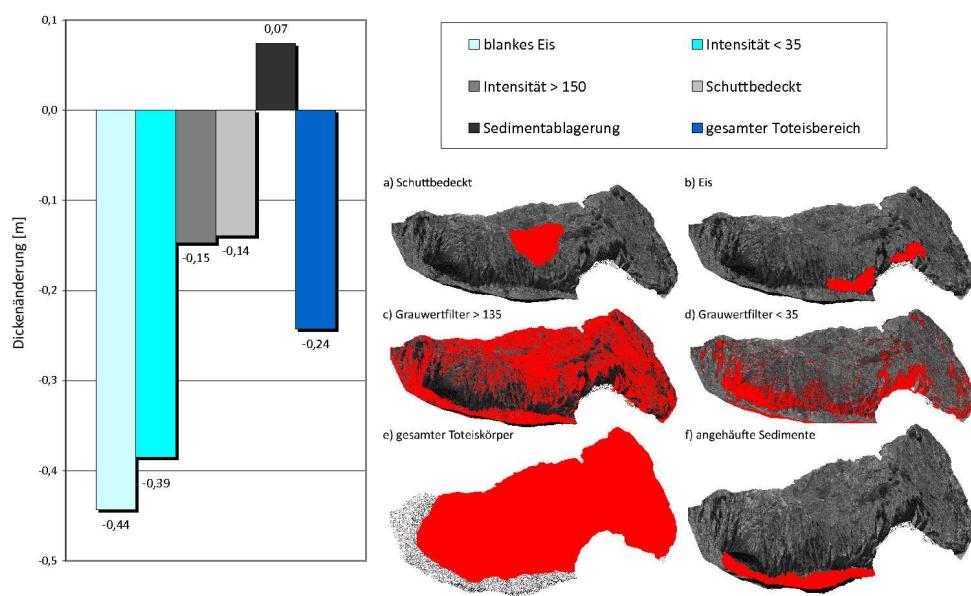


Abbildung 4.8: Dickenänderung der rot markierten Bereiche des Toteiskörpers.

4.2.2 Vergleich der Modelle - Dickenänderung ALS

Während die TLS Messungen 23 Tage auseinander liegen, fanden die Befliegungen am 07.08.2008 und am 09.09.2008 statt. Hieraus ergibt sich eine Zeitspanne von 33 Tagen. Somit sind die Ergebnisse von TLS und ALS nicht direkt Vergleichbar und bedürfen einer Interpolation. Die Interpolation erfolgt linear. Um diese Approximation zu bestätigen, wurde ein Messpegel im Bereich der Gletscherzunge herangezogen, der dem Toteisbereich lage- und höhenmäßig am nächsten ist. In Abbildung 4.9 ist die Ablation am Messpegel 19 dargestellt. Da in der Periode keine Neuschneefälle augetreten sind, die die Steigung des Ablationsverlaufes in Abbildung 4.9 ändern würden, kann der Ablationsverlauf linear angenähert werden. Die in Grafik 4.9 dargestellten Werte stammen von Feldmessungen.

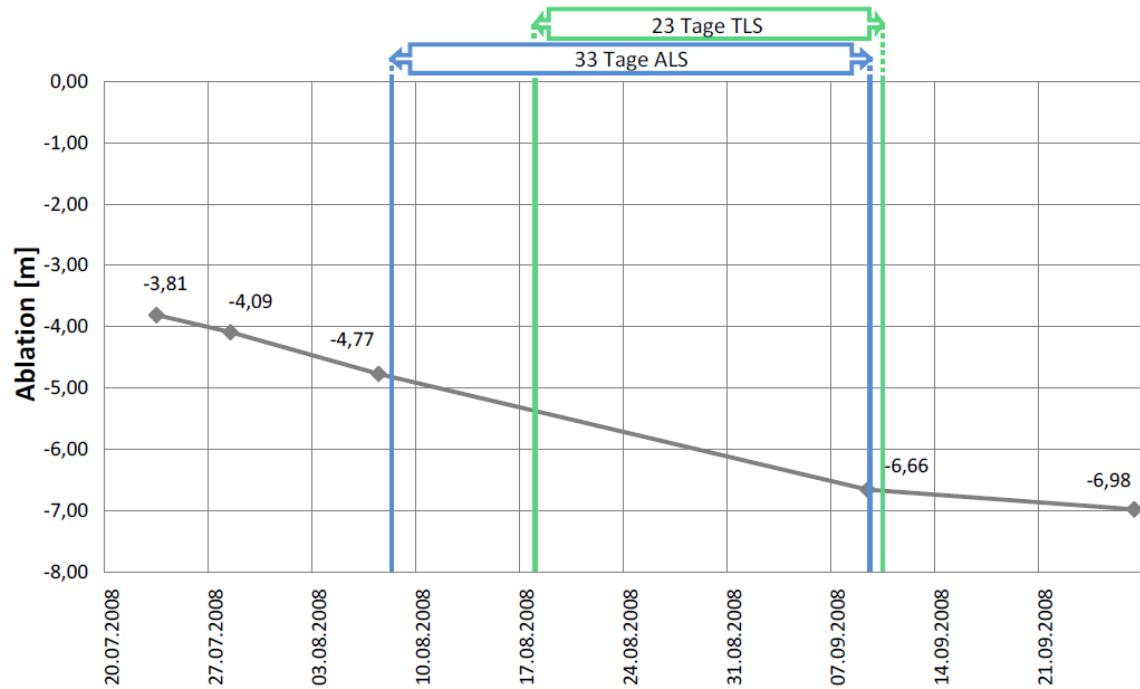


Abbildung 4.9: Ablationsverlauf am Pegel 19. TLS erste Messkampagne am 18.08.2008, zweite Messkampagne am 10.09.2008. Die ALS Befliegungen fanden am 07.08.2008 bzw am 09.09.2008 statt.

Die Pegel werden mit Hilfe eines Dampfbohrers in das Gletschereis bündig "eingebohrt", die laufende Ablation kann am freien Ende des Pegels abgelesen werden. Am Pegel 19 ergibt sich so eine mittlere Abschmelzrate von 5,7 cm pro Tag. Das heisst, in 33 Tagen sind 1,9 m bzw. in 23 Tagen 1,3 m Eis weggeschmolzen und verdunstet. Die horizontale Fließgeschwindigkeit des Gletschers im Bereich des Pegels ist als sehr gering einzuschätzen (weniger als 4 m/a). An der Steinlinie 6 wurde im Laufe der letzten Jahre eine stetige Abnahme der Fließgeschwindigkeit beobachtet (persönliche Kommunikation mit Dr. Heralt Schneider).

Um eine Gegenüberstellung der Messungen von ALS und TLS zu ermöglichen, wurde derselbe Bereich wie bei den TLS-Berechnungen am Toteis manuell markiert. In Abbildung 4.7 e) und Abbildung 4.10 wird dies veranschaulicht. Die dazugehörige Output-Statistik ist

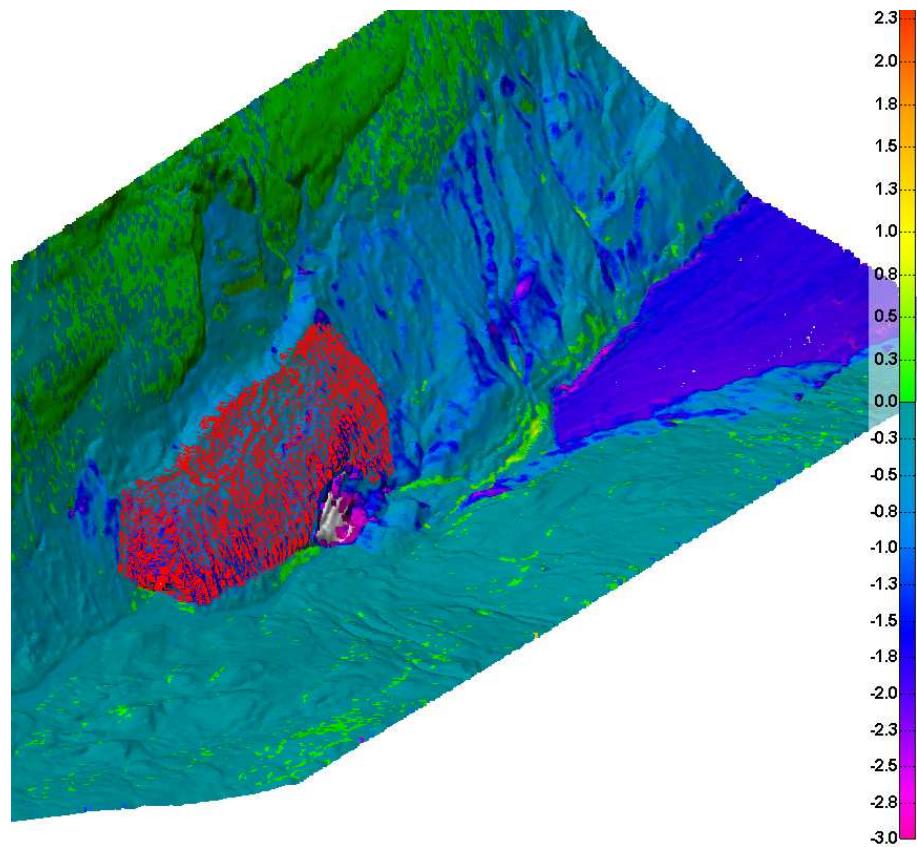


Abbildung 4.10: Alle rot markierten Punkte wurden zum Vergleich herangezogen.

in Tabelle 4.3 dargestellt: Wie bei den TLS Verglichen wurden auch hier charakteristische

Tabellentyp	Daten zu Daten (Datenpunkt)
Einheiten	Meter
Vergleichs Objekt	09.09.pol
Referenz	07.08.pol
Vergleichs Abstand	3,0
Toleranz \pm	$\pm 0,002$
Fehlerrichtung	Kürzester Abstand
Anzahl der Punkte	26.849
Mittelwert	-0,75
Standard Abweichung	0,34
RMS Fehler	0,82
Punkte innerhalb $\pm(1 * \text{StdAbw})$	18370 (68.419680%)
Punkte innerhalb $\pm(2 * \text{StdAbw})$	25755 (95.925360%)
Punkte innerhalb $\pm(3 * \text{StdAbw})$	26796 (99.802600%)
Punkte innerhalb $\pm(4 * \text{StdAbw})$	26838 (99.959030%)
Punkte innerhalb $\pm(5 * \text{StdAbw})$	26845 (99.985102%)
Punkte innerhalb $\pm(6 * \text{StdAbw})$	26847 (99.992551%)
Anzahl Punkte außerhalb Toleranz	26849 (100.000000%)

Tabelle 4.3: Vergleichsergebnisse für den gesamten Toteisbereich, erstellt aus den ALS Daten vom 07.08.2008 und 09.09.2008.

Flächen markiert und die jeweiligen Dickenänderung ausgegeben (Abbildung 4.11). Die

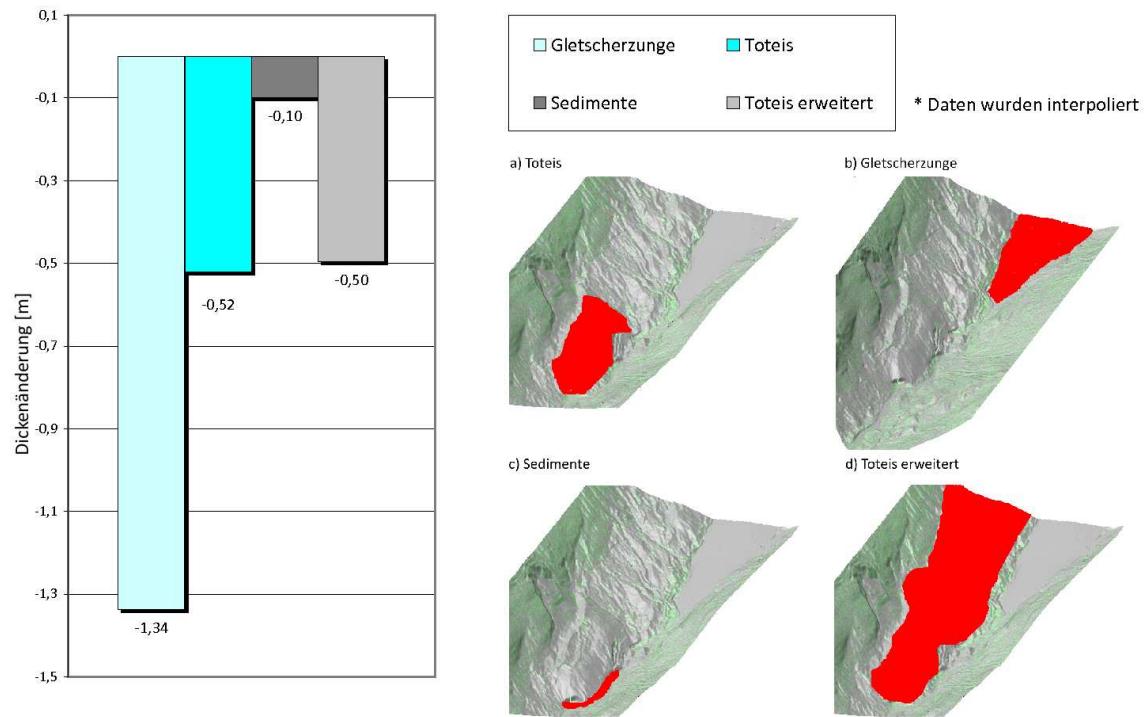


Abbildung 4.11: Dickenänderung am Toteiskörper der rot markierten Bereiche des Toteiskörpers, bereits auf 23 Tage interpoliert.

stärkste Änderung wurde an der Gletscherzunge mit durchschnittlich 134 cm festgestellt. Dieser Wert deckt sich mit dem interpolierten Wert von 130 cm am Pegel 19. Um die Ergebnisse des Toteiskörpers von ALS und TLS vergleichen zu können wurde derselbe Bereich markiert. Die Änderungen betragen hier im Mittel 52 cm. Ein erweiterter Bereich, südlich der Zunge, wurde ebenfalls zum Vergleich herangezogen (Abbildung 4.11 d)). Das Ergebnis ist mit 50 cm sehr ähnlich. Auch die abgelagerten Sedimente wurden versucht zu erfassen. Leider wurde hier mit 10 cm kein plausibles Ergebnis ausgegeben, die Erklärung dazu folgt im nächsten Abschnitt.

4.2.3 Vergleich Dickenänderung TLS - ALS

In diesem Abschnitt werden die aus den TLS- und ALS-Methoden erhaltenen Werte miteinander verglichen. Mit dem TLS wurde leider nur ein kleiner Randbereich der Zunge bei beiden Terminen erfasst. Es war in diesem Bereich nicht möglich die Oberfläche für einen regulären Vergleich zu rekonstruieren. Um trotzdem eine Aussage über die Dickenänderung treffen zu können, wurden einzelne Punkte markiert und deren Abstand gemessen (Abbildung 4.12). Dasselbe Verfahren wurde für die ALS-Modelle für den adäquaten Bereich der Gletscherzunge angewandt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle A.1 im Anhang zusammengefasst. Somit ergibt sich für die Periode von 23 Tagen eine mittlere Dickenänderung an der Gletscherzunge von 2,32 m aus den TLS-Daten bzw. 1,75 m mit den ALS-Daten. In Grafik 4.13 werden die Ergebnisse der Auswertung der ALS- und TLS-Daten für ver-

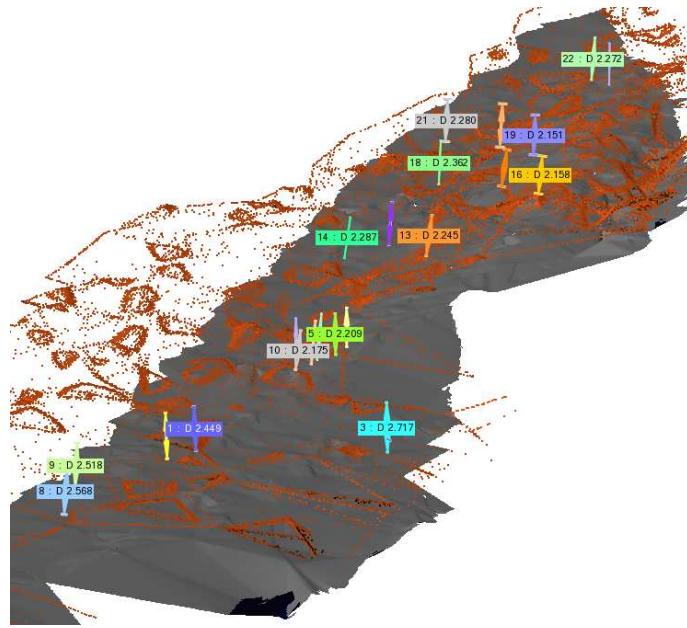


Abbildung 4.12: Das Modell vom 18.08.2008 (orange) wird als Punktwolke, das Modell vom 10.09.2008 (grau) wird als Gouradmodel dargestellt. Die Abstandsmessung sind als farbige Pfeile erkennbar.

schiedene charakteristische Bereiche einander gegenübergestellt. Die mittlere Dickenände-

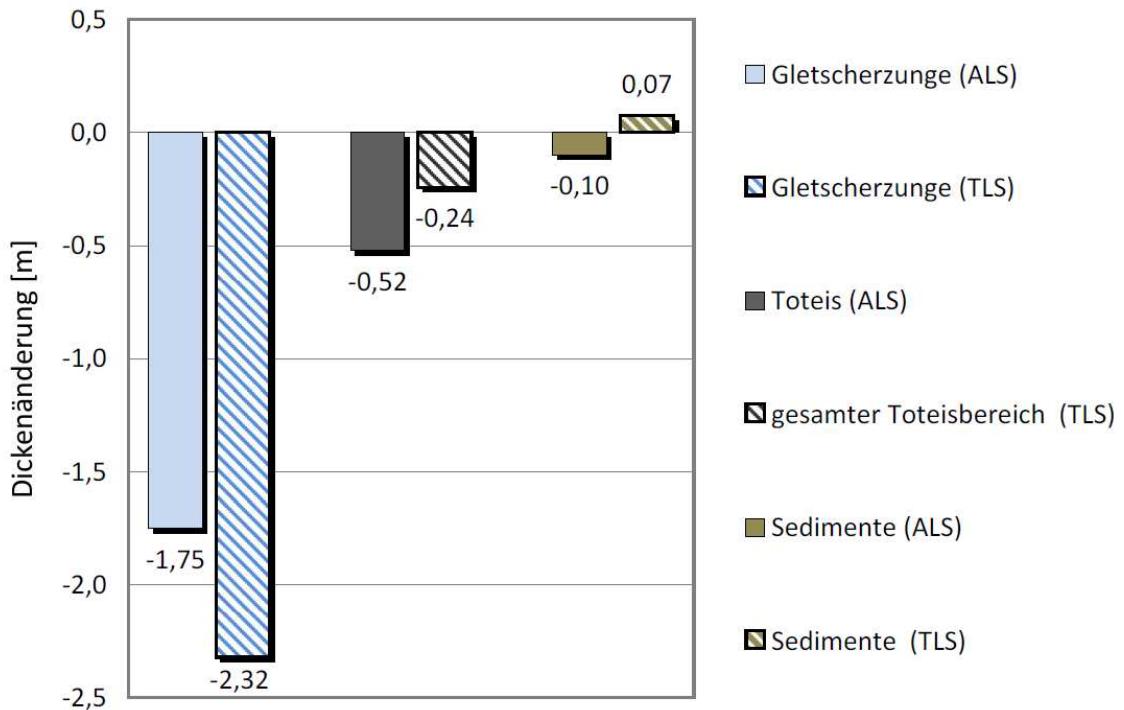


Abbildung 4.13: Vergleich der Dickenänderung in den Bereichen Gletscherzunge, Toteis und Sedimente für eine Periode von 23 Tagen. Gefüllte Balken sind Werte der ALS Messungen; Strichlierte Balken sind Werte der TLS Messungen.

rung im Toteisbereich beträgt 0,52 m (ALS) bzw. 0,24 m (TLS). Die Größenordnung der

Werte erscheint realistisch, jedoch gibt es eine Differenz von 28 cm. Im Bereich der an gehäuften Sedimenten am Fuße des Toteisbereichs ergibt die Auswertung der ALS-Daten mit -0,10 m sogar ein anderes Vorzeichen als die +0,07 m der TLS-Daten.

Diese Diskrepanz in den Werten kann durch die unterschiedliche Auflösung der TLS- und ALS-Modelle erklärt werden. Während bei der terrestrischen Aufnahme ein Punktabstand der einzelnen Messungen von ca. 5 cm in der mittleren Entfernung zur Oberfläche erreicht wurde, hat der ALS-Datensatz einen Punktabstand von ca. 1 m. Die Punktwolke der TLS Messung hat folglich um die 400 Punkte pro Quadratmeter, während die ALS Punktwolke nur etwa 2 Punkte pro Quadratmeter aufweist. Um aus diesen Rohdaten ein digitales Geländemodell zu generieren, wird durch die Punktwolken eine ausgleichende Fläche gelegt. Je weniger Punkte vorhanden sind, desto schlechter sind kleinräumige Oberflächenstrukturen und Objekte erkennbar.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

In zwei Messkampagnen wurden am Hintereisferner der gesamte Toteiskomplex und ein Teil der Gletscherzunge mit TLS vermessen. Im Laufe der Auswertung wurden die erstellten Geländemodelle auf Veränderungen untersucht und die Dickenänderung bestimmt. Die mittlere Abschmelzung an den blanken Eisflächen liegt bei ca. 40 cm, im schuttbedeckten Bereich bei ca. 15 cm innerhalb von 23 Tagen. Das heisst, die Ablation wird durch die Sedimentauflage um 62 % vermindert. Bei einer Mächtigkeit der Schuttauflage von 10 cm wird in der Literatur eine Verminderung der Abschmelzrate um 35 % bis 66 % angegeben (Skogsberg und Lundberg, 2005). Der gesamte Toteisbereich weist eine mittlere Abschmelzung von 24 cm in 23 Tagen auf. Zukünftig stellt diese Methode eine gute Möglichkeit dar, den Rückgang von Toteisflächen zu messen.

Da für das Untersuchungsgebiet auch ALS-Daten für den betreffenden Zeitraum zur Verfügung stehen, konnten die Methoden verglichen werden.

Mit den ALS-Daten sowie mit den TLS-Daten ist es gelungen, die Dickenänderungen für die Periode zwischen den Messterminen zu berechnen. Der Vergleich der beiden Aufnahmemethoden zeigt im Gletscherzungen- und im Toteisbereich ähnliche Ergebnisse. Die Footprintgröße von ca. 0,5 m und die geringere Punktdichte begrenzen die Genauigkeit der registrierten Punktwolke beim ALS. Deshalb ist es nicht möglich, kleinräumige Veränderungen, wie z.B. die angehäuften Sedimente am Gletscherbach, zu erfassen.

Gute Ergebnisse lieferte die Klassifizierung der Toteisoberfläche nach ihren zurückgestreuten Intensitätswerten. Ein Filter, der nur jene Punkte zur Berechnung der Ablation heranzieht, deren Grauwert höher als 135 ist, wurde benutzt, um typische Dickenänderungen für schuttbedeckte Teile zu erhalten. Der Vergleich mit den manuell markierten sedimentreichen Oberflächen zeigt eine Abweichung von nur 1 cm. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den blanken Eisflächen. Der Grauwertfilter scheidet in diesem Fall jene Punkte aus, deren Grauwert größer als 35 ist. Eine Differenz von 5 cm in der Dickenänderung zu den manuell markierten Bereichen bestätigt auch hier den verwendeten Schwellwert.

Aufgrund der ständigen Veränderungen an der Toteisoberfläche war es nicht möglich ein feature tracking durchzuführen und Aussagen über die Bewegung im Eis zu machen. Bewegungen im Toteiskomplex, die sich von der reinen Ablation unterscheiden lassen, gab es zwischen den Messterminen nur im Bereich des Gletscherbruchs. An dieser Stelle kommt der Gletscherbach zum Vorschein. Durch den Kontakt mit dem Wasser, kommt noch ein Massenverlust am Eiskörper zur Ablation hinzu. Hier sind größere Schollen abgebrochen. Der gesamte Gletscherbruch ist eingesackt (Abbildung im Anhang A.3 August und September 2008).

Ausblick

Um die Oberflächenklassifizierung zu verbessern, bietet sich eine Normalisierung des Datensatzes über den lokalen Einfallswinkel an. Aus den Geländemodellen lässt sich der Normalvektor und der lokale Einfallswinkel für jeden Punkt bestimmen. Die zurückgestreute Intensität kann anschließend über den Winkel zwischen den beiden Vektoren korrigiert werden.

Mit den am Markt neu verfügbaren Full-Waveform Laserscannern kann im Gegensatz zu den diskreten Systemen, die gesamte zurückgestreute Energie eines Laserimpuls aufgezeichnet werden. Durch die zusätzliche Beobachtung von Amplitude, Echobreite und Backscatter Cross Section kann die Genaugkeit der resultierenden Modelle und der Klassifikation gesteigert werden.

Das verwendete Softwarepaket Polyworks ist so ausgelegt, dass immer nur ein Prozessor von der jeweiligen Anwendung benutzt werden kann. Der Rechner, auf dem die Auswertung durchgeführt wurde, besitzt einen Quadcore-Prozessor. Das heißt, die CPU's werden von PolyWorks nur maximal 25% ausgelastet, was den großen Nachteil langer Berechnungsprozesse mit sich bringt. Auch eine Anfrage beim Support der Software blieb erfolglos. So bleibt zu wünschen, dass dieses Problem mit einer zukünftigen Version des Programms behoben wird.

Anhang A

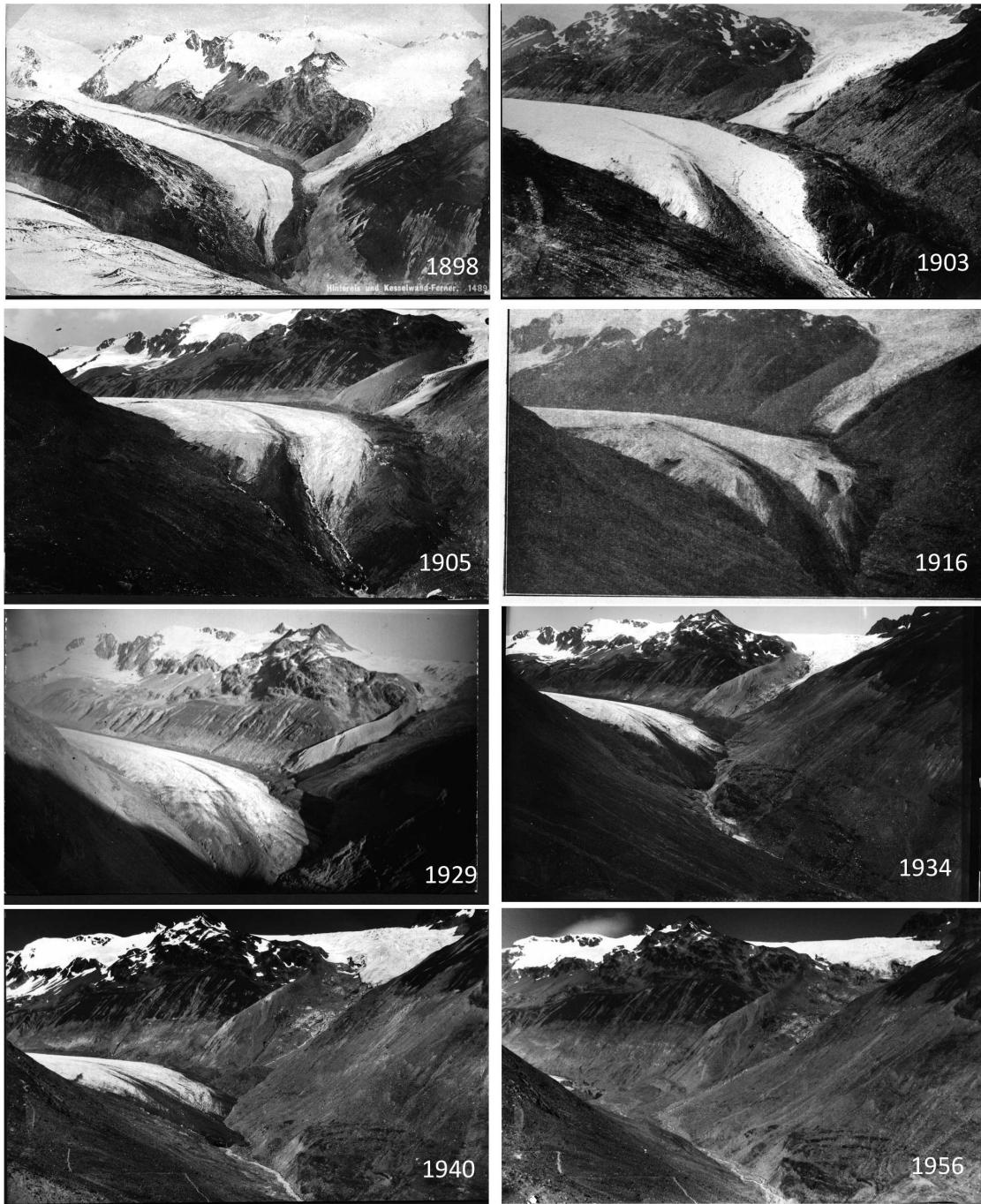


Abbildung A.1: 1898 reichte die Zunge des Hintereisferners beinahe noch bis zum jetzigen Hochjoch Hospiz. Im Laufe der Jahre ist der stetige Rückzug und die Abtrennung des Kesselwandferners zu sehen. Fotos: IMGI



Abbildung A.2: Der Toteiskomplex an der Zunge des Hintereisferner. 2001 bis 2006 Fotos: IMGI



Abbildung A.3: Der Toteiskomplex an der Zunge des Hintereisferner. Panoramafotos der letzten Jahre. Fotos: IMGI

Name	Abweichung TLS [m]	Abweichung ALS [m]
Abstand 1	2,45	3,13
Abstand 2	2,51	3,01
Abstand 3	2,72	2,23
Abstand 4	2,21	2,03
Abstand 5	2,43	2,25
Abstand 6	2,12	3,00
Abstand 7	2,52	2,09
Abstand 8	2,18	2,21
Abstand 9	2,36	2,48
Abstand 10	2,50	2,59
Abstand 11	2,25	2,54
Abstand 12	2,29	2,63
Abstand 13	2,28	2,72
Abstand 14	2,16	2,15
Abstand 15	1,99	2,15
Abstand 16	2,36	2,42
Abstand 17	2,15	2,55
Abstand 18	2,40	2,54
Abstand 19	2,28	2,77
Abstand 20	2,27	2,71
Abstand 21	2,28	2,59
Mittel	2,32	2,51
Mittel 23 Tage	2,32	1,75

Tabelle A.1: Volumensänderung für die Gletscherzung. Vergleich von TLS und ALS Daten. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden die ALS-Werte auf 23 Tage interpoliert.

Dieses Poster wurde im Rahmen des deutschen Geographentages präsentiert.



Laserscanmessungen zur Bestimmung der Ablation im schuttbedeckten Teil des Hintereisferner

M. Juen^{1*}, A. Fischer¹

¹ Institute of Meteorology and Geophysics (IMGI), University of Innsbruck, Austria
*Martin.Juen@student.uibk.ac.at

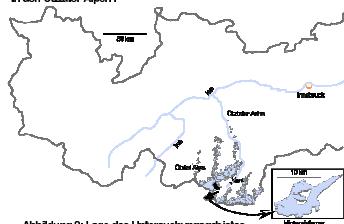


Einleitung

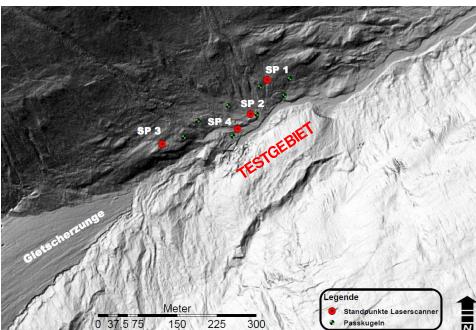
Seit der maximalen Ausdehnung der Alpengletscher um 1850 wurde ein kontinuierlicher Rückzug beobachtet. Ausnahmen stellen die letzten Gletschervorstöße um 1920 und 1980 dar. Aktuell weisen zahlreiche Gletscher negative Massenbilanzen auf. Durch den damit verbundenen Rückzug der Eismassen bleiben immer häufiger Toteisbereiche zurück, welche den dynamischen Kontakt zum eigentlichen Gletscher verloren haben. Typisch für Toteiskörper ist die Bedeckung mit instabilen Sedimenten, welche die Anwendung der direkten glaziologischen Methode zur Massenhaushaltsbestimmung aufgrund der mechanischen Zerstörung der Pegel verhindern. Mittels Terrestrischem Laserscanning wurde ein Toteisbereich am Hintereisferner in zwei Messkampagnen im August und September 2008 vermessen. Die Georeferenzierung der Passpunkte erfolgte mit differenziellem GPS in Real Time Kinematik.



Abbildung 1: Der Toteisbereich an der Zunge des Hintereisferner in den Ötztaler Alpen.



Messgebiet & Messanordnung



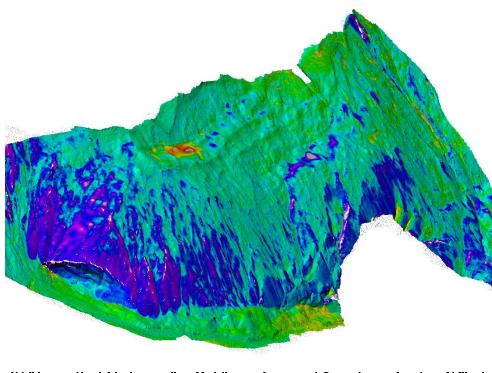
Der Hintereisferner, einer der größten Gletscher Tirols, liegt im Rofental oberhalb von Vent und kann in die Kategorie der Talgletscher eingeordnet werden. Er erstreckt sich von der 3739 m hohen Weißkugel zunächst nach Osten und weiter Richtung Nordosten ins Rofental. Auf der orografisch rechten Seite des Tals hat sich im Laufe der Zeit ein Toteiskörper gebildet. Da der gesamte Bereich nicht mit einem einzigen Scan abgedeckt werden konnte, wurden vier Aufstellpunkte gewählt. Bis zu 14, sich teilweise überlappende Einzelscans wurden während einer Messkampagne ausgeführt und nachträglich in einem Referenzsystem zusammengefügt (Abbildung 3).

Abbildung 3: Übersicht über das vermessene Gebiet. Die Karte wurde als Hillshade erzeugt. Zugrunde liegen Airborne Laserscan Daten einer Befliegung vom 07.06.2008 im Rahmen des ALS X Projekts.

Acknowledgment: Die Feldarbeiten sind Teil der Diplomarbeit und wurden im Rahmen des ALS X (Combination and Evaluation of Airborne Laser Scanning Data and TerraSAR-X Data for Glacier and Snow Monitoring) Projekts der FFG unterstützt.

Methodik & Resultate

Mit der Software PolyWorks (InnovMetric) wurde ein georeferenziertes TIN (Triangulated Irregular Network) Modell des gescannten Bereiches erstellt (Abbildung 4). Die georeferenzierten Modelle können miteinander verglichen werden. Die Höhenänderung, die sich im Laufe der 23 Tage (Zeitspanne zwischen den Messkampagnen) ergeben haben, können grafisch dargestellt werden (Abbildung 5).



Im Toteisbereich liegen die Abschmelzraten, je nach Exposition und Dicke der Schuttbedeckung, im Bereich von 10 bis 90 cm. Zum Vergleich dazu: Die Volumenänderung auf der Gletscherzunge beträgt im gleichen Zeitraum ca. 120 cm.

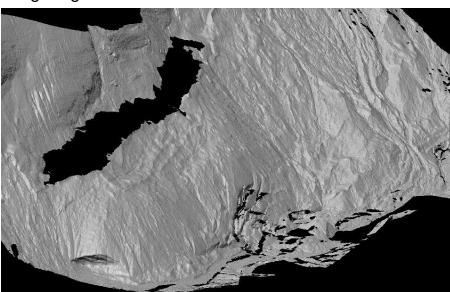


Abbildung A.4: Laserscanmessungen zur Bestimmung der Ablation im schuttbedeckten Teil des Hintereisferner. Deutscher Geographentag 2009 Kongress für Wissenschaft, Schule und Praxis. 2009, 24.09.2009, Wien, Österreich.

Literaturverzeichnis

- Abo Akel, N., O. Zilberstein, und Y. Doytsher, 2003: Automatic dtm extraction from dense raw lidar data in urban areas. *Ecole National de Sciences Géographiques (ENSG) and IGN*.
- Ackermann, F., 1999: Airborne laser scanning – present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing.*, **54**, 64 – 67.
- Albertz, J., 2007: *Einführung in die Fernerkundung - Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft; Auflage: 3., überarbeitete und erweiterte Auflage.
- Avian, M., und A. Bauer, 2006: First results on monitoring glacier dynamics with the aid of terrestrial laser scanning on pasterze glacier (höhe tauern, austria). *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung.*, **Band 41**, 27 – 36.
- Conforti, D., P. Deline, G. Mortara, und A. Tamburini, 2005: Terrestrial scanning lidar technology applied to study the evolution of the ice-contact miage lake (mont blanc, italy).
- de Lange, N., 2002: *Geoinformatik in Theorie und Praxis*. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K.
- Dieter, H., 1996: *Fehlverhalten von GPS-Satellitenempfängern im Hinblick auf ihren Einsatz im Forschungsprojekt SynUTC*. Ph. D. thesis, Technische Universität Wien, Institut für Automation.
- El-Rabbany, A., 2002: *Introduction to GPS - The Global Positioning System*. ARTECH HOUSE, INC. 685 Canton Street Norwood, MA 02062.
- Favey, E., A. Geiger, G. Hilmar Gudmundsson, und A. Wehr, 1999: Evaluating the potential of an airborne laser-scanning system for measuring volume changes of glaciers. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, Vol. 81, No. 4, Methods of Mass Balance Measurements and Modelling, pp. 555-561.
- Geist, T., 2005: *Application of airborne laser scanner technology in glacier research*. Ph. D. thesis, University of Innsbruck.
- Geist, T., E. Lutz, und J. Stötter, 2003: airborne laser scanning technology and its potential for applications in glaciology. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **Vol. 34-3/W13**, 101 – 106.
- Geist, T., und J. Stötter, 2007: Documentation of glacier surface elevation change with multi-temporal airborne laser scanner data – case study: Hintereisferner and kesselwandferner, tyrol, austria. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie.*, **41**, 77 – 106.

- Google Earth, I., 2009: Google earth.
- Grenfell, T.C., S.G. Warren, und P.C. Mullen, 1994: Reflection of solar radiation by the antarctic snow surface at ultraviolet, visible, and nearinfrared wavelengths. *Journal of Geophysical Research.*, **99(D9)**, 18669 – 18684.
- Greuell, W., und J. Oerlemans, 2004: Narrowband-to-broadband albedo conversion for glacier ice and snow: equations based on modeling and ranges of validity of the equations. *Remote Sensing of Environment.*, **Volume 89, Issue 1**, 95 – 105.
- Haring, A., 2003: Modellierung terrestrischer laserscanner-daten, institut für photogrammetrie und fernerkundung. Master's thesis, Technische Universität Wien.
- Johan P. M., H., und P. Petri, 2007: Semi-automatic glacier delineation from landsat imagery over hintereisferner in the austrian alps. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **41**, 55 – 75.
- Kahmen, H., 2006: *Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde*. Walter de Gruyter GmbH & Co. KG,10785 Berlin.
- Kennett, M., und T. Eiken, 1997: Airborne measurement of glacier surface elevation by scanning laser altimeter. *Annals of Glaciology*, vol.24, pp.293-296.
- Kern, F., 2003: *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Ph. D. thesis, Geodätische Schriftenreihe der Technische Universität Braunschweig, Heft 19.
- Kirkbride, M.P., und C.R. Warren, 1999: Tasman glacier, new zealand: 20th-century thinning and predicted calving retreat. *Global and Planetary Change*, **22**, 11 – 28.
- Kodde, M., 2006: Airborne laser scanning for monitoring glaciers and crevasses. Master's thesis, Optical and Laser Remote Sensing. Department of Earth Observation and Space Systems (DEOS). Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology.
- Kraus, H., 1966: Freie und bedeckte ablation. ergebnisse des forschungsunternehmens nepal himalaya.
- Kraus, H., 2004a: *Die Atmosphäre der Erde: Eine Einführung in die Meteorologie*. Springer, Berlin; Auflage: 3., erweiterte und aktualisierte Auflage.
- Kraus, K., 2004b: *Photogrammetrie, Band1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. Walter de Gruyter GmbH & Co. KG,10785 Berlin.
- Kuhn, M., 2005: Gletscher im klimawandel. *Fachbeiträge des Oesterreichischen Alpenvereins.*, **27**, 35 – 40.
- Kuhn, M., und A. Lambrecht, 2007: Hydrologischer atlas Österreichs. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Landesamt für Vermessung und Geoinformation, T., 2007: Europäisches terrestrisches referenz-system 1989.
- Ludwig, S., 2009: Erfassung, berechnung und darstellung der veränderungen am toteisbereich des hintereisfners mittels terrestrischem laserscanning. Master's thesis, Hochschule München, Fakultät für Geoinformation.

- Martin, C., und M. Eiblmaier, 2002: *Lexikon der Geowissenschaften*. Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg Berlin.
- Nicholson, N., und D. Benn, 2006: Calculating ice melt beneath a debris layer using meteorological data. *Journal of glaciology*, **52**, 463 – 470.
- Niederwald, T., 2008: Festpunktbestimmung mit gps für gletscher – monitoring – projekte in den Ötztaler alpen (tirol). Master's thesis, Hochschule München, Fakultät für Geoinformation.
- Olefs, M., 2009: *Intentionally modified mass balance of snow and ice*. Ph. D. thesis, Institute of Meteorology and Geophysics. Leopold Franzens Universität Innsbruck.
- Oppikofer, T., M. Jaboyedoff, L. Blikra, M. Derron, und R. Metzger, 2009: Characterization and monitoring of the aknes rockslide using terrestrial laser scanning. *Natural Hazards and Earth System Sciences.*, **9**, 1003 – 1019.
- Optech, 2008: Iiris brochure.
- Pinde, F., und M.R. Paul, 2004: Design and implementation of the solar analyst: an arcview extension for modeling solar radiation at landscape scales. *Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference, San Diego USA.*, **1**, 1 – 53.
- Rich, P., R. Dubayah, W. Hetrick, und S. Saving, 1994: Using viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers.*, 524 – 529.
- Schlueter, W., und P. Pesec, 1982: Mathematisches modell zur auswertung von dopplermessungen. *DGK B 260*, **2**, 37 – 54.
- Seeber, G., 2003: *Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications*, Volume 2nd completely revised and extended edition. Walter de Gruyter GmbH & Co. KG,10785 Berlin.
- Skogsberg, K., und A. Lundberg, 2005: Wood chips for thermal insulation of snow. *Cold Regions Science and Technology.*, **43**, 207 – 218.
- Topscan, F., 2008: Projektbericht zu der laserscannermessung am hintereisferner (Österreich) befliegung september 2008. Manual Topscan. im Auftrag des Instituts für Geographie der Universität Innsbruck.
- Troll, C., 1942: Büsserschnee in den hochgebirgen der erde. *Petermanns geogr. Mitt., Erg.*, **Heft 240**, 103.
- Wagner, W., A. Ullrich, und C. Briese, 2003: Der laserstrahl und seine interaktion mit der erdoberfläche. *Osterreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation.*, **VGI 4/2003**, 223 – 235.
- Warren, S.G., und R.D. Brandt, R. E.and Boime, 1993: Blue ice and green ice. *Antarctic Journal of the United States.*, **28(5)**, 255 – 256.
- Wilhelm, F., 1974: *Schnee- und Gletscheruknde*. Walter de Gruyter GmbH & Co. KG,10785 Berlin.
- Zeng, Q., M. Cao, X. Feng, X. Liang, F.and Chen, und W. Sheng, 1984: A study of spectral reflection characteristics for snow, ice and water in the north of china. *Hydrological applications of remote sensing and remote data transmission Wallingford, Oxfordshire: IAHS Publication.*, **145**, 451– 462.

Zogg, J.M., 2009: GPS und GNSS: Grundlagen der Ortung und Navigation mit Satelliten. online.

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
ALS	Airborne Laserscanning
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
cm	Zentimeter
DHM	digitales Höhenmodell
DOM	digitales Oberflächenmodell
ETRS-89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989
GIS	Geographische Informationssysteme
GPS	Global Positioning System
HEF	Hintereisferner
IMGI	Institute of Meteorology and Geophysics Innsbruck
kJ	Kilojoule
m	Meter
M28	Gauß Krüger Koordinaten für Westösterreich
MHz	Megahertz
ms	Millisekunden
nm	Nanometer
ns	Nanosekunden
RTK	real time kinematik
TLS	Terrestrisches Laserscanning
UTM	Universal Transverse Mercator

Abbildungsverzeichnis

1.1	Rückzug des Hintereisferner seit seiner maximalen Ausdehnung um 1850. Die jeweiligen Gletscherstände sind mit Jahreszahlen versehen. Kartenquelle (Kuhn und Lambrecht, 2007) Hydrologischer Atlas Österreich.	2
1.2	Lage des Untersuchungsgebiets in Österreich. Ausschnitt der Ötztaler Alpen samt Hintereisferner (HEF) und Toteisbereich. Kartenquelle (Johan P. M. und Petri, 2007).	3
1.3	Panoramaaufnahme des Toteiskörpers im Zungenbereich des Hintereisferner.	3
1.4	Zusammenhang zwischen der Mächtigkeit der Schuttauflage und der Ablationsrate. Links: Kurve aus (Kirkbride und Warren, 1999). Rechts: Kurve aus (Nicholson und Benn, 2006).	5
1.5	Ablationskegel an der Zunge des HEF.	5
2.1	Das ETRS89, ein dreidimensionales, geozentrisch-kartesisches Koordinatensystem (Landesamt für Vermessung und Geoinformation, 2007).	8
2.2	Vereinfachtes Blockdiagramm eines Laserscanners (Wagner et al., 2003). . .	8
2.3	Schematische Beschreibung der Komponenten eines ALS Systems (Abo Akel et al., 2003).	9
2.4	Flugstreifenübersicht der Befliegung im Bereich des Gletschers Hintereisferner, September 2008 (Topscan, 2008).	10
2.5	Mehrfachecho beim ALS. Die Diagramme zeigen die ausgesendete und die empfangene Leistung (Kodde, 2006).	11
2.6	Karte der verfügbaren GPS Referenzstationen. Kartenquelle: (Google Earth, 2009).	12
2.7	Prinzip eines TLS mit Impulslaufzeitmessung.	14
2.8	Scanprinzip des ILRIS-3D (Ludwig, 2009).	15
2.9	Der ILRIS-3D mit Rotations- und Kippbasis (Optech, 2008).	16
2.10	Verschiedene Arten der Reflexion an einer Oberfläche. Links: spiegelnde Reflexion, Mitte: diffuse Reflexion, Rechts: gemischte Reflexion. Abbildung aus (Albertz, 2007).	18
2.11	Die durchgezogenen Linien stellen die gemessene spektrale Albedo für Schnee (Grenfell et al., 1994), blaues Eis (Warren und Brandt, 1993), sauberes und dreckiges (Zeng et al., 1984) Gletschereis dar. Abbildung aus (Greuell und Oerlemans, 2004).	19

2.12	Der Schnittpunkt dreier Kugeln bestimmt die Position (Zogg, 2009).	20
2.13	Der Einfluss der Anordnung von Satelliten - (a) günstige Satellitengeometrie; (b) ungünstige Satellitengeometrie (El-Rabbany, 2002).	20
2.14	Mehrwegeeffekt - Das reflektierte Signal legt eine längere Strecke zurück (El-Rabbany, 2002).	21
2.15	Wellenausbreitung zweier Frequenzen (Kahmen, 2006).	22
2.16	Verwendung von Referenzstation und Rover für die Real Time Kinematik DGPS-Messung am HEF.	23
2.17	Prinzip des Real-Time-Kinematik-Verfahrens (Niederwald, 2008).	23
2.18	Panoramafoto vom 18.08.2008 des schuttbedeckten Toteisbereichs der vermessen wurde. Im hellen Bereich ist rechts das alte Gletschertor zu erkennen, welches den nördlichen Rand des Toteisbereichs darstellt. Ebenfalls in der Mitte, gut zu erkennen, der spaltige Bruch. Im unteren, dunklen Bereich ist der erste Standpunkt sichtbar.	24
2.19	Zustieg zum Vermessungsgebiet. Von den Rofenhöfen über das Hochjoch Hospiz zum Toteisbereich	25
2.20	Passkugel \varnothing 20 cm auf Prismenstab, gestützt durch Spinne.	26
2.21	Übersicht über das vermessene Gebiet. Die Karte wurde mit ArcGIS als Hillshade erzeugt. (Kartengrundlage: ALS Daten einer Befliegung vom 07.08.2008.) Gauß-Krüger-Koordinatensystem.	27
3.1	Messaufbau einer DGPS Referenzstation (Niederwald, 2008).	30
3.2	Netzbild der Passkugelkoordinaten vom 18.08.2009.	31
3.3	Netzbild der Passkugelkoordinaten vom 09.09.2009.	32
3.4	a) Die Benutzeroberfläche des ILRIS Parsers am Beispiel einer Passkugelaufnahme. Der rot umrandete Bereich wurde gescannt und mit der Software in einem scannereigenen Koordinatensystem ausgegeben. b) Punktwolke des Scans, dargestellt mit der Software PolyWorks.	34
3.5	Die PolyWorks Module nach Prozessen und Art des Interface klassifiziert. .	35
3.6	Die einzelnen Aufnahmen sind mit verschiedenen Farben dargestellt. Die großflächigen Scans wurden mit einer Auflösung von ca. 5 cm durchgeführt, während bei den Passkugelscans eine Auflösung von 2 mm angestrebt wurde.	36
3.7	Hier werden die Intensitäten der Punkte zusätzlich mit einer Grauwertskala (0 bis 255) angezeigt.	37
3.8	Fehler in einer Punktwolke. Versatz von 1,7 m.	38
3.9	Erstellen einer Kugel aus einem hochaufgelösten Passpunktscan.	38
3.10	Ausführung der Koordinatentranslation mit dem Befehl <i>Ausrichtung N Mittenpunkte</i>	39
3.11	Analyse des Fehlers zwischen den einzelnen Teilsans eines TLS Standpunkts. Die Einheit der Farbskala ist m.	41
3.12	Der Laserstrahl trifft auf eine geneigte Oberfläche und hinterlässt einen ellipsenförmigen footprint (Kern, 2003).	41

3.13	Analyse des Fehlers zwischen den einzelnen Teilsticks eines TLS Standpunkts, nach Verwendung des Alignement Makro. Die Einheit der Farbskala ist Meter.	42
3.14	Zustand des Überlappungsbereich der Drahtmodelloberfläche vor und nach dem Ausführen der Überlappungsreduktion.	43
3.15	Gesamtübersicht aller vermaschten Teilsticks der Septembermesskampagne.	44
3.16	Ausrichtung der Modelle anhand von Punktepaaren. Blaues Modell: 18. September, grünes Modell: 10. August. Durch Auswählen von charakteristischen Punkten im Felsbereich werden die Oberflächen aneinander angeschmiegt.	45
3.17	Fehlerdarstellung der angeschmiegten Oberflächen beider Modelle.	46
3.18	Gouraudmodell der gesamten Szene.	47
3.19	Gouraudmodell der gesamten Szene nach der Bearbeitung mit dem Modul IMEdit.	48
3.20	Hillshade erzeugt mit ArcMap aus dem DHM der Laserscanbefliegung vom 07.08.2008.	49
3.21	Globale Sonneneinstrahlung und Sonnenscheindauer berechnet mit dem Area Solar Radiation Tool für den 07.08.2008.	50
4.1	Hangneigung im Untersuchungsgebiet. Der Toteisbereich wird im unteren Bereich vom Gletscherbach und oben von der steilen Flanke begrenzt (Kartengrundlage: ALS Daten einer Befliegung vom 09.09.2008).	51
4.2	Exposition im Untersuchungsgebiet (Kartengrundlage: ALS Daten einer Befliegung vom 09.09.2008).	52
4.3	Sonnenscheindauer in Stunden, aufsummiert über einen Zeitraum von 23 Tagen (Kartengrundlage: ALS Daten einer Befliegung vom 09.09.2008).	53
4.4	Globalstrahlung in Wh/m ² , aufsummiert über einen Zeitraum von 23 Tagen (Kartengrundlage: ALS Daten einer Befliegung vom 09.09.2008).	53
4.5	Vergleich der Polygonmodelle vom 18.08.2008 und dem vom 10.09.2008. Die Einheit der Farbskala ist Meter.	55
4.6	Die reflektierte Intensität wird in einer Grauwertskala (0-255) dargestellt. a) Messung vom 18.08.2008 b) Messung vom 10.09.2008	55
4.7	Alle rot markierten Punkte werden zum Vergleich herangezogen. a) manuell markierter Bereich einer schuttbedeckten Fläche. b) manuell markierter Bereich einer blanken Fläche. c) Markierung mit einem Grauwertfilter, alle Punkte deren Intensität größer 135 ist. d) Markierung mit einem Grauwertfilter, alle Punkte deren Intensität geringer als 35 ist. e) manuell markierter Bereich, Toteis. f) manuell markierter Bereich der abgelagerten Sedimente.	56
4.8	Dickenänderung der rot markierten Bereiche des Toteiskörpers.	57
4.9	Ablationsverlauf am Pegel 19. TLS erste Messkampagne am 18.08.2008, zweite Messkampagne am 10.09.2008. Die ALS Befliegungen fanden am 07.08.2008 bzw am 09.09.2008 statt.	58

4.10 Alle rot markierten Punkte wurden zum Vergleich herangezogen.	59
4.11 Dickenänderung am Toteiskörper der rot markierten Bereiche des Toteiskörpers, bereits auf 23 Tage interpoliert.	60
4.12 Das Modell vom 18.08.2008 (orange) wird als Punktwolke, das Modell vom 10.09.2008 (grau) wird als Gouradmodel dargestellt. Die Abstandsmessung sind als farbige Pfeile erkennbar.	61
4.13 Vergleich der Dickenänderung in den Bereichen Gletscherzunge, Toteis und Sedimente für eine Periode von 23 Tagen . Gefüllte Balken sind Werte der ALS Messungen; Strichlierte Balken sind Werte der TLS Messungen.	61
A.1 1898 reichte die Zunge des Hintereisferrers beinahe noch bis zum jetzigen Hochjoch Hospiz. Im Laufe der Jahre ist der stetige Rückzug und die Abtrennung des Kesselwandferrers zu sehen. Fotos: IMGI	66
A.2 Der Toteiskomplex an der Zunge des Hintereisferrner. 2001 bis 2006 Fotos: IMGI	67
A.3 Der Toteiskomplex an der Zunge des Hintereisferrner. Panoramafotos der letzten Jahre. Fotos: IMGI	68
A.4 Laserscanmessungen zur Bestimmung der Ablation im schuttbedeckten Teil des Hintereisferrner. Deutscher Geographentag 2009 Kongress für Wissenschaft, Schule und Praxis. 2009, 24.09.2009, Wien, Österreich.	70

Tabellenverzeichnis

2.1	Die wichtigsten Parameter des ALTM 3100.	11
2.2	Die wichtigsten Parameter des ILRIS-3D. *Herstellerangabe - unter Testbedingungen (Optech, 2008).	16
2.3	typischer RMS-Fehler der Fehlerursachen bei GPS Messungen(Zogg, 2009) . .	22
2.4	Messausrüstung für die beiden Messkampagnen am Hintereisferner.	24
3.1	Koordinaten der Kugeln im System ETRS 89 UTM Abbildung mit ellipsoidischen Höhen und Adriaöhnen der Augustmessung.* Die Koordinaten der Kugel kk1 konnten aus der Messung vom 18.08.2008 nicht bestimmt werden, sie sind aus der Messung vom 09.09.2008	31
3.2	Koordinaten der Kugeln im System ETRS 89 UTM Abbildung mit ellipsoidischen Höhen und Adriaöhnen der Septembermessung.	32
3.3	Auszug aus dem Inhalt der Log-Datei, die der ILRIS Parser zu jedem Scan erstellt.	33
3.4	Protokoll der Koordinatentransformation mit IMInspect automatisch erstellt. .	39
3.5	Protokoll der Ausrichtung der Teilstans mit dem Alignment Makro. Die Spalte maximale Distanz bezieht sich auf den Umkreis in dem mit dem Best-Fit Algorithmus nach redundanten Informationen gesucht wird.	43
4.1	potentiell schmelzbares Eis durch den Einfluss der Globalstrahlung unter Berücksichtigung der Albedo.	54
4.2	Vergleichsergebnisse für den gesamten Toteisbereich, der in Abbildung 4.7 e) rot markiert ist.	57
4.3	Vergleichsergebnisse für den gesamten Toteisbereich, erstellt aus den ALS Daten vom 07.08.2008 und 09.09.2008.	59
A.1	Volumensänderung für die Gletscherzunge. Vergleich von TLS und ALS Daten. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden die ALS-Werte auf 23 Tage interpoliert.	69

Danksagung

Einen ganz besonderen Dank möchte ich meinen Eltern Rudolf und Melitta aussprechen. Ohne Euch wäre ich nicht hier, wo ich jetzt stehe. Ihr habt mir diese Ausbildung ermöglicht. Durch Eure positive und aufmunternde Art habt ihr mir geholfen, die kleinen und großen Hürden des Lebens zu meistern. Durch Euch habe ich gelernt, wie wichtig es ist, Stärke zu besitzen, Werte zu bewahren und jeden Menschen mit Respekt zu behandeln. Ihr habt mich stets frei leben und meinen eigenen Weg gehen lassen. Ich danke euch von ganzem Herzen für Euer Vertrauen in mich, Euren Glauben an mich sowie für Eure grenzenlose Liebe. Ihr macht das aus, was ich heute bin.

Ein aufrichtiger Dank gilt meiner Freundin Marita, die mir motivierend zur Seite stand. Danke für die Zeit, die Du für mich investiert hast, um meine Arbeit auf Fehler zu korrigieren. Weiters möchte ich meiner Betreuerin Dr. Andrea Fischer, Dipl. Geograph Kristóf Kovács, Dr. Rudolf Sailer, Professor Gerd Merkel, Mag. Michael Vetter und Mag. Jakob Abermann danken. Durch Ihre Ratschläge und Hilfestellungen war es mir erst möglich, diese Arbeit zu schreiben.

Ich bedanke mich bei der Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) Österreich für die Finanzierung der Gletschermesskampagnen und für die Laserdaten aus dem Projekt ALS-X SAR.

Und nicht zuletzt, Dankeschön an die Gletscherknechte und Kommilitonen Dr. Heralt Schneider, Dr. Marc Olefs, Bernd Seiser, Martin Stocker-Waldhuber, Kay Helfricht, Norbert Span, Svea List, Martina Brunner, Sebastian Weide, Sebastian Ludwig und Thomas Niederwald.

DANKE

Curriculum Vitae

PERSONALIEN:

Name: Martin Juen
Geburtsdatum: 23. März 1980
Eltern: Melitta Maria Juen, geb. Wolf
Rudolf Juen

BILDUNG UND BERUFSERFAHRUNG:

1998–1999 Volksschule Flirsch am Arlberg - Flirsch, Tirol
1990–1994 Bundesrealgymnasium Landeck - Landeck, Perjen, Tirol
1994–1999 Höhere Technische Lehranstalt für Tiefbau Innsbruck - Innsbruck, Tirol
1999–2000 Zivildienst Rotes Kreuz (Bezirksstelle Landeck) – Zams, Tirol
2000–2001 Abel Kommunikationstechnik - Zirl, Tirol
2001–2002 ProCad - Innsbruck, Tirol
2002–2004 Architekturbüro Falch – Landeck, Tirol
2004–2010 Diplomstudium Meteorologie und Geophysik – Innsbruck, Tirol

TEILNAHME AN WISSENSCHAFTLICHEN TAGUNGEN:

Optech's 4th International Terrestrial Laser Scanning User Meeting "Measuring New Horizons". 04.05.2008 - 05.05.2008 Munich, Germany.

Deutscher Geographentag 2009 Kongress für Wissenschaft, Schule und Praxis. 24.09.2009, Wien, Österreich.

POSTERPRÄSENTATIONEN:

Laserscanmessungen zur Bestimmung der Ablation im schuttbedeckten Teil des Hintereisferrner. Deutscher Geographentag 2009 Kongress für Wissenschaft, Schule und Praxis. 2009, 24.09.2009, Wien, Österreich.