



Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Alpine Naturgefahren
Studiengang Wildbach- und Lawinenverbauung



Masterarbeit

Vergleich von terrestrischem Laser Scanning und der photogrammetrischen „Structure from motion“ als Monitoringmethode für Gletscher am Beispiel der Pasterze

erstellt von

Zangerle David, BSc.

Matrikelnummer: 01040886

Studienkennzahl: 066 477

Währingerstraße 154/6

1180 Wien

Tel.Nr.: 0699/17343398

david.zangerle@boku.students.ac.at

Betreuer: Dr. Martin Mergili, Dr. Alexander Prokop

Danksagung:

An dieser Stelle möchte ich mich bedanken. Bei meinen beiden Betreuern Martin Mergili und Alexander Prokop. Für die Ratschläge und Nachsicht, für die stete Hilfestellung und wissenschaftlichen Input. Danke! Im Besonderen auch für die unbeschreibliche Zeit in Svalbard, für die Unterkunft und die Möglichkeit einen Einblick in die Welt jenseits des Polarkreises zu erhalten. Danke! Es hat mir in einer nachdenklichen Zeit die Möglichkeit gegeben mich mit dieser Arbeit zu beschäftigen und gleichzeitig die atemberaubende Landschaft aufzusaugen. Ein herzliches Vergeltsgott an das gesamte Geologieinstitut-Team. Bei etwaigen softwaretechnischen, motivationstechnischen oder inspirations-technischen Problemen wurde mir von jeder Seite an die ich mich gewandt habe äußerst hilfsbereit Geholfen. Vielen Dank!

Danke auch an meine lieben Eltern Bernadette und Peter, natürlich für die finanzielle Unterstützung, aber auch für die Geduld und die seelische Unterstützung während meiner Studienzeit. Vielen Dank auch an meine überaus intelligente Schwester die mir mit Rat und Tat zur Seite stand und steht. Außerdem möchte ich mich bei meinen Freunden Benni und Tom bedanken, die mich, auch wenn nicht auf den ersten Blick ersichtlich, mit Sicherheit, Gesprächen und Bier versorgt haben wann immer NotamMann war.

Anstatt Liebe, Berühmtheit oder Geld oder Vertrauen oder Fairness... gebt mir Wahrheit. (Henry David Thoreau)

Abstract/Zusammenfassung:

Keywords: Höhenmodell/digital elevation model, Laserscan/laserscan, Pasterze, Structure from motion, Gletschermessung/glacier monitoring,

Zusammenfassung:

Da die Messung der genauen Veränderung von Gletschern mit diversen Schwierigkeiten behaftet ist, wurde eine Reihe von Methoden entwickelt um Änderungen von Gletschern festzustellen – derzeit sind computergestützte Verfahren als state-of-the-art zu bezeichnen. In dieser Arbeit wird auf zwei computergestützte Verfahren, auf SFM-Verfahren und Laserscanning, bezüglich ihrer Praktikabilität für Gletschermonitoring eingegangen. Grundsätzlich werden mit beiden Methoden Höhenmodelle von der Pasterze, Österreichs größtem Gletscher, erstellt, welche in weiterer Folge verglichen werden. Einerseits werden die DEM's mit einem terrestrischem Laserscangerät, andererseits mit einer SFM-Technik, welche ursprünglich in der Archäologie entwickelt wurde, erstellt. Daraus wird eine Monitoringmöglichkeit abgeleitet werden, um Gletscher kostengünstig und langfristig beobachten zu können. Außerdem wird der Rückgang der Dicke der Pasterze seit 2015 berechnet werden. Dadurch wird das derzeitige Monitoring der Pasterze weitergeführt und geupdated.

Abstract:

During the process of assessing the change in a glacier body scientifically, a range of challenges occur. Therefore, different methods have been developed throughout the history of Glaciology. However, computer based methods are being considered as “state-of-the-art” nowadays. This thesis compares two state of the art methods to create DEM's, the SFM-method and laser scanning. Both methods are a viable way to monitor a glacier. One goal of this thesis is to generate DEM's with high quality and high resolution of the Pasterze, Austria's biggest glacier. Furthermore, the comparison of these two methods has created a possibility, to monitor glaciers in a long term and economical reasonable way. On top of that the decline of the Pasterze since 2015 had been computed, which means the present monitoring has been continued.

Inhaltsverzeichnis:

Inhaltsverzeichnis:	5
Abbildungsverzeichnis:	6
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungen:.....	9
1. Einleitung	10
1.1 Einführung.....	10
1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung	12
1.3 Aufbau der Arbeit	13
2. Forschungsstand	13
2.1 Gletscher	16
2.2 Massenbilanzen von Gletschern.....	20
2.2.1 Die glaziologische/traditionelle Methode	20
2.2.2 Die geodätische Methode.....	21
2.3 Photogrammetrische Structure-from-motion Methode	23
2.4 Laserscan.....	24
2.5 GPS vs. DGPS.....	25
2.6 Hydrologie von Gletschern in sozialem Kontext.....	26
3 Untersuchungsgebiet „Die Pasterze“	28
3.1 Geschichte der Gletschermessungen an der Pasterze	28
3.2 Das Gebiet um die Pasterze „Hohe Tauern Region“	31
4 Material und Methode	33
4.1 Arbeitsablauf.....	33
4.2 Geländearbeit und Datenaufnahme	35
4.3 Bearbeitung der LiDAR-Punktwolken	37
4.4 Photogrammetrische Auswertung der terrestrischen Fotos.....	38
4.5 Vergleich von LiDAR- und photogrammetrischem DEM.....	42
5. Ergebnisse	45
5.1 Ergebnisse Structure from Motion	46
5.2 Ergebnisse aus RiscScan.....	51
5.3 Update zu Abbildung 2 Langzeitreihe	55
6. Diskussion	58
7. Conclusio.....	70
8. Literatur	72
9. Anhang.....	75

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Darstellung der Kryosphären-Elemente, deren relevantesten Charakteristiken sowie die bei einem Klimawandel betroffenen Aspekte (oben). Schema zur Veranschaulichung der komplexen Zusammenhänge zwischen Mensch, Natur und Lebensraum, insbesondere in Zusammenhang mit den durch den Klimawandel in Hochgebirge zu erwartenden Veränderungen (unten). (Haerberli 2007)

Abbildung 2: Veränderung der Pasterze seit 1969 laut ZAMG.

Abbildung 3: Arbeitsweise des TLS (Prokop 2008).

Abbildung 4: Schematische Übersicht der Wasserbewegungen am und im Gletscherkörper.

Abbildung 5: Die Pasterze im Jahr 2012.

Abbildung 6: Längenänderung der Pasterze nach Oerlemans 1997.

Abbildung 7: Überblick der HohenTauern Region nach «Glacial Monitoring».

Abbildung 8: Flussdiagramm als Überblick der Vorgangsweise.

Abbildung 9: Gehrouten und DGPS-Punkte.

Abbildung 10: Laserscandaten des Scanners VZ-6000.

Abbildung 11: Darstellung der Verkippung des Laserscans.

Abbildung 12: Darstellung der „sparse point cloud“ bereits mit DGPS-Punkten in Agisoft.

Abbildung 13: Darstellung der „dense point cloud“ in Agisoft.

Abbildung 14: Darstellung der Verortung von DGPS Punkten manuell und der Maske.

Abbildung 15: Darstellung einer Punktwolke mit dem Tool „Ascii 3D to Feature Class“.

Abbildung 16: Darstellung eines DEM's erstellt aus der Punktwolke mit Natural Neighbour.

Abbildung 17: Darstellung der 5DGPS-Punktwolke in ArcGIS aus der Agisoft-Software.

Abbildung 18: Darstellung des 15DGPS-DEM's erstellt aus der Punktwolke in ArcGIS.

Abbildung 19: Darstellung der Fehler aus einem DEM.

Abbildung 20: Hillshade aus DEM von Agisoft im ArcGIS erstellt.

Abbildung 21: 15P DEM's „Minus“ gerechnet mit Legende.

Abbildung 22: DEM aus dem Laserscan mit der Punktwolke 40% transparent.

Abbildung 23: Hillshade erstellt in ArcGIS aus dem Laserscan.

Abbildung 24: DEM 25P aus SFM „minus“ DEM aus dem Laserscan.

Abbildung 25: Darstellung der Standardabweichung der Abbildung 24 mittels Histogramm.

Abbildung 26: Veränderung der Eisdicke seit 2015.

Abbildung 27: Rückgang der Pasterze seit 2015 (Hynek)

Abbildung 28: Darstellung des ehemals unterirdischen Abflusses auf der Pasterze (googlemaps abgerufen am 26.10.2018, <https://www.google.com/maps/@47.0894266,12.7195126,4498m/data=!3m1!1e3>)

Abbildung 29: Darstellung der DGPS-Punkte mit Fehlerangabe in AgisoftPhotoscan.

Abbildung 30: Darstellung der Divergenz zwischen Laserscan und Agisoftwolke.

Abbildung 31: Ideale Scanpositionen für den Scanner VZ-6000.

Abbildung 32: Blick von oben auf die Pasterze 2015.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Veränderungen von Länge, Fläche und Volumen der Pasterze seit dem Hochstand von 1850 bis 2012. Datengrundlagen: a = Wakonigg und Lieb (1996); b = Lieb und Slupetzky (2004); c = Lieb und Slupetzky (2011); d = Kuhn und Fischer (2012); e = Kaufmann et al. (2015); f = bisher unpubl. Daten der Autoren. Das Volumen wurde nur für 1998 exakt bestimmt (d).

Tabelle 2: GCP's in Zusammenhang mit Abweichung in cm..

Tabelle 3: Auflistung der Kosten (SFM vs. Laserscan)

Abkürzungen:

ALS	Airborne Laserscanner
DEMs	digital elevation modell
DGPS	differentielles globales Positionierungssystem
GCP	ground control points
GIS	Geoinformationssystem
GLIMS	Global Land Ice Measurements from Space initiative
GPS	globales Positionierungssystem
GTN-G	Global Terrestrial Network for Glaciers
NSIDC	National Snow and Ice Data Center
SFM	Structure from Motion
TLS	terrestrischen Laserscan
UAV's	unmanned aircraft vehicel
WGMS	world glacier monitoring service
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

1. Einleitung

Das einleitende Kapitel soll die grundlegende Thematik erläutern und hin zur Problemstellung führen mit welcher sich diese Arbeit beschäftigt.

1.1 Einführung

Mittlerweile gibt es, mit Ausnahme von den verbliebenen Gletschern, keine vergletscherten Gebiete mehr in Mitteleuropa. Die mitteleuropäische Landschaft ist jedoch maßgeblich von Gletschern geformt, die hohe Diversität der mitteleuropäischen Topografie ist mitunter auf das ehemalige Eis zurückzuführen. Die Erdoberfläche wird vom Zustand der Atmosphäre, also dem Wetter, geformt und die Erdoberfläche hat wiederum Einfluss auf den Lebensraum des Menschen. (Fraedrich 2016) Da sich, wie bereits besprochen, die Erdoberfläche jedoch stetig durch das Klima und das Wetter verändert, muss sich der Lebensraum des Menschen ebenfalls ändern. Mit dieser Arbeit soll ein Beitrag zum Monitoring von Gletschern durchgeführt werden, um die Vergangenheit der Landschaftsentwicklung besser zu verstehen und einen Blick in die Zukunft der Landschaftsentwicklung werfen zu können.

Wer hat Interesse an einem langfristigen Monitoring von Gletschern? Ab der Mitte des 19. Jahrhunderts gab es einen Rückgang der Gletscher, welcher allgemeine Aufmerksamkeit erregte, und führte zu systematischen Gletscherbeobachtungen (Patzelt 1970). Eine Veränderung der Umwelt erregt Aufmerksamkeit und Forscher haben Interessen an der Art und an den Ursachen der Veränderung. Um die Art der Veränderung festzustellen wurden nun Methoden entwickelt, welche möglichst kostengünstig und gleichzeitig effizient sind. Dieser grundsätzliche Gedanke ist bis heute unverändert. Was verändert wurde, ist die Art der Gletschermessung, da vor allen Dingen damals die Längenänderung des Gletschers von Interesse war. Die ursprüngliche Vorgangsweise beschränkte sich darauf, den Abstand der Gletscherzunge zu einem fixen Punkt im Gletschervorfeld zu messen. (Kaser 2003) Offensichtlich bleiben bei dieser Methodik vielerlei Faktoren unberücksichtigt, beispielsweise Eisdickenänderung, Änderungen im Nährgebiet oder Kalbvorgänge. Da mittlerweile Wasser zu einem Wirtschaftsfaktor wurde (Söllradl 2012 nach Groiss 2007), als Trinkwasser und Nutzwasser, sind Gletscher als Puffer in Trockenperioden von Bedeutung. (Karpillo 2009) Um Ökosysteme in Takt zu halten und genügend Wasser für Pflanzen, Menschen und Tiere in höchster Qualität zu sichern ist ein Verständnis des Wasserkreislaufs nötig. (Söllradl 2012)

Mittlerweile haben sich die State-of-the-Art Methoden in der Gletschermessung verändert. Die Technologie im Computerbereich verbindet effiziente mit kostengünstigen Methoden um ein Gletschermonitoring durchführen zu können. Das ursprünglich in der Archäologie entwickelte Structure from Motion (SfM) Verfahren bietet die Möglichkeit, ein verhältnismäßig großes Gebiet mit simplen Werkzeugen und schnellen Vorgangsweisen dreidimensional darzustellen. In der Archäologie sind häufig große Ausgrabungen in verschiedenen Stadien der Ausgrabungsarbeit darzustellen. Mit der SfM-Methodik ist dieser Vorgang günstig und rasch durchführbar. In dieser Arbeit soll diese, von der Archäologie entwickelten und auch in der Geomorphologie angewandten Methodik (Fonstad 2011), auf einen Gletscher angewendet werden und daraus ein dreidimensionales Modell erzeugt werden.

Neben der SfM-Methodik kommt in dieser Arbeit noch ein weiteres State-of-the-Art Verfahren zum Einsatz: der Laserscanner. Dieses hochpräzise Gerät tastet das Gelände mit Hilfe von Laserstrahlen ab. Diese Daten aufgenommen vom Laserscanner werden dann am Computer mit einem speziellen Programm weiterverarbeitet und ergeben ebenso ein dreidimensionales Modell. Der Vorteil, dass zwei 3-D Modelle von derselben Struktur vorhanden sind ist, dass diese beiden Modelle miteinander verglichen werden können und dadurch eine Möglichkeit entsteht die Modelle untereinander zu validieren.

Um nun an die Thematik heranzuführen, ist ein Grundverständnis von Gletschern und die Art der Monitoringmethodik notwendig. Grundsätzlich wurde im Laufe der Gletschermonitoringgeschichte Methoden zur Eisdickenmessung und Längenänderung entwickelt und weiterentwickelt. Dass Gletscher keine vollkommen festen Gebilde in der Landschaft sind, sondern die Landschaft formen und selbst ebenfalls in Bewegung sind ist bereits seit Mitte des 19. Jhdt. bekannt. Das langfristige Monitoring der Pasterze beispielsweise gibt es seit 1852 (Fischer 2018). Seit damals wurden mehrere Institutionen installiert, welche sich mit dem Gletscherinventar und den Veränderungen von vergletscherten Gebieten beschäftigen. Die genauen Zusammenhänge die aus den Gletscherveränderung in Bezug auf ökologische, ökonomische und klimatische Aspekte gezogen werden können sind derzeit noch schwer zu erfassen. Die Relevanz der möglichen erhaltenen Informationen wird jedoch noch später in dieser Arbeit besprochen werden.

In dieser Arbeit werden Modelle der Pasterze, der größte Gletscher der Ostalpen und Österreichs, erstellt. Die Pasterze eignet sich sehr gut als Modellobjekt einerseits wegen ihrer sehr langen und ohne nennenswerten Unterbrechungen ihrer Messgeschichte siehe Tabelle 1, an-

dererseits wegen ihrer ausgesprochen guten Lage und Erschließung. Die Pasterze liegt nämlich für die Alpen typisch in einem Tal mit einem höher gelegenen Nährgebiet. Die erstellten Modelle sollen in weiterer Folge verglichen werden und auf Unterschiede geprüft werden. Daraus können Aussagen hinsichtlich ihrer Genauigkeit, ihrer Adäquatheit für diese Art der Verwendung und über generelle Vor- und Nachteile gemacht werden können.

Jahr	1852	1924	1969	1985	1998	2003	2006	2009	2012
Länge (km)	11,4	10,3	9,5	9	8,6	8,4	8,3	8,3	8,1
Fläche (km²)	26,5	22,6	19,8	18,9	18,4	18,1	17,6	17,3	16,6
Volumen (km³)	3,10	2,50	1,80	1,60	1,51	1,40	1,30	1,26	1,16
Datengrundlage	a, b, c	a, b, c	a, b, c	D	e	E	e	e, f	f

Tabelle 1: Veränderungen von Länge, Fläche und Volumen der Pasterze seit dem Hochstand von 1850 bis 2012. Datengrundlagen: a = Wakonigg und Lieb (1996); b = Lieb und Slupetzky (2004); c = Lieb und Slupetzky (2011); d = Kuhn und Fischer (2012); e = Kaufmann et al. (2015); f = bisher unpubl. Daten der Autoren. Das Volumen wurde nur für 1998 exakt bestimmt (d). (übernommen aus Fischer 2018)

Ein Teil der Problematik von langfristigem Monitoring beinhaltet die Entwicklung von unterschiedlichen Methoden. Durch die Verwendung unterschiedlicher Methoden kann es zu Schwankungen der Ergebnisse kommen. Eine Fehlerquelle die konstant weitergeführt wird, ist insofern vernachlässigbar, als dass alle Ergebnisse denselben Fehler aufweisen. Kommt es zu einer Veränderung der Messmethode, wird sich dieser konstante Fehler nicht mehr fortpflanzen. Das hat zur Folge, dass die Ergebnisse nicht mehr vollständig vergleichbar sind. Da die Modelle, welche in dieser Arbeit erstellt werden, nicht mit derselben Methode erstellt wurden, sind die Ergebnisse am Ende dieser Arbeit zu diskutieren.

1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es eine State-of-the-Art Möglichkeit für ein Gletschermonitoring aufzuzeigen. Es sollen die beiden verwendeten Methoden, SFM (Structure from Motion) und die Laserscantechnik, verglichen werden und Aussagen über ihre Genauigkeit gemacht werden. Zudem sollen die Vor- und Nachteile der verwendeten Methoden diskutiert werden und schlussendlich ein möglichst Präzises Modell der Pasterze erstellt werden um damit am Ende der Arbeit eine Aussage über den Eisverlust seit 2015 gemacht werden kann. Da es eine Evolution in der Wissenschaft gibt müssen die Grundlagen und die Entwicklung in der Gletschermessung erläutert werden. Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen.

- Forschungsfrage 1: Welche der verwendeten Methoden, SFM und Laserscanning, ist besser für ein langfristiges Monitoring von Gletschern geeignet und warum?

- Forschungsfrage 2: Um wieviel Meter hat die Pasterze seit 2015 an Dicke verloren?

1.3 Aufbau der Arbeit

Beginnend mit einer Einführung in die Arbeit und der Definition der Forschungsfragen wird im folgenden Kapitel auf den Forschungsstand eingegangen. In diesem Kapitel soll eine Erklärung über das Verhalten von Gletschern und ein Überblick über die gängigen Messmethoden gegeben werden. Von diesem Abschnitt aus werden in weiterer Folge die in dieser Arbeit verwendeten Messmethoden erläutert. Anschließend zum Forschungsstand wird noch auf das Untersuchungsgebiet mit seiner Geschichte bezogen auf Messungen und wissenschaftlichen Relevanz eingegangen. Das darauffolgende Kapitel „Material und Methodik“ geht auf die Arbeitsweise der Datenaquisition und auf die verwendete Software und Hardware ein. Schlussendlich werden die Ergebnisse dargestellt, diskutiert und die Forschungsfragen wieder aufgegriffen. Im letzten Kapitel „Conclusio“ soll eine Schlussfolgerung erfolgen und ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten gemacht werden.

2. Forschungsstand

Der „World Glacier Monitoring Service“ (WGMS) mit seinem Sitz in Zürich sammelt Informationen über Gletscherveränderungen weltweit. Durch die Kollektion von Informationen erhofft sich die WGMS Aufschluss auf Klimaänderungen wie beispielsweise die Entwicklung von Eiszeiten. Darüber hinaus veröffentlicht diese Organisation einen „glacier change bulletin“, eine Sammlung an Gletscherkarten welche teilweise mit Informationen über die Massenänderung von den jeweiligen Gletschern ausgestattet sind, alle zwei Jahre. Des Weiteren betreibt die WGMS ein Projekt mit dem Namen „Global Terrestrial Network for Glaciers“ (GTN-G) in Zusammenarbeit mit der U.S. National Snow and Ice Data Center (NSIDC) und der „Global Land Ice Measurements from Space initiative“ (GLIMS). Die GTN-G listet drei verschiedene Monitoring Strategien auf, um die Veränderung von Gletschern zu erfassen. Erstens in-situ Messungen wozu die später besprochene glaziologische Methode gehört, zweitens die remote sensing Methode zu welcher SFM und Laserscan gezählt werden und drittens numerical modeling. In dieser Arbeit wird auf die ersten beiden Methoden eingegangen. (Website der WGMS <http://wgms.ch/> und Website der GTN-G <http://www.gtn-g.ch/>)

Gletschermassebilanzen sowie deren Höhenänderungen stellen einen direkten Zusammenhang zum Klimawandel dar – in der Vergangenheit, jetzt und mithilfe von Klimaprojektionen auch für die Zukunft (Matulla et al. 2008).

Abgesehen davon sind Gletscher neben ihrer wichtigen sozio-ökonomischen Bedeutung für den Tourismus im Alpenraum oder die Energiegewinnung auch für zahlreiche Ökosysteme – wie etwa die Hydrobiologie in Seen und Flüssen und deren Fischvergesellschaftungen. (Matulla et al. 2007) von entscheidender Bedeutung. Zudem dienen die tieferen Eisschichten von Gletschern als Orientierungshilfe für Klimaforscher, da in den bis zu einer Millionen Jahre zurückreichende „Klimakalender“ Luftbläschen gespeichert sind. Diese Bläschen enthalten

Isotope des Sauerstoffs und geben damit Informationen über die Zeit aus welcher der Sauerstoff stammt preis (Siegenthaler 2005). Der fortschreitende und sich beschleunigende Klimawandel führt zu einem forcierten Rückgang der Gletscher weltweit (Dyurgerov 1999) wie

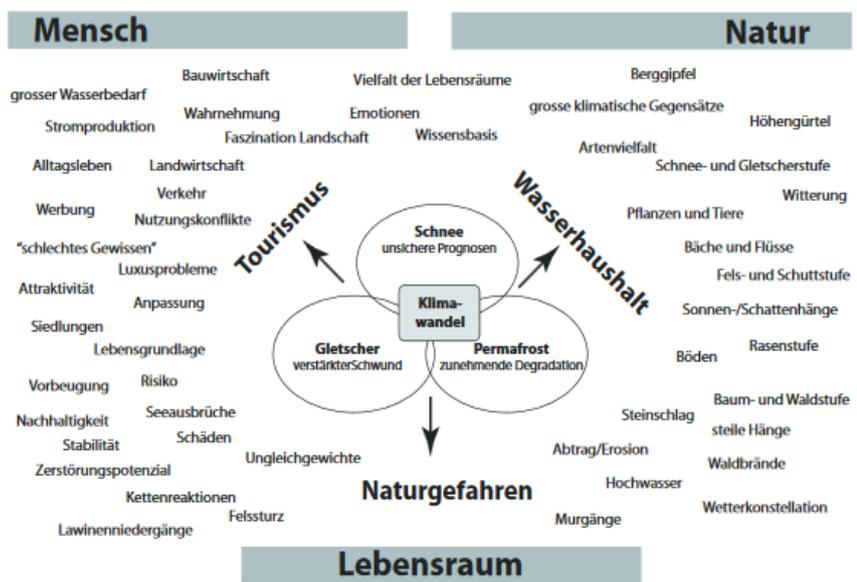
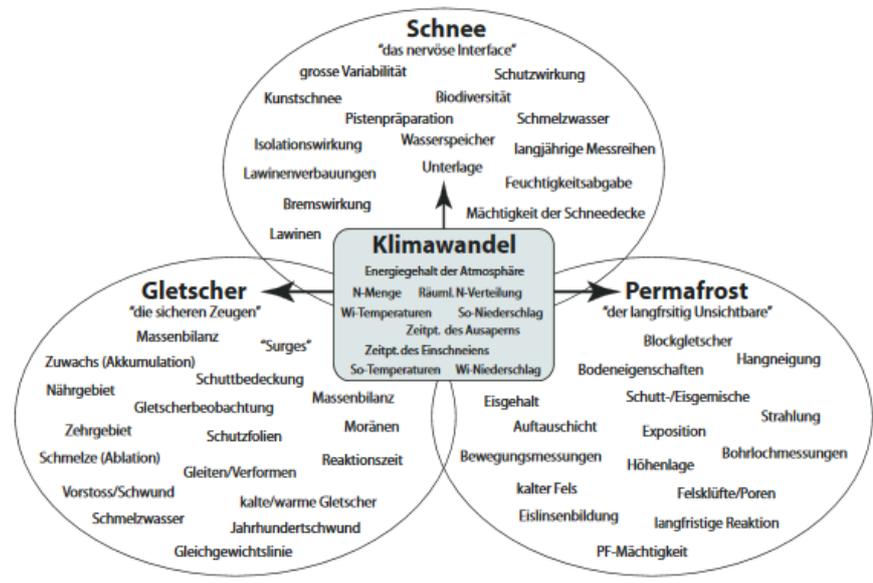
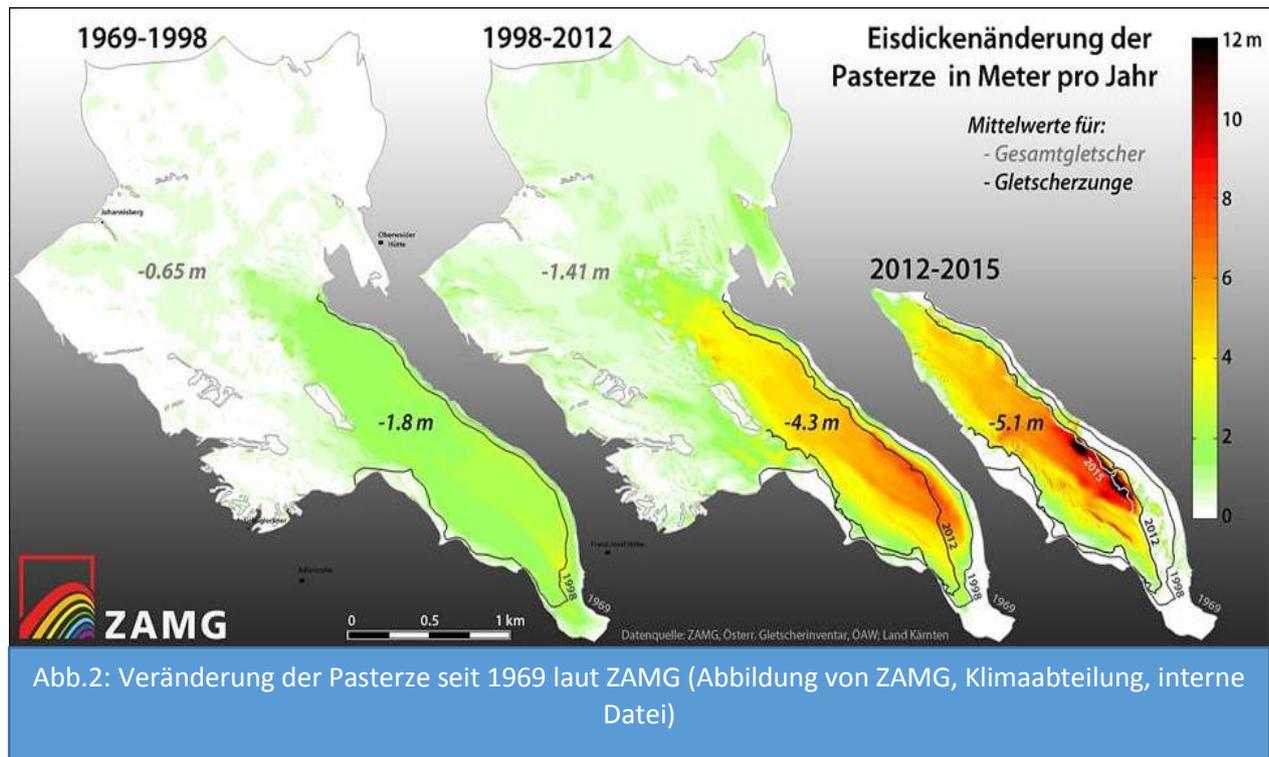


Abb.1: Darstellung der Kryosphären-Elemente, deren relevantesten Charakteristiken sowie die bei einem Klimawandel betroffenen Aspekte (oben). Schema zur Veranschaulichung der komplexen Zusammenhänge zwischen Mensch, Natur und Lebensraum, insbesondere in Zusammenhang mit den durch den Klimawandel in Hochgebirge zu erwartenden Veränderungen (unten). (aus Haeberli 2007)

auch in den Europäischen Alpen (Fischer 2010). Damit geht die Reduktion im Permafrost einher, wodurch die Stabilität von Felshängen und Böden im alpinen Gelände abnimmt. Die Reduktion des Permafrostes steht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Klimawandel und somit auch indirekt in Zusammenhang mit Gletschern. Die Abbildung 1 zeigt im oberen Teil einen schematischen Zusammenhang zwischen den Kryosphären-Elementen und dem Klimawandel. Die Darstellung macht die Vielschichtigkeit der Klimaproblematik in Zusammenhang mit der Kryosphäre erkennbar. Im unteren Teil ist der indirekte Zusammenhang zwischen Naturgefahren, Permafrost, Gletscher und als Schlüsselstelle der Klimawandel dargestellt. Der Permafrost kann in hohen Bergen hunderte Meter dick sein, in niederschlagsarmen Regionen werden hier keine Gletscher ausgebildet. Verschwindet das Eis, egal ob über oder unter der Erdoberfläche, geht ein Stabilitätsfaktor verloren. Abgesehen vom Stabilitätsverlust wird durch den Rückgang des Gletschereises Moränenschutt freigelegt. Bis die Vegetation diesen Stabilitätsverlust ausgleicht, speziell in großen Seehöhen, vergehen Jahrzehnte bis Jahrhunderte. Das Resultat sind erhöhte Schuttmengen, welche vom Berg ins Tal transportiert werden. In Wildbächen erfolgt dieser Prozess häufig bei Starkregenereignissen welche zu Hochwasserereignissen führen. (Haeberli 2007)

„Früherkennung, Vorbeugung und Anpassung nehmen rasch an Bedeutung zu.“ (Haeberli 2007) Um Adaptionsmaßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit der Bevölkerung und Infrastruktur vorrausschauend und effizient einleiten zu können ist unter anderem ein Monitoring der Höhenveränderungen von Gletschern notwendig. Da sich diese Veränderungen in den letzten Jahrzehnten signifikant beschleunigt haben (siehe Abbildung 2) ist es erforderlich die Bestandsaufnahmen zunehmend häufiger als bisher vorzunehmen – d.h. ein kontinuierliches Monitoring ist nötig. Abbildung 2 weist den Verlust der Eisdicke von 1969 bis 1998 mit 1.8 m im Zungenbereich der Pasterze aus, während die Veränderung in den darauffolgenden 15 Jahren (also der Hälfte der vorangegangenen Periode) sich beinahe um einen Faktor 2.5 gesteigert hat. In den letzten vier Jahren hat sich der Rückgang auf den 2.8-fachen Wert der ersten Periode gesteigert. Diese Beschleunigung bestätigt ebenso die Notwendigkeit eines kontinuierlichen Monitorings von Gletscherhöhen. Dabei gibt es messtechnisch unterschiedliche Möglichkeiten. In dieser Arbeit liegt das Hauptaugenmerk jedoch einerseits auf dem finanziell und technisch aufwändigen „terrestrischen Laserscan“ (TLS) und andererseits auf der finanziell günstigeren

,Structure from Motion (SfM) Technik (Marcis 2013). Ziel dieser Arbeit ist eine Kalibrierung der SfM anhand der gemachten Laseraufnahmen um dadurch Unterschiede und gegebene



nenfalls Vor- und Nachteile beider Methoden zu erkennen. Damit sollte es gelingen eine Methode für effizientes Monitoring der schnellen Veränderungen von Gletschern weltweit aufzuzeigen.

2.1 Gletscher

Tiefe Temperaturen gepaart mit genügend Niederschlag über einen langen Zeitraum resultieren in einem Wachstum der Schneedecke. Wird auf diese Weise genügend Schnee akkumuliert, so wird der tiefer liegende Schnee, durch das Gewicht der oberen Schichten, zusammengepresst. Durch das Zusammenpressen des Schnees wird der Schnee kompakter, die Luft wird herausgepresst und die Schneekristalle verändern sich beziehungsweise verbinden sich. Diese Art der Schneemetamorphose hat zur Folge, dass sich die Masse bezogen auf das Volumen verändert: Frischer Neuschnee hat eine Dichte von zwischen 100kg/m^3 und 200kg/m^3 , dieser wird durch das Zusammenpressen im Laufe der Zeit auf knapp 900kg/m^3 verdichtet und wird zu Eis. Aus dem Schnee wird die Luft herausgedrückt, er wird auf ca. 90% seines ursprünglichen Volumens verdichtet, dadurch entsteht die bläuliche bis grünliche Färbung des dadurch entstandenen Eises. Im Gegensatz dazu hat frischer Schnee eine strahlend weiße Färbung (Böhm 2007).

Die Alpen, betrachtet als empfindliches System, reagieren unter Einfluss von Wetter, Klima und geologischen Prozessen. Diese normalen Actio-Reactio Prozesse werden in Fachkreisen häufig als „Ereignisse“ und in den Medien vielfach als Naturkatastrophen bezeichnet. Ereignisse wie Muren oder Steinschlag können nun nicht im sozialen Kontext betrachtet, sondern als ein normaler erdgeschichtlicher Ablauf á la Gebirge schieben sich auf und werden wieder abgetragen betrachtet werden. Sobald die Gravitationskraft die Reibungskraft überschreitet kommt es zu einer Bewegung nach unten. Mit dieser Sichtweise wird die Empfindlichkeit von Gebirgen anschaulich. Einerseits ist die Gravitationskraft eine sehr konstante Größe, andererseits wird die Reibungskraft von unterschiedlichen Parametern beeinflusst. Wasser beispielsweise hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Reibung zwischen den Teilchen und kann sehr stabile Hänge in kurzen Zeiträumen in Unstabile verwandeln. Kommt es nun zu einer Verringerung der Reibungskraft gerät ein Hang in Bewegung und eine Rutschung entsteht. Das Material das in den Alpen vor etwa 100 Millionen Jahren durch Orogenese aufgeschoben wurde, wird nun wieder durch die Gravitation nach unten befördert. Da Wasser einen Einfluss hat und Permafrost beispielsweise in den Alpen mit der Seehöhe zunimmt, entstehen Bereiche die nicht nur durch Auftauen an Bindung verlieren, sondern auch durch das Schmelzwasser aufgelockert werden. Mit diesem Wissen wird klar, wie sich ein vormals vergletschelter Bereich sehr rasch verändern kann.

Ein Gletscher entsteht immer dann, wenn Schnee akkumuliert, kompakt wird und über einen Zeitraum zu Eis wird. Das kann prinzipiell in jeder Klimazone geschehen, insofern mehr Schnee akkumuliert als abschmilzt. (Bennet 2009) Die Zeit, die nötig ist um einen Gletscher zu formen, hängt von der Rate ab in der der Schnee akkumuliert. Die Ablation, in diesem Zusammenhang ein wichtiger Term, beschreibt das Schmelzverhalten von Gletschern. Generell wird unter Ablation jeder Output des Gletschers verstanden. Ablation geschieht entweder durch Schmelzen, Kalben oder durch Sublimation. Kalben beschreibt einen Prozess wobei an der Front des Gletschers Blöcke von Eis in ein Gewässer, Meer oder Binnengewässer, abbrechen. Ablation geschieht aber über den gesamten Querschnitt des Gletschers durch Sublimation und Schmelzen. Wenn die Rate der Akkumulation hoch ist und das Abschmelzen gering ist, wird sich ein Gletscher in relativ kurzer Zeit formen und wachsen. Somit kann die Massenbilanz eines Gletschers als Gleichgewicht zwischen Ablation und Akkumulation beschrieben werden. Diese Massenbilanz ist wiederum insofern wichtig, als dass diese einen maßgeblichen Beitrag für die globale Veränderung des Meeresspiegels leistet. (Bennet 2009, Pfeffer 2008, Zemp 2009) Zemp hält außerdem fest, dass die derzeit vorhandenen Massenbilanzdaten über Gletscher ungenügend sind und gleichzeitig eine hohe Relevanz haben. Aufgrund dessen

empfiehlt er unter anderem (1) die Langzeitmessungen fortzuführen, (2) unterbrochene Langzeit-Serien wiederaufzunehmen, (3) das Monitoringnetzwerk auf strategisch wichtige Punkte zu erweitern, (4) remote sensing und Geoinformationssysteme systematisch zu nutzen um die vorhandenen Datenserien zu kontrollieren und um Extrapolationen für Gebiete ohne Langzeitserien durchzuführen und (5) um all diese Daten und Metadaten zugänglich zu machen. (Zemp 2009) Dies zeigt ebenso die Wichtigkeit des konstanten Monitorings der Pasterze auf. Zudem sind die erhaltenen Daten für viele Forschungsgebiete von Bedeutung.

Generell dominiert in den Sommermonaten die Ablation während in den Wintermonaten die Akkumulation dominiert. Ebenso dominiert im höher gelegenen Teil des Gletschers die Akkumulation, während im tiefer gelegenen Teil die Ablation dominiert. In der Literatur wird der Bereich zwischen Akkumulationszone und Ablationszone als „equilibrium line“ bezeichnet. (Bennet 2009) Der Unterschied zwischen Ablationszone und Akkumulationszone führt zu einem Ungleichgewicht der Massen. Wenn die Akkumulation grösser als die Ablation über ein Jahr betrachtet ist, ist die Massenbilanz positiv. Umgekehrt, wenn die Ablation höher als die Akkumulation ist, verhält sich die Massenbilanz negativ. Eine positive Massenbilanz hat zur Folge, dass der Gletscher wächst und sich ausdehnt. Dadurch, dass in höheren Lagen die Akkumulation grösser ist, kommt es durch die Gravitation zu einer Bewegung im Gletscher. Die Gravitation lässt den Gletscher Richtung Tal fließen, vorausgesetzt natürlich, dass es eine Angriffskraft für die Gravitation gibt, soll heißen das Gelände ist geneigt. Im oberen Teil wird die Masse immer grösser welche auf den unteren Bereich drückt. Durch den Druck kommt es im Eis zu Schmelzvorgängen und zu Verformungen, der Gletscher beginnt zu fließen. Das Fließen bewirkt eine Verschiebung der Masse vom oberen zum unteren Teil. Dadurch entsteht eine Ausbildung der Gletscherzunge, von Gletscherfronten und in weiterer Folge auch von Moränen bzw. kommt es auch zu einer Veränderung des Geländes. Die Kraft, die den Gletscher zur Bewegung und zur Verformung veranlasst wird als Schubspannung bezeichnet. Zusammengefasst:

$$\tau = \rho g(s - z) \sin \alpha$$

τ ist die Schubspannung

ρ ist die Dichte des Eises

g ist die Erdbeschleunigung

s ist die Höhe der Oberfläche des Gletschers

z stellt die Höhe des Eises gemessen von einem Punkt innerhalb des Gletschers dar

α der Winkel der Gletscheroberfläche

Aus dieser Gleichung ist zu erkennen, dass die Schubspannung von der Geländeneigung und der Eisdicke abhängt. Weiteres sagt Bennet, dass sich Eis normalerweise nicht unter 50kPa verformt und über 150kPa dem Druck nicht widerstehen kann. Dadurch, dass im oberen Teil des Gletschers mehr Akkumulation geschieht steigt der Winkel der Gletscheroberfläche. Dies wiederum hat zur Folge, dass die Schubspannung zunimmt und das Eis zur einer Verformung zwingt, dass wiederum eine Art Fließen hervorruft. (Bennet 2009)

Gletscher verändern durch ihre Bewegung das Gelände. Ehemals vergletscherte Gebiete können durch verschiedene Methoden rekonstruiert werden und dadurch kann Aufschluss auf die Eisdicke, das Verhalten von Gletschern beim Fließen und die Evolution von Eismassen erhalten werden. Werden diese Informationen mit anderen Proxydaten verlinkt, können Aussagen über die Geschichte und Entwicklung des Meeresspiegels und des Klimas getroffen werden. Angewandte Methoden sind hauptsächlich fernerkundlich basierend via Geoinformationssystem (GIS), Satellitenbilder oder eine Interpretation des Geländes basierend auf Annahmen. (Kleman et al. 1997, Bennet 2009) Darüber hinaus konnte Kleman (1994) feststellen, dass sich das vergletscherte Gebiet anders verhält, wenn es sich im Permafrost befindet. Mit anderen Worten ist gefrorener Boden verformungsresistenter als nicht gefrorener bzw. mit Wasser, beispielsweise Schmelzwasser, gesättigter Boden.

Die Temperatur des Bodens hat einen Einfluss auf das Fließverhalten und auf die hydrologischen Prozesse innerhalb des Gletschers. Bei einem sogenannten cold-based glacier ist der Grund des Gletschers unterhalb des Gefrierpunktes und das Eis ist zum Untergrund gefroren. Dies hat einen Einfluss auf das Fließverhalten des Gletschers, auf die Veränderung des Geländes und die erzeugte Erosion. Umgekehrt ist bei warm-based glaciers der Untergrund nicht gefroren und der Gletscher kann auf dem Untergrund fließen. (Lorrain R.D 2011) Ist der Untergrund gefroren handelt es sich um Permafrost. Permafrost ist laut dem Lexikon der Geowissenschaften „ein Untergrund, der für mindestens zwei Jahre eine Temperatur von 0 Grad Celsius nicht überschreitet.“ Das bedeutet nicht, dass das Wasser gefroren sein muss, da wie im Falle von Gletschern der Untergrund unter Druck stehen kann und dadurch das Wasser nicht gefroren sein kann. Druck hat einen maßgeblichen Einfluss auf den Aggregatzustand eines Materials.

Es lässt sich mittlerweile erkennen, dass die Prozesse die in und um die Gletscher ablaufen relativ komplex sind. Eine Vielzahl von Faktoren spielen eine Rolle von denen einige beleuchtet wurden, andere wurden nicht besprochen und wiederum bei anderen ist ihre Auswirkung nur rudimentär bekannt. Diese Arbeit soll einen Beitrag zum Monitoring und zur Erforschung von adäquaten Mitteln für Gletschermessungen leisten. Wie oben erwähnt hat Zemp und andere bereits auf die Relevanz hingewiesen. Dazu soll ebenfalls ein Beitrag geleistet werden. Hauptaugenmerk liegt auf dem Vergleich der SFM-Methode und der TLS-Methode. Hierzu wurden Versuche durchgeführt die in den folgenden Kapiteln noch besprochen werden.

2.2 Massenbilanzen von Gletschern

Die Methoden um eine Massenbilanz von Gletschern erstellen zu können in (1) die glaziologische (traditionelle) Methode und (2) die geodätische Methode eingeteilt werden. (Sobota 2007, Kaser 2003). Im Folgenden werden beide Methoden kurz vorgestellt.

2.2.1 Die glaziologische/traditionelle Methode

Diese Art der Messung basiert auf in situ Messungen und wurde in der Hydrologie, genauer in der Schneehydrologie entwickelt. Sie entstand am Ende des 19 Jahrhunderts, daher traditionelle Methode und wurde seither konstant weiterentwickelt. Einerseits wird eine Anzahl von Messstäben in das Eis getrieben welche zur Ablesung der aktuellen Eishöhe dienen. Diese Stäbe sollten an repräsentativen Stellen am Gletscher gesetzt werden und zumindest so tief eingebracht werden, als das sie am Ende der Ablationsperiode nicht aus dem Eis herausgeschmolzen sind und umkippen. Zu zwei unterschiedlichen Daten werden unterschiedliche Niveaus an den Stäben abgelesen und notiert. Andererseits wird noch die Schneedichte in Schneeprofilen evaluiert. Wie bereits besprochen hat Eis eine Dichte von 900kg/m^3 , die Dichten in den Schneeprofilen weist auf den Grad der Metamorphose des Schnees hin. Die Dichte kann somit zwischen 100 und 900 kg/m^3 variieren. Durch die bekannte Dichte vom Eis und den Dichten im Schneeprofil lässt sich eine Massenänderung folgendermaßen darstellen.

$$\frac{db}{dt} = \frac{\rho dh}{dt} + \int \frac{d\rho}{dt} dz$$

Der erste Term auf der rechten Seite beschreibt die Änderung der Eismasse über einen Zeitraum mit konstanter Dichte, der zweite Term behandelt die Änderung der Dichte über einen

Zeitraum über einer bestimmte Eisdicke. Für den praktischen Gebrauch ist folgende Formulierung besser geeignet:

$$b_i = \rho_0 \Delta h + (\rho_2 h_2 - \rho_1 h_1)$$

b stellt die Massenbilanz an einem Punkt i dar, ρ_0 die Dichte von Eis, Δh ist die Änderung der Eishöhe, welche an einem Stab abgelesen wurde. Werden die Messungen zweimal im Jahr durchgeführt, einmal im Sommer und einmal im Winter, können die Änderungen der Jahre festgestellt werden. Ein Teil der nicht von dieser Methode erfasst wird ist die interne Akkumulation. Dyurgerov schlägt vor Tests für jeden speziellen Gletscher, an dem Messungen durchgeführt werden, zu machen um die interne Akkumulation zu bestimmen. Dadurch soll die Genauigkeit erhöht werden. Ein anderer Teil den die glaziologische Methode nicht erfasst, ist die mechanische Ablation, weiter oben als Kalben benannt. Diese Art der Ablation muss auch berücksichtigt werden, um genauere Ergebnisse zu erzielen zu können was die Massenbilanz betrifft. Um nun die Massenbilanz eines ganzen Gletschers festzustellen, werden die erhobenen Daten gemittelt und mit der Fläche des ganzen Gletschers in Bezug gebracht:

$$b_n = (1/S) [\Sigma(b_{n1}S_1 + b_{n2}S_2 + \dots + b_{nj}S_j)]$$

b_n soll die Massenbilanz des gesamten Gletschers darstellen, b_{nj} sind die gemittelten Bilanzen für alle Messstellen innerhalb eines bestimmten Höhenbereichs (j) mit der Fläche s_j , schlussendlich bezeichnet S die Fläche des gesamten Gletschers. (Dyurgerov 2002)

Als Vorteil dieser Methode wird das „Gefühl“ das man für den Gletscher bekommt genannt. Durch die häufigen Messungen und die verbrachte Zeit am Gletscher entwickelt der Messende ein Auge für die Veränderungen am und um den gesamten Gletscher. Ein offensichtlicher Nachteil ist der lange Zeitraum der Arbeiten die oft unter widrigen Umständen erbracht werden. Durch den langen Zeitraum sind hohe Kosten für Kost und Logis verbunden und es entstehen Fehlerquellen. (Kaser 2003)

2.2.2 Die geodätische Methode

Ist das Volumen des Gletschers zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten bekannt, so kann durch einfaches Subtrahieren der Unterschied errechnet werden. Auf diesem Prinzip basiert die geodätische Methode. Die Informationen der einzelnen Volumina erhält man aus topografischen Daten. Die Herkunft dieser topografischen Daten ist für die Qualität des Ergebnisses maßgeb-

lich verantwortlich. Um die Genauigkeit zu erhöhen, ist das Wissen über die Dichte des oberflächlichen Teils des Gletschers notwendig. Zwei DEMs (digital elevation modell) werden zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten erstellt, normalerweise am Ende der Ablationsperiode.

$$B_{geo} = \Delta V * \rho$$

Anzunehmen, dass das gesamte Volumen mit einer Dichte von 900kg/m³ zu berechnen ist, führt dementsprechend zu Ungenauigkeiten. Jedoch wird in den meisten Studien die Dichte geschätzt und nicht gemessen. Eine weitere Annahme ist, dass im Bezug zu der gesamten Gletscherfläche die Bewegung des Eises die gesamte Masse des Eises nicht beeinflusst. Das wiederum bedeutet, dass Änderungen des Gletschervolumens nur in Bezug zur gesamten Massenänderung stehen. Es wird also nicht berücksichtigt, dass Akkumulation oder Ablation theoretisch nur an einer speziellen Stelle stattfinden kann. Beispielsweise kann durch den Eisfluss dichtes Eis in tiefere Lagen gelangen, welcher im oberen Teil durch frischen leichten Schnee ersetzt wurde. Das Volumen im oberen Teil steigt damit und es wird angenommen, dass ebenso die Masse gestiegen ist. (Fischer 2010) Wie bereits besprochen hat der frische Schnee noch keine Metamorphose durchgemacht und hat dadurch noch eine sehr viel geringere Masse. Offensichtlich muss es durch diese Annahmen zu Ungenauigkeiten kommen. Topografische Karten oder digitale Höhenmodelle sind Möglichkeiten die Volumina zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu errechnen. Die Genauigkeit der Modelle schränkt diese Methode auch ein. Steile Stellen oder Spalten können oftmals nicht erfasst werden. (Fischer 2010, Kaser 2002) Diesem Punkt soll mithilfe von „state-of-the-art“ Methoden wie beispielsweise dem Laserscan Abhilfe geschaffen werden. In dieser Arbeit wird die erreichbare Genauigkeit vom Laserscan später erörtert. Die unterschiedliche Genauigkeit von Modellen wird in den Ergebnissen durch anschauliche Hillshades erkennbar gemacht.

Laut Fischer unterscheiden sich die Ergebnisse der geodätischen und der glaziologischen Methode. Die Unterschiede an sich divergieren ebenso zwischen Gletschern. Des Weiteren konnte Fischer feststellen, dass die Diskrepanz zwischen den Methoden mit der Stärke der negativen Massenbilanz steigt. Zusammengefasst sind es zwei unterschiedliche Arten um denselben Prozess festzustellen, auch werden unterschiedliche Parameter dafür gemessen. (Fischer 2010)

Im Folgenden Abschnitt wird genauer auf zwei Anwendungsmöglichkeiten der geodätischen Methode eingegangen.

2.3 Photogrammetrische Structure-from-motion Methode

Seit einiger Zeit steht ein Verfahren zur Verfügung, das zuvor noch Spezialausrüstung erforderte und deshalb nur selten zur Anwendung kam. Dieses Verfahren erlaubt die Gewinnung von dreidimensionaler Information aus Fotos von unkalibrierten Kameras. Klassische Anwendungsgebiete von der photogrammetrischen Methode sind die Archäologie, denkmalpflegerische Tätigkeiten und Herstellung von Repliken. Die Datengrundlage sind Fotos, welche sich stark überlappen. Um ein brauchbares Ergebnis zu bekommen ist das zu strukturierende Objekt von allen Seiten zu fotografieren. Jeder Punkt muss außerdem auf mindestens zwei Bildern erkennbar sein. In Kombination mit den bewegten Kamerapositionen ergibt sich das dreidimensionale Modell, daher auch der Name „Structure-from-Motion“. Ähnlich wie das menschliche Auge erkennt die Software durch perspektivische Unterschiede die einzelnen Positionen der Kamera. Wenn nicht genügend Punkte erkannt werden können wie bei sehr glatten oder verspiegelten Oberflächen wie Glas oder Eisflächen, ergeben sich dadurch falsche Positionen. Ebenso kommt es zu falschen Positionen, wenn sich Punkte während des Aufnahmeprozesses verschieben, wie Wolkenstände oder Schattenwürfe im Tagesverlauf. Der Aufnahmeprozess soll deshalb möglichst rasch durchgeführt werden. (Reinhard s.A., Carrivick 2016)

Grundsätzlich sind verschiedene Softwarelösungen verfügbar, um aus den aufgenommenen Bildern ein Modell zu erstellen. In dieser Arbeit wird jedoch nur auf das Programm „Agisoft PhotoScan Professional Edition“ der russischen Firma Agisoft LLC eingegangen. Diese Software bietet unter anderem die Möglichkeit der Erzeugung von Digitalen Höhenmodellen, Dense Point Clouds und Sparse Point Clouds. Dadurch wiederum bietet sich die Möglichkeit einen Vergleich mit Laserscan Punktwolken durchzuführen. Ebenfalls sind unterschiedliche Softwarelösungen zur Punktwolkenbearbeitung und –vergleichung am Markt. Des Weiteren können die erzeugten Modelle mit dreidimensional eingemessenen Passpunkten versehen werden. Dadurch werden die Modelle referenziert und das Agisoft eigene Koordinatensystem wird in ein anderes, gewähltes Koordinatensystem umgewandelt. Hier ist die Genauigkeit abhängig davon, wie gut die DGPS Punkte auf den Bildern markiert werden konnten.

Mithilfe von UAV`s (unmanned aircraft vehicle) konnten in der Arktis Luftbilder von Moränen gemacht werden, welche wiederum Rückschlüsse auf geomorphologische Prozesse und Schneedeckenentwicklung gemacht wurden. Bei dieser Studie wurden die Schwierigkeiten

von festen GCP's festgehalten. Durch Aufweichung des Eises im Sommer bzw. Überdeckung der Punkte im Winter ist ein Vergleich mit denselben Punkten nicht möglich. (Prokop 2017)

2.4 Laserscan

Bei Laserscannern kann grundsätzlich zwischen terrestrischem Laserscanner (TLS), Airborne Laserscanner (ALS), unmanned Laserscanner und mobile Laserscanner unterschieden werden. Die eigentliche Arbeitsweise des Scanners verändert sich nicht, lediglich das verwendete Vehikel auf dem der Scanner positioniert ist. Der terrestrische Laserscanner wird auf einem Stativ befestigt, von wo aus der Scan erfolgt. Beim airborne und unmanned Laserscan erfolgt der Scan über ein flugfähiges Vehikel beispielsweise über ein unmanned aircraft vehicle (UAV) oder beispielsweise via Hubschrauber. Die Auswahl der Methode ist maßgeblich von den Anforderungen beeinflusst. Zuletzt besteht noch die Möglichkeit eines mobilen Laserscans, wobei hier der Scanner auf einem sich bewegenden Fahrzeug befestigt ist. Ob Autos, Züge oder Boote spielt grundsätzlich keine Rolle. (Website Riegl)

Beim terrestrischen Laserscanning wird ein Lichtimpuls in die Richtung des Zieles abgegeben. Das Ziel reflektiert den Impuls zurück und erreicht nach einer bestimmten gemessenen Zeit wieder den Scanner beziehungsweise das Photoid. Diese bestimmte Zeit wird von einer elektronischen Uhr gemessen. Der Lichtimpuls ist dabei durch die Luft in einem gewissen Zustand gewandert. Der Zustand der Atmosphäre bzw. der Luft hat einen Einfluss auf die Geschwindigkeit des Lichtimpulses und dadurch auch auf die Messung. Die Distanz die der Lichtimpuls hinter sich hat, entspricht der doppelten Entfernung zum Ziel. Wie in Abbildung 3 zu erkennen ist, kann $t = \text{Flugzeit des Lichtes}$ sehr simpel berechnet werden. t wird mit der Distanz zum Ziel im einem Verhältnis zur Geschwindigkeit dargestellt. Dadurch, dass die absolute Position vom Scanner, die Geschwindigkeit des Lasers und die Zeit, die der Laser braucht um das Ziel zu erreichen, bekannt sind, ist es möglich die absolute Position des Zieles zu ermitteln. (Prokop 2008) Durch das Ermitteln mehrerer Millionen Ziele entsteht eine Punktwolke die die Oberfläche eines bestimmten Gebietes dreidimensional wiedergibt. Der Laserscanner schießt die Impulse mit sehr hoher Frequenz auf das Gelände und ermöglicht damit eine dementsprechend hohe Darstellung der Oberfläche. Die Genauigkeit von TLS wird in der Praxis von äußeren Rahmenbedingungen beeinflusst. Hier spielt Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Druck eine Rolle. Diese Faktoren beeinflussen die Geschwindigkeit des Lasers, welche ausschlaggebend für eine hohe Messgenauigkeit ist. Prokop erreichte eine Genauigkeit von weniger als 10cm bei Schneetiefenmessungen am Arlberg. In den vergangenen Jahren hat

sich Laserscanning als leistungsstarkes Instrument für Schneehöhenmessungen erwiesen. (Prokop 2008)

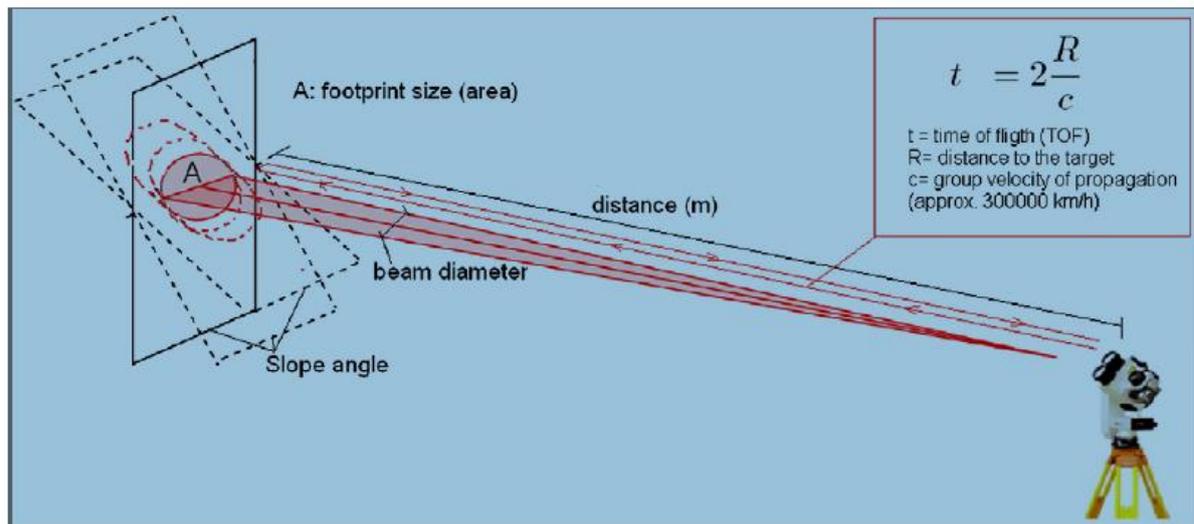


Abb.3: Arbeitsweise des TLS (Prokop 2008)

Das Instrument unterliegt, wie bereits erwähnt, äußeren Einflüssen. Erstens Temperatur, zweitens Zustand der Atmosphäre und drittens kann atmosphärische Strahlung den Laser beeinflussen. (Bohler 2003). Außerdem hat eine lange Scandauer einen negativen Einfluss auf die Genauigkeit. Laut Prokop sind die Hauptfaktoren für negative Einflüsse der Scandauer auf die Änderung der meteorologischen Gegebenheiten, die Änderung der Oberflächenbeschaffenheit und die Einflüsse auf das Stativ und damit die absolute Position zurückzuführen. Eine weitere bekannte Fehlerquelle entsteht durch die Registrierung des Modells, das via DGPS vom internen Koordinatensystem in ein neues, gewähltes Koordinatensystem überführt wird. (Prokop 2008)

2.5 GPS vs. DGPS

Das globale Positionierungssystem (GPS) basiert auf Satelliten, welche unter anderem für Navigation verwendet werden. Mit Hilfe dieses Systems kann ein Punkt auf der Erde lokalisiert werden und im Falle einer Bewegung ebenfalls die Geschwindigkeit errechnet werden. Wie so viele Erfindungen wurde auch diese ursprünglich für militärische Zwecke entwickelt, hat aber mittlerweile Einzug in alltägliche Aspekte gehalten. Grundsätzlich arbeiten die Satelliten bzw. die GPS-Empfänger mit trigonometrischen Methoden: Da die Zeit, die das Signal vom Satelliten zum Empfänger braucht, bekannt ist und die Geschwindigkeit des Signals ebenfalls, kann die Distanz des Empfängers zum Satelliten relativ genau errechnet werden. Wenn diese Distanz nun von mindestens noch zwei anderen Satelliten errechnet wird, kann

mittels Trigonometrie die exakte Position ermittelt werden. DGPS (differentielles globales Positionierungssystem) dagegen hat anders als normales GPS eine sehr viel höhere Genauigkeit. Der Grund für die Ungenauigkeit von bis zu 30m von GPS sind die Übertragungswellen die durch verschiedene Atmosphärenschichten gesendet werden müssen. DGPS wird noch mit einem fix eingemessenen Punkt auf der Erde rückgekoppelt und kontrolliert somit die errechnete Position von den Satelliten. Die Signale für die Korrektur werden via Radiowellen übertragen. Dadurch kann eine Genauigkeit von wenigen Zentimetern erreicht werden. (Larsson, P. 2001)

Da es sich bei der Korrektur um Radiowellen handelt, darf der Fixpunkt auf der Erde nicht zu weit von dem einzumessenden Punkt entfernt liegen. Außerdem limitieren die atmosphärische Strahlenbrechung und der Orbit an sich die Genauigkeit von DGPS auf wenige Zentimeter. (Wübbena 2001)

2.6 Hydrologie von Gletschern in sozialem Kontext

Glaziologische Hydrologie beschäftigt sich mit der Wasserspeicherung und –transport in Gletschern, sowie mit der Spende in Fließgewässer. (Elsevier Inc. 2010).

Abbildung 4 zeigt eine schematische Übersicht der Wasserflüsse am Gletscher laut „Glacial Hydrologie“. Element A zeigt einen supraglazialen See ohne erkennbaren Abfluss, während Element B oberflächlichen Abfluss zeigt der sich wiederum in einen Moulin (Gletschertopf) entwässert. Die Moulins sammeln den Abfluss in subglazialen Kanälen die von unterschiedlichen Elementen gespeist werden können. Gletscherspalten oder (F) teilweise abgeschlossene oder sich öffnende mit Wasser gefüllte Höhlen sind mögliche Wasserspeicher innerhalb des Gletschers.

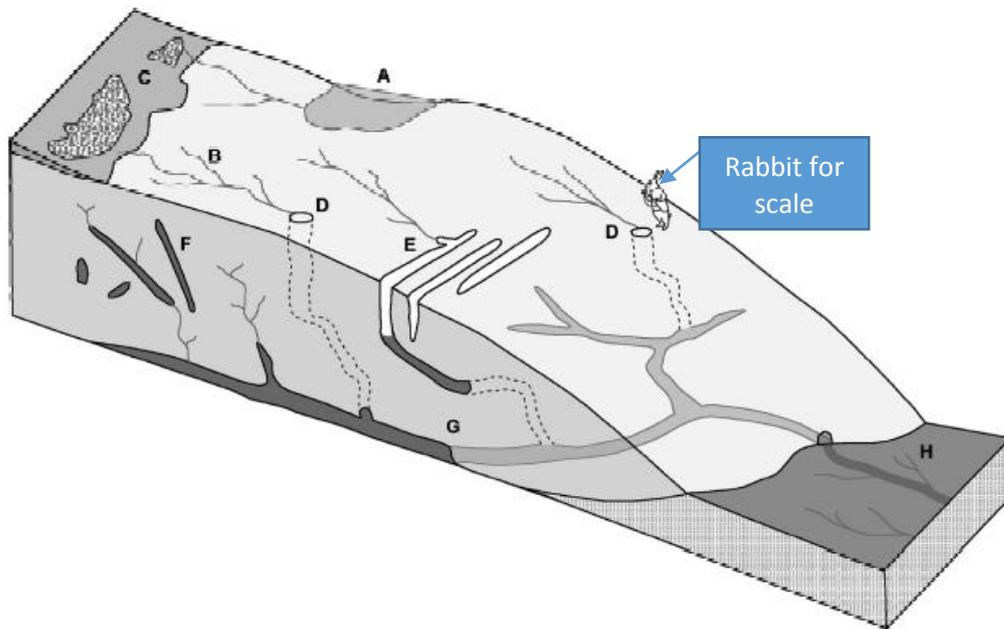


Abb.4: Schematische Übersicht der Wasserbewegungen am und im Gletscherkörper (Zangerle 2018 modifiziert nach Elsevier Inc. 2010)

Die Kanäle entwässern ins (H) Vorland des Gletschers. Dieses Vorland ist in vielen Fällen von der Spende des Gletschers abhängig. Kanadische Landwirtschaft und zentralasiatische Landwirtschaft verwendet große Teile Schmelzwasser zur Bewässerung ihrer intensiv bewirtschafteten Flächen. Europäische Wasserkraftwerke arbeiten mit der Gletscherspende, welche ihnen dadurch eine ganzjährige Stromproduktion erlaubt. (Glacial hydrologie) Gletscher spielen eine signifikante Rolle im lokalen sowie im globalen hydrologischen System. In heißen Monaten spenden vergletscherte Gebiete Wasser an das Vorland, während in kalten feuchten Monaten das Wasser dort gespeichert wird. Solche Reservoirs dienen also als Puffer für heiße Sommermonate aber ebenso als Puffer bei Starkniederschlägen. Der Effekt den die Erwärmung des Klimas auf all diese sozialen, ökonomischen und ökologischen Aspekte hat, sind bisher nur abschätzbar. (Karpilo 2009) Durch den Rückgang von Gletschern entsteht eine Änderung des Geländes. In Zusammenhang damit steht eine Änderung der Vegetation und damit der Tierwelt, sowie des Bodens und abiotischen Teilen der Umwelt. Durch die steigende Aridität von montanen bis subalpinen Wäldern, entsteht eine Häufung von Waldbränden und eine Veränderung der Waldvergesellschaftung. Gibt es nun weniger Wald, sinkt der Wasserrückhalt und weniger Wasser kann verdunsten und mehr Wasser versickern. Hier sind die genauen Auswirkungen ebenfalls noch unbekannt. (Matthews 1992, Orlove 2008) Abgesehen von der wichtigen Wasserversorgung von anströmigen Bereichen der Gletscherspende, sind Tourismus in Zusammenhang mit den sozialen Leistungen von Gletschern zu erwähnen.

3 Untersuchungsgebiet „Die Pasterze“

Die Pasterze gilt als der größte Gletscher der Ostalpen und gleichzeitig auch Österreichs ersichtlich in Abbildung 5. Die Abbildung 5 zeigt die Zunge der Pasterze im Jahr 2012. Die typische Form eines Talgletschers erkennt man an den steilen Seiten welche zumindest in früheren Tagen die Pasterze begrenzt hat. Im weiter oben gelegenen Teil können die Firnbecken erkannt werden, welche die Zunge über den sogenannten Hufeisenbruch gespeist haben. Laut Fischer 2012 liefert seit 2000 nur noch der Riffelwinkel erwähnenswerte Beiträge zu den Eismassen der Pasterzenzunge. Daher verliert die Zunge zunehmend an Volumen und damit auch den Charakter eines Talgletschers. (Fischer 2012) Aktuelle Bilder lassen an der Charakteristik eines Talgletschers zweifeln.

3.1 Geschichte der Gletschermessungen an der Pasterze



Abb.5: Die Pasterze im Jahr 2008 (Mergili 2008)

Die Messung von Gletscherdaten hat mittlerweile eine Geschichte. Grönlands Gletscher beispielsweise wurden bereits seit dem Ende der letzten kleinen Eiszeit vermessen. (Machgut et al. 2016) Zu dem geben Eisbohrkerne der Arktis Aufschluss zu Klimadaten der vergangenen 740.000 Jahre. (Augustin et. Al. 2004) Wenn Verständnis vom Verhalten von Gletschern in der Vergangenheit geschaffen wird, können dadurch ebenfalls Vorhersagen vom Verhalten in der Zukunft gemacht werden. Durch die Zusammenhänge von Klimazustände und Eisentwicklung, die in den Eisbohrkernen enthalten sind, sind Vorhersagen für die Zukunft möglich. Dadurch, dass Gletscher sensibel auf das Klima in relativ kurzen Zeiträumen reagieren, können diese als Indikatoren für Klimaveränderungen verwendet werden. (Oerlemans 1997)

Charakteristisch für die Pasterze ist das relativ hoch gelegen Nährgebiet mit der großen flach verlaufenden Zunge im tieferen Bereich. Der erste Gletscherstand der an der Pasterze gemessen wurde, wurde von den Brüdern Schlagintweit 1846 herausgebracht (Lieb und Kellerer-Pirklbauer 2018 nach Schlagintweit und Schlagintweit 1850). Darauf folgte das regelmäßige Monitoring mit 1879. Laut Nicolussi und Patzelt (1999) war die Pasterze ca. 9500 Jahre BP nicht größer als heute. Dies wurde mit Hilfe von Holzanalysen festgestellt. Dem gegenüber steht die Aussage von Oerlemans und Zuo (1997) „The glacier is likely to retreat 2-5 km by the year 2100. The ice volume could be reduced by 24-63% by the end of the 21st century“. Studien der Universität Innsbruck zeigen, dass die Pasterze ca. 8100 v. C. und ca. 6900 v. C. kleiner war als heute und erst um ca. 6900 v. C. zu wachsen anfang. Ebenso war die Pasterze um ca. 4800 v. C. und bis ca. 3800 v. C. kleiner als jetzt. Dies konnte mit Hilfe von Hölzern in Kombination mit der Radiocarbon-Methode festgestellt werden. In diesen Zeiträumen hat der Bewuchs mit Hölzern bis in die entsprechende Seehöhe gereicht. (Nicolussi 1999) Derzeit reicht die Waldgrenze nicht bis in diese Höhe.

In Bezug auf die Pasterze sind Längenvariationen vor 1880 nicht bekannt. Ab 1880 wurden konstante Messungen begonnen und sind bis dato vorhanden.

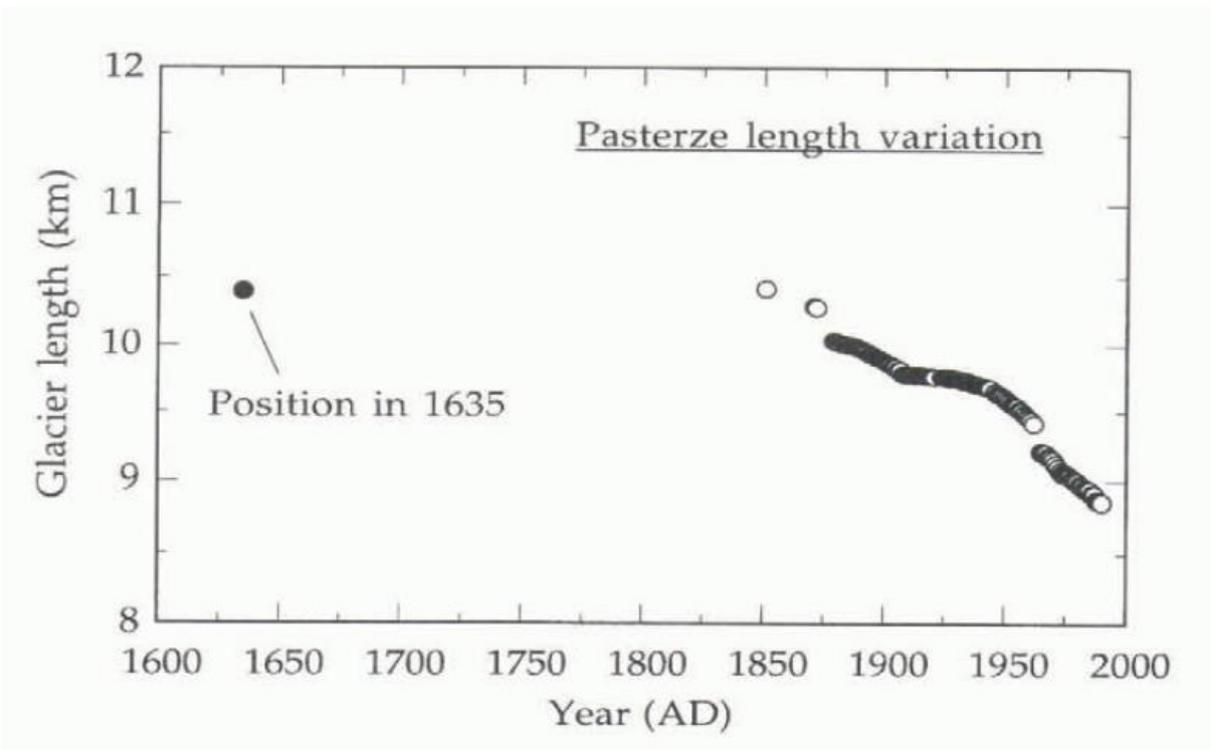
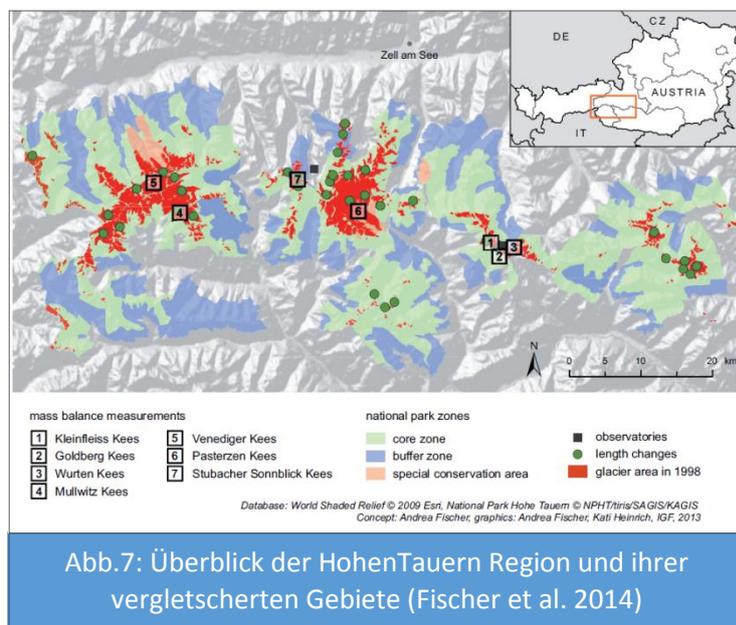


Abb.6: Längenänderung der Pasterze (Oerlemans 1997)

Um 1850 hatte die Pasterze ihre größte Ausdehnung seit dem Beginn der Messungen. Seither konnten nur noch Rückgänge mit unterschiedlicher Geschwindigkeit festgestellt werden. Die Geschwindigkeit variierte seither zwischen 2m/a und 15m/a. (Oerlemans 1997) Diese Arbeit soll einen Beitrag zu den Messungen leisten. Wie in Abbildung 6 ersichtlich gab es seit 1880 einen konstanten Rückgang der Gesamtlänge der Pasterze. Über das Volumen kann dadurch keine Aussage per se gemacht werden. Anzunehmen ist jedoch, dass sich das Volumen in einem Verhältnis zu der Länge verhält.

3.2 Das Gebiet um die Pasterze „Hohe Tauern Region“

Im Jahre 1998 waren 10% der Fläche des Hohe Tauern National Parks, in welchem die Pasterze liegt, mit Eis bedeckt. Die Fläche beträgt etwa 1800km² und da sich dieses Gebiet gut eignet um Forschungen über Gletscher und Permafrost zu betreiben, widmet sich die Universität Graz bereits seit 1995 diesem Gebiet. (Kienast 2004) Der Rückgang der Eisbedeckung in diesem verhältnismäßig kleinen Gebiet ist mit wenig anderen Gebieten auf der Welt vergleichbar. (Hynek 2014) Im Jahr 1850 hatte die Pasterze noch eine Fläche von 26,5km² und eine Länge von 11,4km, dagegen im Jahr 1985 eine Fläche von 20km² und eine Länge von 9km. (Kienast 2004) Dadurch, dass dieses Gebiet sehr sensibel reagiert, sind die Proxydaten welche erhalten werden von umso höherer Relevanz. Das Observatorium am Sonnblick auf



3106m Seehöhe wird seit 1886 betrieben. Die dadurch gewonnenen Daten geben Aufschluss auf das Wetter der vergangen 132 Jahre. Diese Daten können mit den Gletscherdaten kombiniert werden um Zusammenhänge erkennbar zu machen. Dadurch stehen auch sehr gute Daten um die Pasterze zur Verfügung, was das Monitoring synoptischer gestaltet. In Abbildung 7 ist die Hohe Tauern Region abgebildet mit ihren verhältnismäßig gut vermessenen Gletschern. Die Nummer Sechs ist die Pasterze. Die Nummern eins, zwei und drei liegen unterhalb des bekannten Sonnblicks auf welcher die ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) ihre berühmte Wetterstation hat.

Grundsätzlich wird unter Monitoring eine Überwachung von Vorgängen verstanden. Wie bereits angesprochen ist die Region um die Pasterze seit über hundert Jahren überwacht. Bezüglich Gletschermonitoring sind Satellitenbilder insofern wenig geeignet, als dass diese oft von Wolken überdeckt, oder die Schnee- Wolkenabgrenzung nicht durchführbar ist. Zudem sind

Aufnahmen am Ende der Ablationsperiode erforderlich. (Qinghua 2006) Durch terrestrische Laserscans können DEM's (digitale Höhenmodelle) erstellt werden, mithilfe welchen wiederum ein Errechnen des Eisverlustes möglich ist. DEM's können ebenfalls über SFM erstellt werden. Das zeigt eine Möglichkeit auf DEM's ohne Satellitenbildern zu einem erwünschten Zeitpunkt zu erstellen.

4 Material und Methode

Zum Vergleich der SFM-Methode und des TLS wurde eine Vorgangsweise entwickelt die im Folgenden genauer erklärt wird.

4.1 Arbeitsablauf

Um einen Überblick über die Arbeitsweise und die Methodik zu geben wurde folgendes Flussdiagramm erstellt:

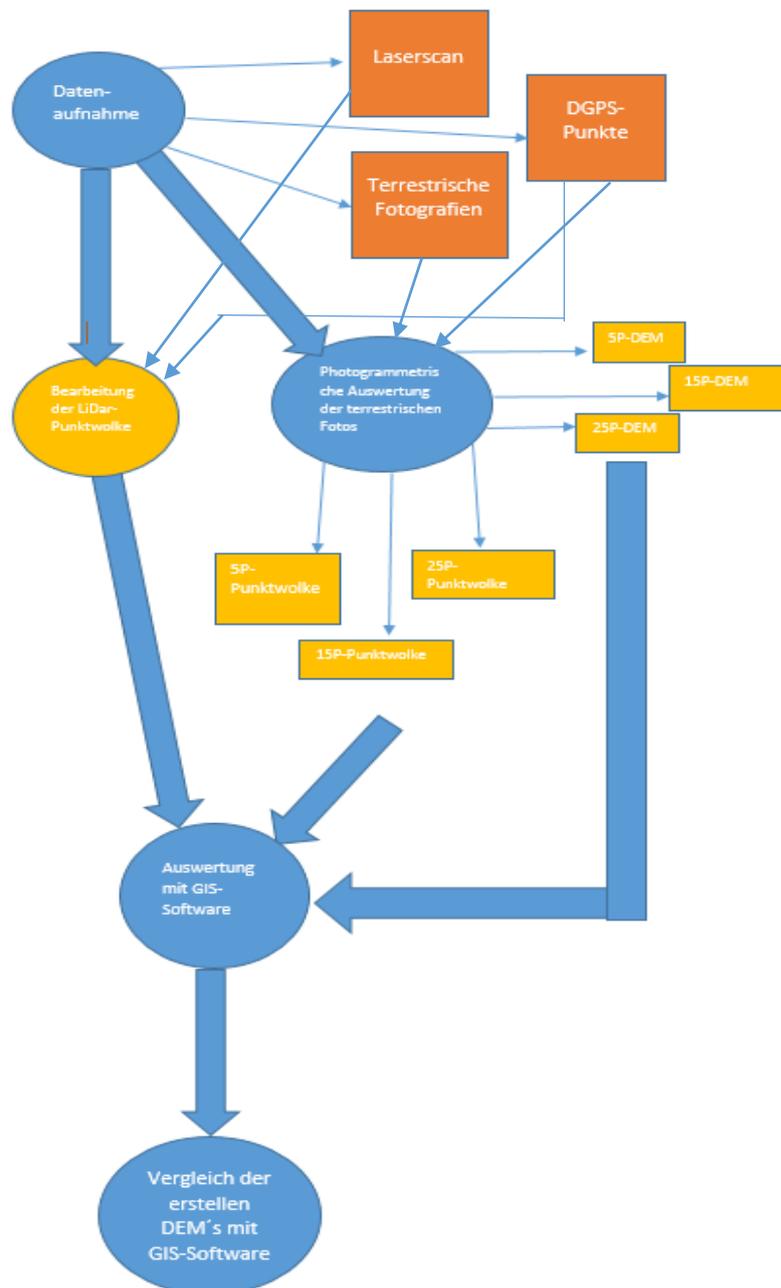


Abb.8: Flussdiagramm als Überblick der Vorgangsweise (Zangerle 2018)

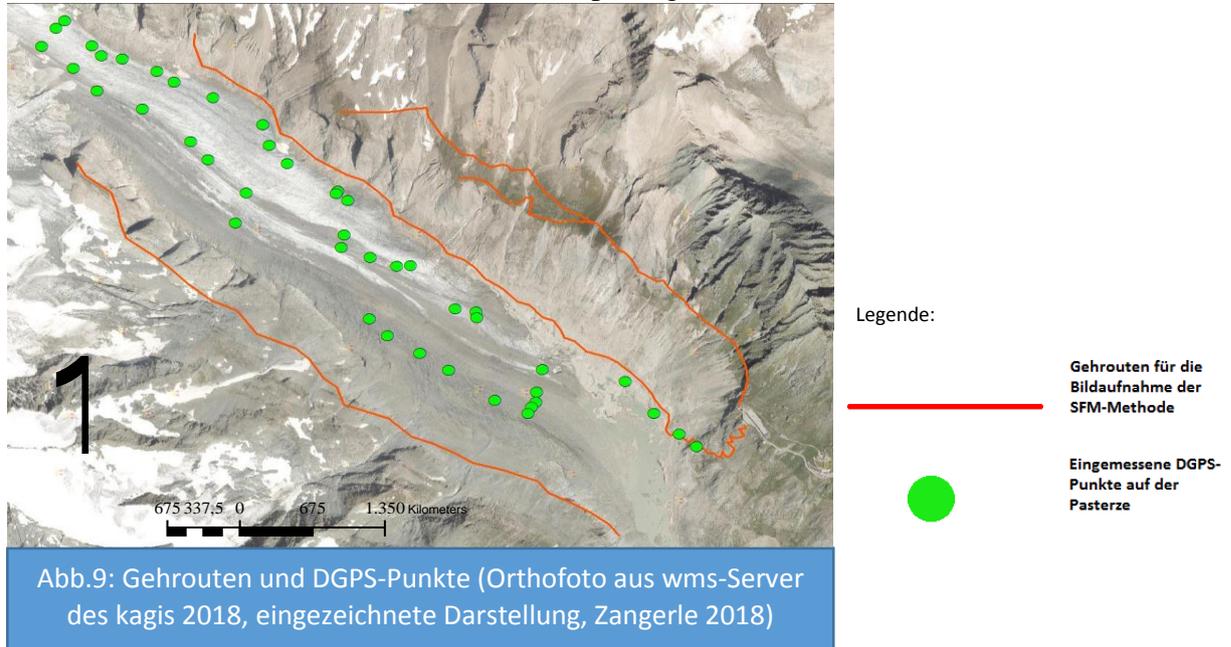
Die in Abbildung 8 orange dargestellten Rechtecke stellen die Arbeitsschritte der Datenerhebung dar. Die in Gelb dargestellten Rechtecke sind als Zwischenergebnisse zu sehen, welche sich aus den Arbeitsschritten ergeben. Der eine gelbe Kreis stellt einen Arbeitsschritt dar, welcher gleichzeitig *eine* fertige Punktwolke erzeugt. Die Kreise sind als Arbeitsschritte zu sehen. Sie sind mit Pfeilen in eine bestimmte Richtung verbunden.

Grundsätzlich ist das Ziel dieser Arbeit mit zwei unterschiedlichen Methoden jeweils ein möglichst hoch aufgelöstes dreidimensionales Modell der Pasterze zu erstellen. Diese Modelle sollen dann in weiter Folge vergleichbar gemacht werden. Daraus können Aussagen getroffen werden, welche Methodik besser für ein langfristiges Monitoring geeignet ist. Um den Vergleich der SFM-Methode und des TLS zu ermöglichen wurde eine Vorgangsweise entwickelt, die im Folgenden genauer erklärt wird beginnend mit der Datenaufnahme und der Arbeit im Gelände.

Zusammengefasst sollen drei DEM's und drei Dense Point Clouds mit der Agisoft-Software erstellt werden. Aus den drei Pointclouds werden wiederum drei DEM's diesmal mit ArcGIS erstellt. Hier ist von Interesse wie sich die DEM's durch die Bearbeitung von unterschiedlichen Programmen unterscheiden beziehungsweise ob diese identisch sind. Aus der Laserscan Punktwolke wurde ebenfalls ein DEM erstellt. Somit besteht also die Möglichkeit den Laserscan mit der SFM-Methode zu vergleichen.

4.2 Geländearbeit und Datenaufnahme

Am 30.08.2017 wurden die Daten für das SFM und den Laserscan aufgenommen. Das heißt konkret für die terrestrischen Bilder für die photogrammetrische Methode wurde in einer



Gruppe von drei Leuten Fotos mit unkalibrierten Digitalkameras gemacht. An Kameras kamen zwei Sony ILCE-5000 und eine Nikon D7100 für die SFM Bilder zum Einsatz. Die Fotos wurden in einem Winkel von oben nach unten in Richtung Gletscher gemacht. Es wurde darauf achtgegeben, dass ein möglichst großer Teil des Fotos mit Gletscher zu sehen ist und kein unnötiger Bereich, wie beispielsweise Himmel oder Felsen, abgelichtet wurde. Das spart Rechenzeit später in der Software. Zudem sind Überlappungsbereiche zwischen den Bildern notwendig, 60-80% Überlappung sind die Devise. In der Praxis wurden alle 30m ein Foto gemacht. Auf Abbildung 9 sind, wie auch in der Legende, die Gehrouten für das Fotografieren in Rot eingezeichnet auf welchen die Pasterze abfotografiert wurde. Die grünen Punkte stellen die eingemessenen DGPS (Differentielles Globales Positionierungssystem) Punkte dar. Die DGPS Punkte wurden in Zweierteams aufgenommen, um das spätere SFM-Modell korrekt zu entzerren und den Laserscan darüberzulegen. Beim Laserscan wurden dieselben DGPS Punkte verwendet. Dadurch wurde eine Fehlerquelle eliminiert. Insgesamt wurden 44 DPGS-Punkte aufgenommen. Einerseits wurden die Punkte an signifikanten Stellen eingemessen, andererseits wurden Fotos von eben diesen Stellen gemacht. Diese Fotos wurden in Folge dafür verwendet, um im späteren Verlauf die DGPS Punkte auf den SFM-Fotos zu markieren bzw. um die Stellen wieder verorten zu können. Trotz dieser Vorkehrung konnte jedoch nur ein Teil der DGPS-Punkte später im SFM-Modell bzw. auf den Bildern welche für das Modell

verwendet wurden, genau genug erkannt und somit genutzt werden. Aus demselben Grund konnten nicht alle DGPS-Punkte im Laserscan eingebunden werden. Bei meiner Arbeit wurden der Laserscan und die Datenaufnahme für die DEM-Erstellung via SFM am selben Tag durchgeführt. Was bedeutet, dass die selben GCP`s verwendet wurden und es zu keiner bzw. nur einer kleinen Veränderung dieser kam. Die Pasterze fließt mittlerweile kaum noch, da es wenig Nachschub von oben gibt, daher kann dieser Aspekt vernachlässigt werden. Weiteres werden in meiner Arbeit die bereits fertigen Modelle vorhergegangener Jahre verglichen und es wurden keine Modelle, basierend auf alten Daten erstellt. Daher kann diese Fehlerquelle ebenfalls ausgeschlossen werden.

Zeitgleich wurde der terrestrische Laserscan an drei Positionen erstellt. Die Positionen wurden so gewählt, dass die Pasterze gut erkannt werden kann und somit möglichst wenige Messschatten entstehen. Eine vollkommene Vermeidung von Messschatten war aufgrund der Morphologie des Geländes nicht möglich. Die Notwendigkeit einer zeitgleichen Aufnahme wird klar, wenn man bedenkt, dass sich Gletscher sehr rasch durch diverse Wetterbedingung ändern können. Speziell durch wetterbedingte Sicht, beispielsweise Nebel, Schnee, Regen oder Luftverunreinigungen, können die Bildqualität und Laserscanarbeitsweise beeinflussen. Je zeitnahe die Aufnahmen gemacht werden, desto geringer können die Unterschiede durch allfällige Lawinen und Stürze bzw. durch Wetter und Messschatten gehalten werden. Der Scan, sobald das Laserscangerät in Position gebracht und voreingestellt ist, geht vollautomatisch von staten. Die Dauer eines Scans pro Position belief sich auf ca. 70 Minuten. Der Scanner, ein Riegl VZ-6000, ist ein terrestrischer 3D Laser Scanner. Er ist besonders für Messungen mit großen

Laser Pulse Repetition Rate PRR (peak) ²⁾	30 kHz	50 kHz	150 kHz	300 kHz
Effective Measurement Rate (meas./sec) ²⁾	23,000	37,000	113,000	222,000
Max. Measurement Range ³⁾				
natural targets $\rho \geq 90\%$	6,000 m ⁴⁾	6,000 m ⁴⁾	4,200 m ⁴⁾	3,300 m ⁴⁾
natural targets $\rho \geq 20\%$	3,600 m	3,600 m ⁴⁾	2,400 m ⁴⁾	1,800 m ⁴⁾
Max. Number of Targets per Pulse ⁵⁾	15	15	10	9
NOHD (Nominal Ocular Hazard Distance) ⁶⁾	295 m	220 m	80 m	40 m
ENOH (Extended Nominal Ocular Hazard Distance) ⁶⁾	2,270 m	1,790 m	1,010 m	690 m

Abb.10: Laserscandaten des Scanners VZ-6000 (Datasheet des Riegl VZ-6000 , http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegl/downloads/RIEGL_VZ-6000_Datasheet_2017-09-01.pdf, abgerufen am 18.10.2018)

Distanzen und mit beschneiten und vereisten Flächen geeignet. Abb.8 zeigt die möglichen Messdistanzen des Scanners und die zugehörigen Messinformationen. Mit einer Puls Rate von 50kHz kann eine Messdistanz von 6000m maximal erreicht werden. Je höher die Laserpulsrate, desto kleiner wird die Messdistanz und desto kleiner wird die Anzahl der Targets pro Puls.

Als nächster Arbeitsschritt steht die Auswertung des Scans an. Diese Auswertung erfolgt mit der Software RiSCAN PRO.

4.3 Bearbeitung der LiDAR-Punktwolken

Die Software RiSCAN PRO dient zur Bearbeitung von Laserscan Daten welche mit Riegl 3D Laser Scannern erhoben wurden. Die Punktwolken, welche der Scanner liefert wurden aus drei unterschiedlichen Positionen aufgenommen. Im ersten Arbeitsschritt wird eine Position, welche den größten Anteil des Gletschers abdeckt mit den DGPS-Punkten versehen. Dadurch erhält diese das gewünschte Koordinatensystem. Der nächste Schritt dient dazu die Positionen zusammenzuführen. Es werden die Positionen mithilfe von Passpunkten und Referenzflächen markiert. Die Passpunkte wurden auf zwei unterschiedlichen Positionen markiert und dadurch kann die Software die beiden Positionen grob verbinden. Im Normalfall entsteht nun eine Punktwolke aus den beiden Positionen die einen mehr oder weniger großen Offset hat. Durch den folgenden Schritt mit dem Tool „Multi-Station-Adjustment“ (MSA) wird dieser Offset so klein als möglich gemacht. Oben genannte Referenzflächen werden auf der erhaltenen Punktwolke markiert, das MSA nähert diese Flächen aneinander an. Die Scanposition mit den markierten DGPS Punkten wird geblockt, das bedeutet, diese Position ändert ihre Lage nicht. Die andere nicht geblockte Position wird nun mit MSA an die Geblockte angepasst. Es wird darauf Acht gegeben, dass in jeder Achse, X Y und Z, mehrere Flächen gut verteilt auf der Wolke liegen. Nun erhält man, nach Abschluss der Rechendauer des MSA, eine Punktwolke aus zwei Positionen. Das MSA ist ein iterativer Prozess und die Positionen finden, je öfter der Prozess durchgeführt wird, somit immer besser zueinander. Der Prozess wurde mindestens fünfmal je Positionadjustierung durchgeführt Um die dritte Position anzupassen, werden diese Arbeitsschritte genauso wie oben beschrieben, um die dritte Position an die Position mit den DGPS Punkten anzupassen, durchgeführt. Um Rechenzeit zu sparen werden die Überlappungsbereiche der schlechteren Scanpositionen abgeschnitten und nur die genaueren Positionen werden erhalten. Schlussendlich sind alle Positionen vereinigt. Eventuelle Messschatten können aus anderen Positionen eingefügt werden, ebenfalls mit der MSA Methodik. Nun ist die Laserscanpunktwolke fertig. Da dieselben DPGS Punkte in der Agisoft-Software verwendet wurden, wurde gewährleistet, dass die Agisoftmodelle und das Laserscanmodell vergleichbar werden. Beim ersten Testvergleich des Laserscans mit einer Agisoft-Punktwolke, konnte eine Verkippung der DEM´s der verschiedenen Methoden zueinander festgestellt werden.

In dieser Abbildung 11 ist zu erkennen, dass der südwestliche Teil ist nach unten verkippt ist während der nördlichere Teil eher herausgekippt ist. Diese Verkipfung lässt keinen aussagekräftigen Vergleich zu. Um diese Verkipfung aufzuheben wird die Agisoft Punktvolke 25P

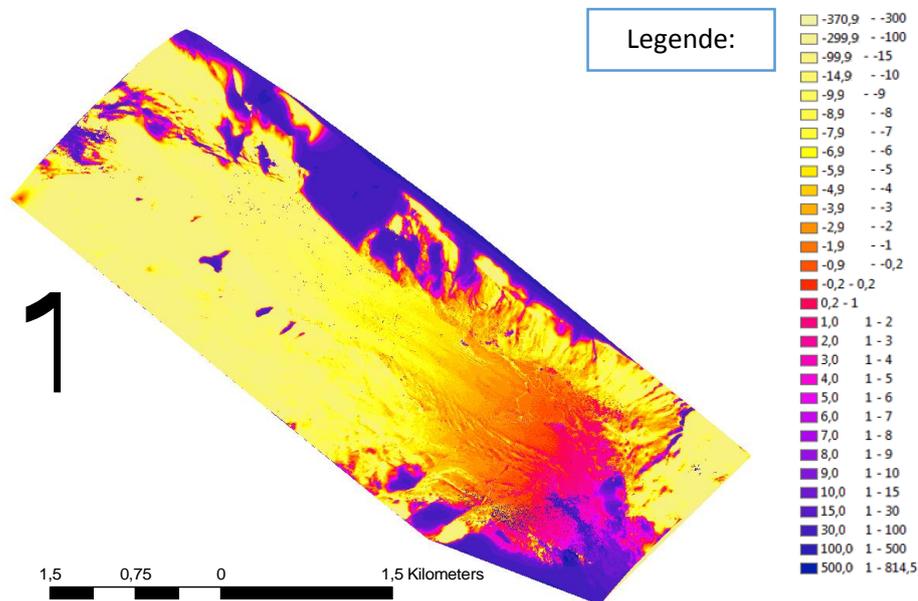


Abb.11: Darstellung der Verkipfung des Laserscans (Zangerle 2018)

an die Laserscan Punktvolke angepasst. Für die Methodik der Anpassung wurde ebenfalls die MSA-Methodik verwendet. Die Anpassung an den Laserscan erfolgte, weil dieser eine höhere Auflösung hat als die Agisoft Wolke. Umgekehrt, eine Anpassung an die Agisoftwolke hätte zur Folge, dass das ungenaue Modell als Referenz dienen würde. Nun sind alle Vorkehrungen getroffen um die Laserscanpunktvolken in das ArcGIS-Programm zu laden und um sie mit anderen Wolken zu vergleichen bzw. um anschauliche Hillshades erzeugen zu können.

4.4 Photogrammetrische Auswertung der terrestrischen Fotos

Die Software AgisoftPhotoscan erlaubt eine Erzeugung von 3D-Modellen aus unbewegten Bildern. Bei den Kameras ist nur auf eine vernünftige Auflösung zu achten, laut UserManual 5MPix oder mehr. Grundsätzlich gilt, je höher die Auflösung desto weiter entfernt darf der zu modellierende Punkt sein. Die Voraussetzung ist, dass das Darzustellende auf mehreren, mindestens zwei Bildern von unterschiedlichen Blickwinkeln aus erkennbar ist. Ein Teil der Bilder erforderte eine Nachbearbeitung. Jene Bereiche welche nicht für das Modell relevant waren wurden ausgeschwärzt bzw. wurde eine Maske darübergelegt. Die grundsätzliche Vorgangsweise des Programms war folgende:

- 1) Die Bilder werden in die Software geladen. Das Programm sucht daraufhin die Bilder nach gemeinsamen Punkten ab und die Punkte werden abgeglichen. Dadurch

erhält das Programm die Positionen der Kameras für jedes Bild. Das Ergebnis dieses Schrittes ist eine „sparse point cloud“ wie in Abbildung 12 ersichtlich und die Kamerapositionen.

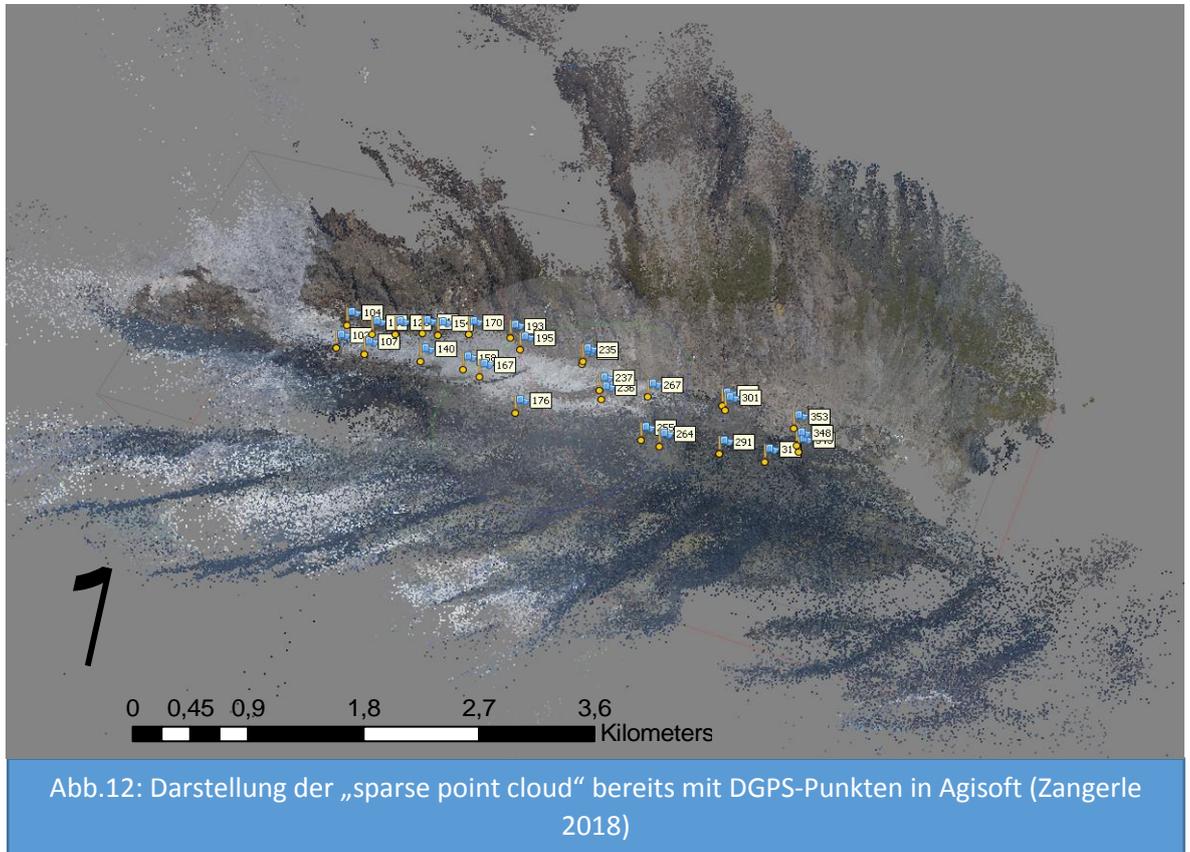
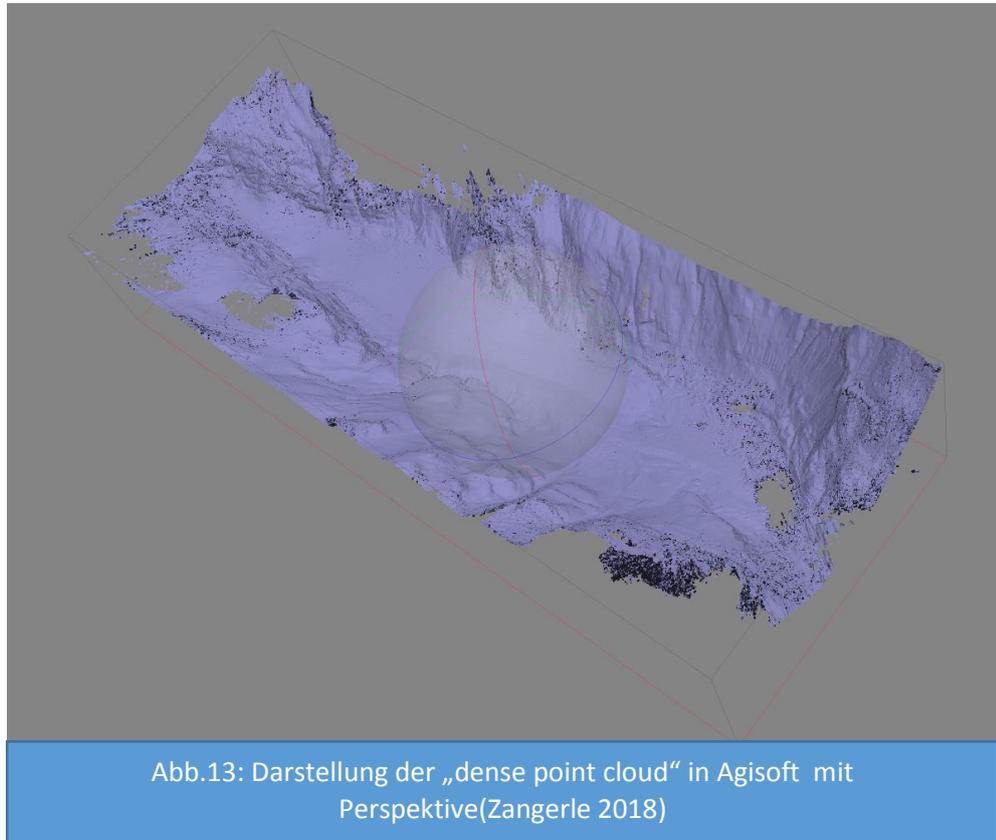


Abb.12: Darstellung der „sparse point cloud“ bereits mit DGPS-Punkten in Agisoft (Zangerle 2018)

- 2) Im nächsten Schritt wird eine „dense point cloud“ aus den Positionen und aus den Bildern erzeugt. Dieser Prozess geht vollautomatisch vonstatten ist jedoch rechen- und zeitintensiv.

- 3) Basierend auf zwei unterschiedlichen Algorithmen wird ein 3D-Polygon-Netz (mesh) erstellt. Dies ist gleichzeitig die Erstellung der Geometrie des Geländes.



Das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes ist in Abbildung 13 erkennbar.

- 4) Im letzten Schritt wird das Modell noch texturiert. Dieser Schritt ist nicht notwendig um ein DEM zu erstellen und dient nur der anschaulichen Darstellung.
- 5) Nachdem die DGPS-Daten in das Programm geladen wurden, mussten diese noch auf den Bildern verortet werden siehe Abbildung 14. Auf mindestens drei Bildern von unterschiedlichen Seiten aufgenommen, werden die Punkte manuell markiert. Eine Schwierigkeit stellte hier vor allem die Auflösung der Bilder dar. Bei zu tiefen Zoom waren die Pixel zu groß um eine genaue Verortung zu vorzunehmen. Das heißt, in vielen Fällen war von einer Seite die Zoomdistanz zu groß. Die Distanz von Fotoaufnahmeort zu DGPS Punkt lag zwischen 150 und 1800 Metern. Dieser Schritt ist insofern wichtig, als dass das programminterne Koordinatensystem in das gewünschte Koordinatensystem umgewandelt wird. Zudem kann durch diesen Schritt erst ein DEM erstellt werden.



- 6) Nun kann die Punktwolke und die erstellten DEM's exportiert werden. Es muss darauf geachtet werden, dass die Punktwolken und DEM's jedes Mal neu erstellt werden, sobald die DGPS Punkte verändert werden.

Durch die große Menge an verwendeten Bildern, ist der verwendete Computer (Prozessor Intel Core i7-6700kCPU 4.00GHz, Arbeitsspeicher 32 GB, NVIDIA Geforce GTX 970) an seine Grenzen gestoßen. Die Rechendauer einzelner Arbeitsschritte war bereits über 20 Stunden, obwohl es eine, bereits angesprochene, Vorbearbeitung der verwendeten Bilder welche, unnötige Rechenarbeit einsparen und somit den Over all Prozess beschleunigen sollte, gab. Zur Erstellung des DEM's war die Orientierung mittels GCP (Ground Control Points) notwendig. Diese wurden auf den Bildern markiert und dadurch erhielt das DEM eine Orientierung mit welcher das Höhenmodell erstellt werden konnte. Ein Höhenmodell kann grundsätzlich aus der sparse und aus der dense cloud erstellt werden. Laut UserManual von Agisoft ist die erreichbare Genauigkeit mit der dense point cloud höher, jedoch wird dadurch ebenfalls

die Rechenzeit erhöht. In dieser Arbeit wurde nur mit dense point clouds gearbeitet da eine hohe Genauigkeit angestrebt wird.

4.5 Vergleich von LiDAR- und photogrammetrischem DEM

Die Software „ArcGIS Pro“ stellt eine Lösungsmöglichkeit für die Auswertung der Punktwolken dar. In der „ArcToolbox“ sind alle verwendeten Werkzeuge zu finden. Da die ursprünglichen Punktwolken im asc (Ascii) –Format gespeichert sind, muss der erste Bearbeitungsschritt die Ascii-Files in ein bearbeitbares Format umwandeln. Das Tool „Ascii 3D to Feature Class“ erlaubt die Darstellung und darauffolgenden Bearbeitung der Daten. Die Daten werden mit diesem Tool importiert bzw. konvertiert, in diesem Fall XYZ-Format und stellt diese optisch dar.

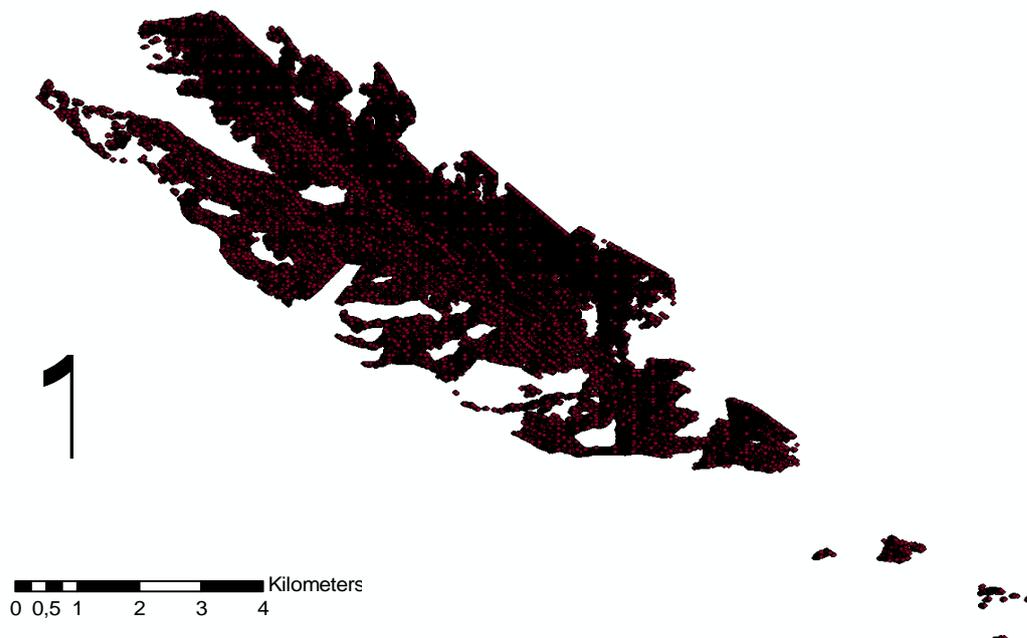


Abb.15: Darstellung einer Punktwolke mit dem Tool „Ascii 3D to Feature Class“ (Zangerle 2018)

Dadurch eine weitere Bearbeitung der Rasteroberfläche erst ermöglicht. Der Output ist in diesem Fall ein Multipoint-Feld mit einem „average point spacing“ von 1. In Abbildung 15 ist die Darstellung einer Punktwolke erkennbar. Im nächsten Bearbeitungsschritt wird aus diesen Punktdaten wiederum mittels „Natural Neighbor“ Tool eine Interpolation der Punkte durchgeführt. Das „Natural Neighbor“ Tool erstellt durch die Interpolation das Höhenmodell (DEM). Hierbei wurde das z-Shape ausgewählt, da das Hauptaugenmerk auf dem Höhenunterschied liegt und deshalb die Z-Achse erzeugt werden muss.

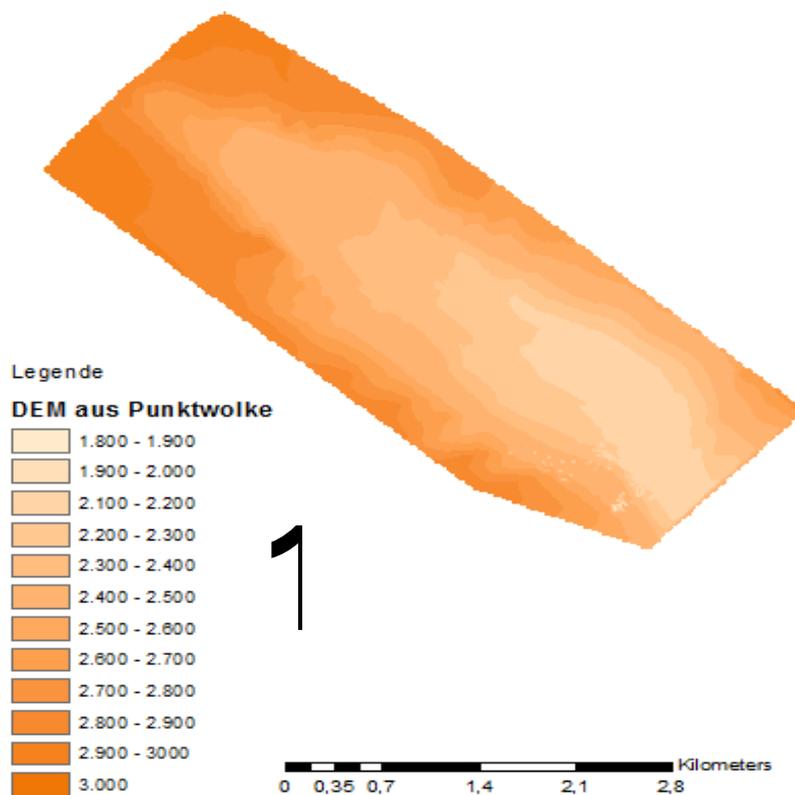


Abb.16: Darstellung eines DEM's erstellt aus der Punktwolke mit Natural Neighbour (Zangerle 2018)

Das erstellte DEM ist die Ausgangsbasis für die weitere Darstellung beispielsweise eines Hillshades. In der Abbildung 16 erkennt man die Höhenschichten in 100er Schritten farblich dargestellt. Es ist das Ergebnis aus der besprochenen Interpolation in Kombination mit einer Einteilung in 100m Schritten. Eine weitere anschauliche Darstellungsmöglichkeit ist das Hillshade. Dabei wird die Oberfläche dargestellt, die Beleuchtungswinkel und die Schatten werden dabei berücksichtigt. All diese Outputs können mithilfe der „ArcGIS Pro“ Software noch zusätzlich klassifiziert werden um anschauliche bzw. vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Schlussendlich wurde mit Hilfe des 3D Analyst Tools „Minus“ im Reiter „Raster Math“, der Unterschied zwischen den einzelnen Modellen errechnet. Das Tool „Minus“ subtrahiert ein DEM vom Anderen. Damit wird der Unterschied zwischen den beiden Methoden ersichtlich gemacht und es können Aussagen über bestimmte Prozesse gemacht werden.

Hynek et al. (2018) hat bei der EGU 2018 bereits erste Ergebnisse zu seinem photogrammetrischen Modell der Pasterze präsentiert. Am Ende der Ergebnisse werden Hynek's Modell mit dem photogrammetrischen Modell dieser Arbeit verglichen. Dadurch entsteht eine Möglichkeit, das SFM-Modell dieser Arbeit auf Plausibilität zu prüfen.

5. Ergebnisse

Zu Beginn werden die Ergebnisse beider Methoden vorgestellt, angefangen mit der Structure from Motion Methode in Kombination mit der Agisoft-Software und ArcGIS als Basis für die Darstellung und den Vergleich zwischen den Punktwolken bzw. den DEM's. Darauf folgen die Ergebnisse der zweiten Methode aus RISCAN PRO, ebenfalls dargestellt mit ArcGIS. Anschließend werden die Vergleiche von SFM und Laserscan dargestellt mit der GIS-Software. Zusätzlich ist ein dreidimensionales Modell, basierend auf einer photogrammetrischen Methode, der Pasterze aus dem Jahr 2015 vorhanden. Mit den erstellten Modellen des Laserscans und der SFM-Methode aus dem Jahr 2017 wird der Rückgang der Eisfläche in diesen zwei Jahren evaluiert. Außerdem wurde bereits ein photogrammetrisches Modell der Pasterze aus dem Jahr 2017 von Hynek erstellt. Mithilfe dieses Modells wird eine Validierung des hier erstellten photogrammetrischen Modells durchgeführt. Alle Abbildungen sind im Anhang verfügbar. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit, wurden nicht alle Abbildungen in den Ergebnissen dargestellt.

5.1 Ergebnisse Structure from Motion

Aus der Agisoft-Software wurden drei Punktwolken und drei DEM's erstellt mit einer unterschiedlichen Anzahl an GCP's. Wie in der Tabelle 2 ersichtlich, konnten mit weniger DGPS Punkten eine scheinbar höhere Genauigkeit erzielt werden. Das ergibt sich aber daraus, dass

Anzahl der DGPS-Punkte	Abweichung laut Agisoft in cm)
5	4,3
15	10
25	20

Tabelle 1: GCP's in Zusammenhang mit Abweichung in cm. (Zangerle 2018).

bei den wenigeren Punkten die besten Bilder verwendet wurden. Dieselben wurden natürlich ebenfalls für jene Modelle mit mehr Punkten verwendet, jedoch fallen sie dann nicht mehr so stark ins Gewicht. Umso mehr DGPS-Punkte verwendet wurden, auf umso mehr ungenaue

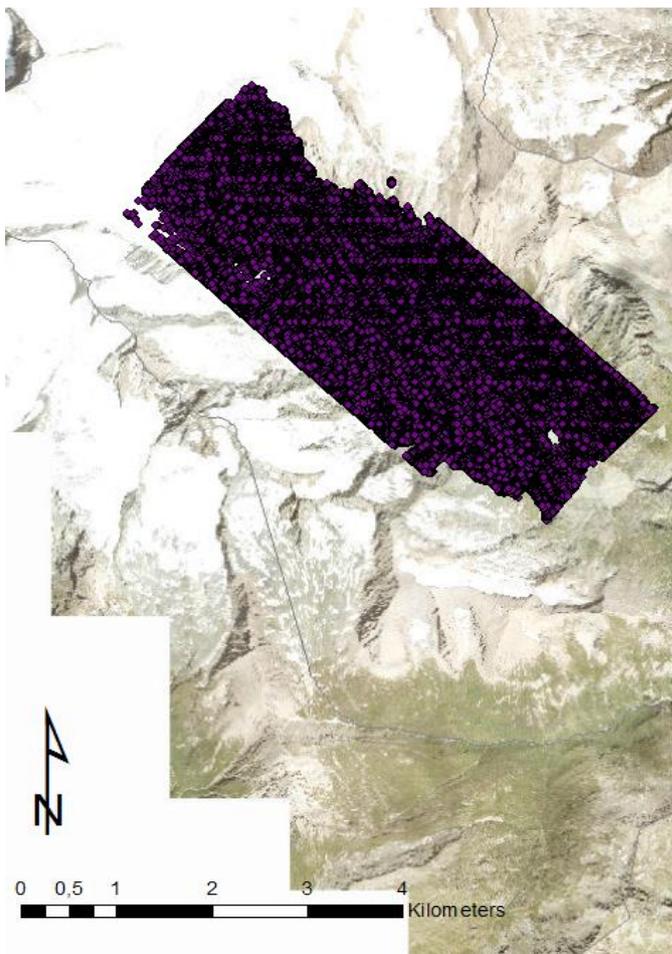


Abb.17: Darstellung der 5DGPS-Punktwolke in ArcGIS aus der AgisoftSoftware (Zangerle 2018)

Verortungen der DGPS-Punkte musste zurückgegriffen werden. Zudem musste darauf geachtet werden, dass die Verteilung der DGPS Punkte so homogen als möglich auf der Gletscherfläche stattfindet. In den sehr hohen und sehr tiefen Bereichen war das tendenziell schwieriger.

Jedes DEM hat eine zugehörige Punktwolke, das heißt die Paare wurden mit denselben DGPS Punkten versehen. Aus den Punktwolken, die dann in ArcGIS weiterbearbeitet wurden, wurden in ArcGIS wiederum DEM's erzeugt. Somit sind zwei DEM's, erstellt von unterschiedlichen Programmen pro Punktwolke, verfügbar.

In Abbildung 17 ist eine Punktwolke in ArcGIS mit der Umgebung als

Luftbild ersichtlich aus welcher ein DEM erstellt werden kann. Das DEM in Abbildung 18 ist jenes von der 15P-Punktwoke in 100 hm Sprüngen dargestellt. Durch die transparente Darstellung des DEM's ist der darunterliegende Gletscher erkennbar. Das Luftbild zeigt die Umgebung des Gletscherbereichs.

Das DEM zeigt, klassifiziert mit 100 hm Sprüngen, den Höhenverlauf auf der und um die Pasterze. Aus diesem DEM wird das anschauliche Hillshade erzeugt. Bei genauem Hinsehen, erkennt man im rechten unteren Teil des DEMs hellere Punkte, die so nicht stimmen

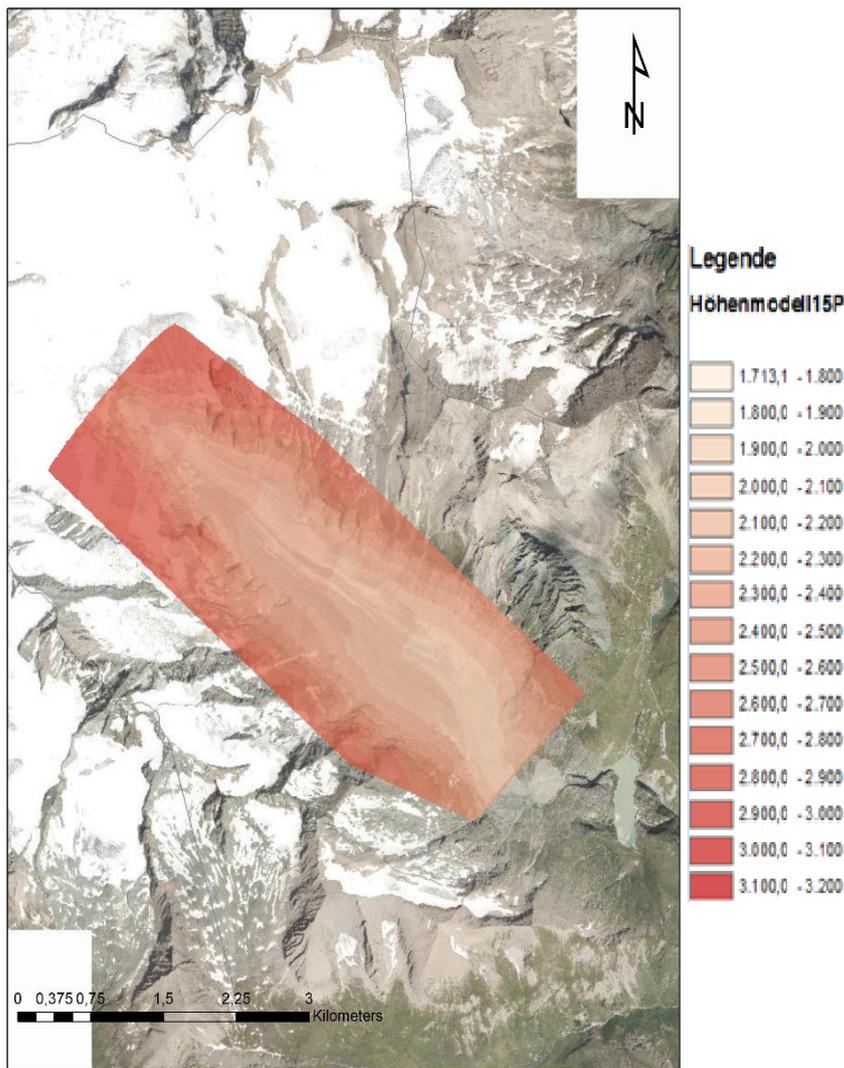


Abb.18: Darstellung des 15DGPS-DEM's erstellt aus der Punktwoke in ArcGIS (Zangerle 2018)

können. In diesem Bereich, konnten die Fotos nicht, nur teilweise oder falsch zugeordnet werden beziehungsweise gab es in diesem Teil auch zu wenige Bilder in guter Qualität. Solche Fehler erscheinen über die gesamte Gletscherfläche, im rechten unteren Teil sind sie sehr gehäuft und deshalb in Abbildung 19 dargestellt.

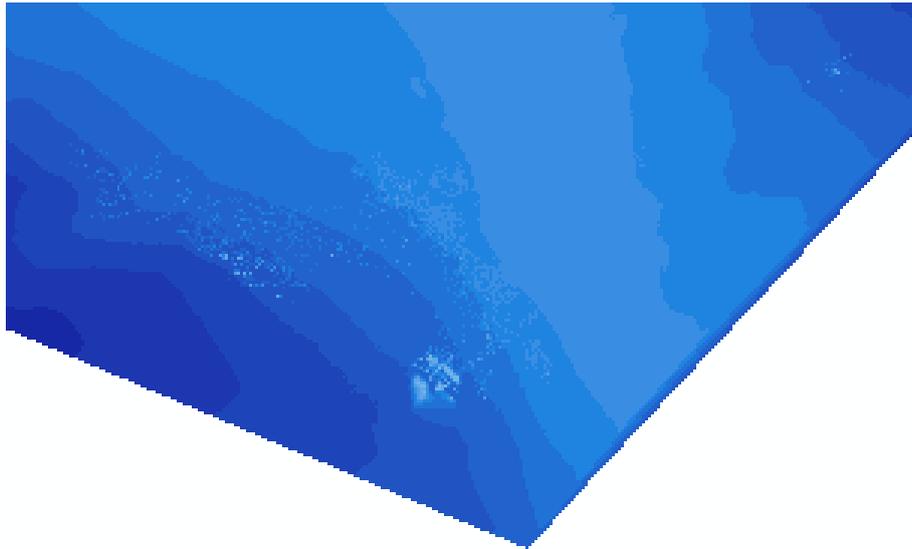


Abb.19: Darstellung der Fehler aus einem DEM (Zangerle 2018)

Offensichtlich ist in Abbildung 19 der normalerweise homogen verlaufende Höhenverlauf durch punkthafte Unschärfen gestört. Anzunehmen ist, dass die mangelnde Datenqualität für diese fehlerhafte Darstellung verantwortlich ist. Darauf soll aber in der Diskussion eingegangen werden. Welche Auswirkungen ein solch fehlerhaftes Ergebnis hat, soll ebenfalls in der Diskussion besprochen werden.

Abbildung 20 zeigt ein Hillshade auf dem die Oberfläche der Pasterze anschaulich dargestellt ist. Dieses Hillshade wurde wiederum aus dem photogrammetrischen 15P-DEM aus Abbildung 18 erstellt. Das Hillshade zeigt die Bereiche mit guter Bildabdeckung sehr detailgetreu,

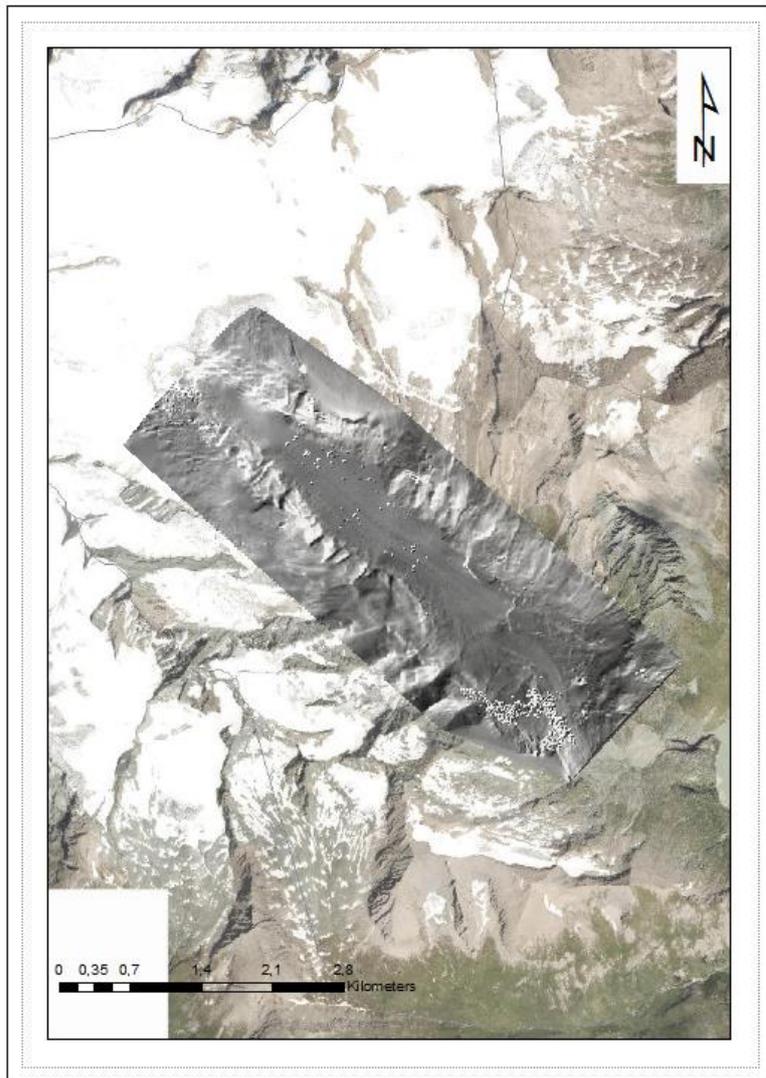


Abb.20: Hillshade aus DEM von Agisoft im ArcGIS erstellt (Zangerle 2018)

es sind teilweise Spalten und Gesteinsblöcke erkennbar. Die seitlichen Moränen und Erosionen sind sehr gut erkennbar. Außerdem gut erkennbar sind außen die nicht darstellbaren Bereiche. Da das Hauptaugenmerk auf der Eisfläche im Tiefen mittleren Bereich liegt, können diese nicht darstellbaren Bereiche im Randbereich vernachlässigt werden. Außerdem kann auf Abbildung 20 die durchgeführte Referenzierung mittels DGPS-Punkten kontrolliert werden. Das Hillschade in Abbildung 20 wurde mit einer Transparenz von 20% über das Luftbild gelegt. Optisch betrachtet liegen die Gerinne

und Kämme verglichen mit dem Luftbild sehr gut übereinander. Die Abweichungen von Luftbild und Hillshade sind als gering anzunehmen und optisch kaum bis nicht erkennbar. Optisch sind in Abbildung 20 gleich wie in Abbildung 19 die offensichtlichen Fehler, erkennbar als weiße Punkte, zu sehen.

Die Abbildung 21 zeigt die Differenz der beiden DEM's, das heißt das 15P DEM aus Agisoft-Photoscan wurde subtrahiert mit dem DEM, erstellt in ArcGIS aus der AgisoftPhotoscan-

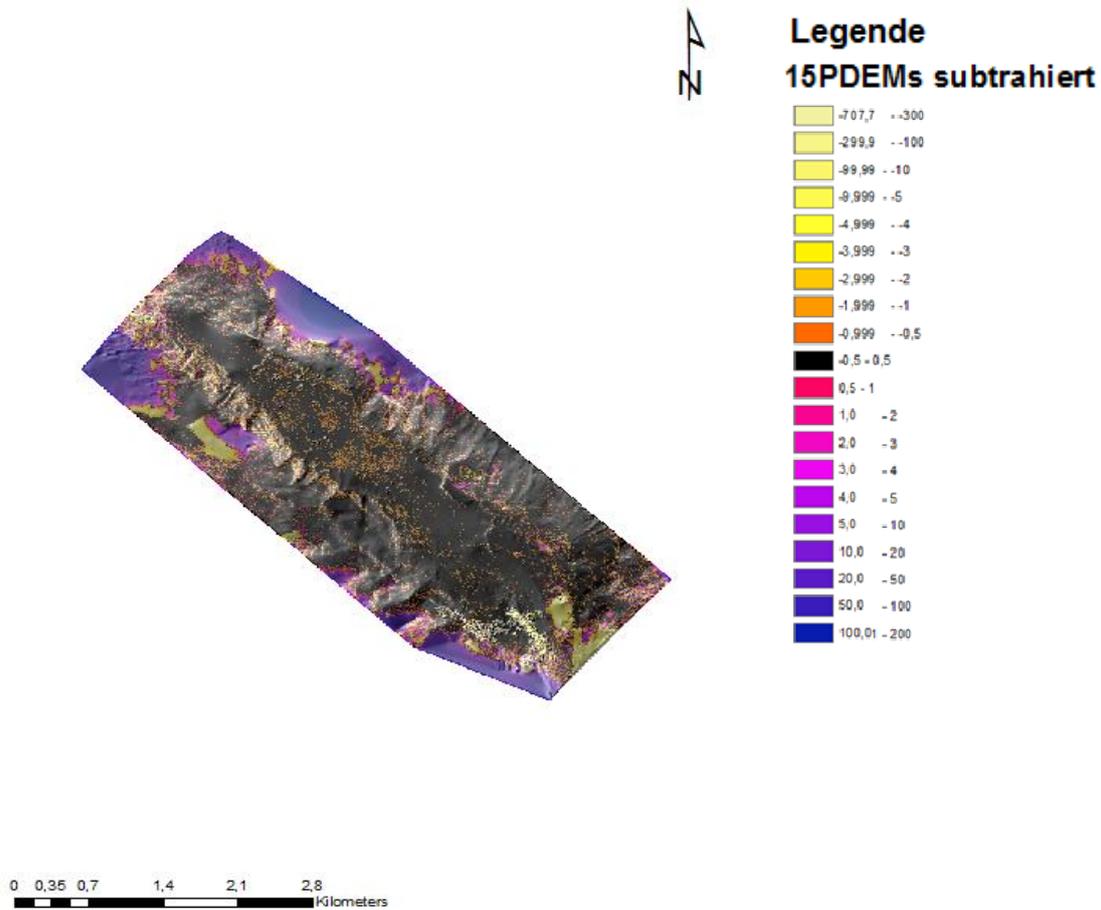


Abb.21: 15P DEM's aus AgisoftPhotoscan „Minus“ gerechnet mit dem Hillshade 40% transparent (Zangerle 2018)

Punktwolke. Weite Bereiche zeigen nur geringe Abweichungen zwischen den beiden DEM's in schwarz dargestellt. Daneben gibt es große Bereiche welche nicht dargestellt werden konnten, in blau und im gelblichen Farbbereich. Die orangen und rötlichen Bereiche zeigen Flächen mit geringen Abweichungen von den beiden DEM's. Da die beiden DEM's auf derselben Punktwolke basieren, sind die kleinen Unterschiede im Nahbereich schwierig erklärbar. Welche Quellen der Ungenauigkeit es geben kann wird später noch diskutiert.

5.2 Ergebnisse aus RiscScan

Beginnend mit der Punktwolke aus dem Laserscan, wurde wiederum ein Höhenmodell und ein Hillshade erstellt. Wie in Abbildung 22 ersichtlich, ist die abgedeckte Fläche des Laserscanners sehr viel größer als jener Bereich von der photogrammetrischen Methode. Außerdem sind in Abbildung 22 Messschatten zu erkennen, welche vom Scanner nicht erreicht worden sind. Wird daraus wiederum ein DEM erstellt, wie in Abbildung 22 ersichtlich, interpoliert das „Natural Neighbor Tool“ die Messschatten. Das Höhenmodell zeigt beim Laserscan keine unpassenden Bereiche auf. Das DEM erscheint sehr homogen.

Da der Scanbereich des Laserscanners weiter ist als der abfotografierte Bereich, ist bei diesem DEM der Höhenbereich ebenfalls größer. Beim weiteren Vergleich der Höhenmodelle kann nur der sich überdeckende Bereich verglichen werden. Die NaturalNeighbor Interpolation in-

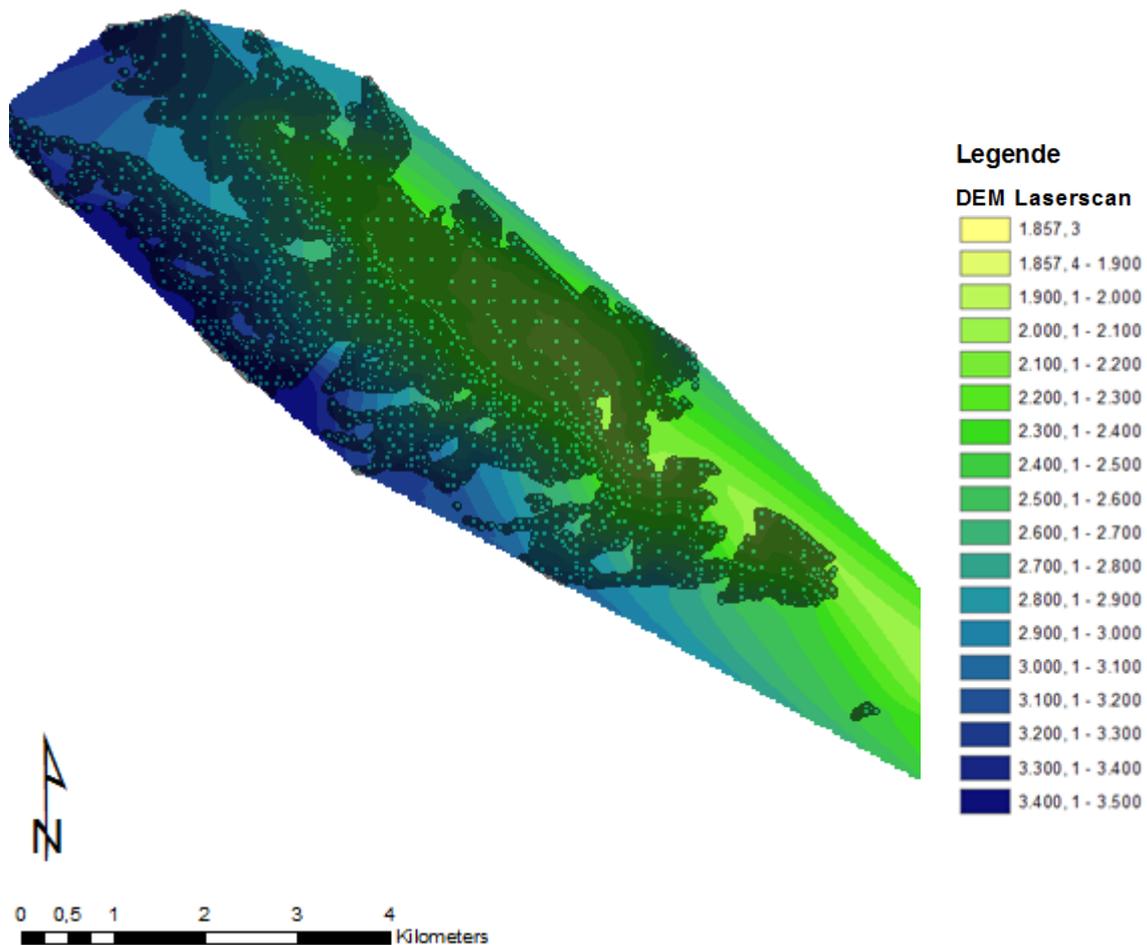


Abb.22: DEM aus dem Laserscan mit der Punktwolke 40% transparent (Zangerle 2018)

terpoliert über die gesamte Fläche, auch über Messschatten hinweg.

Beim Hillshade des Laserscans sind weite Bereiche des Scans glatt dargestellt ersichtlich in Abbildung 23. In diesen Bereichen hat das Natural Neighbor Tool wiederum fehlende Werte

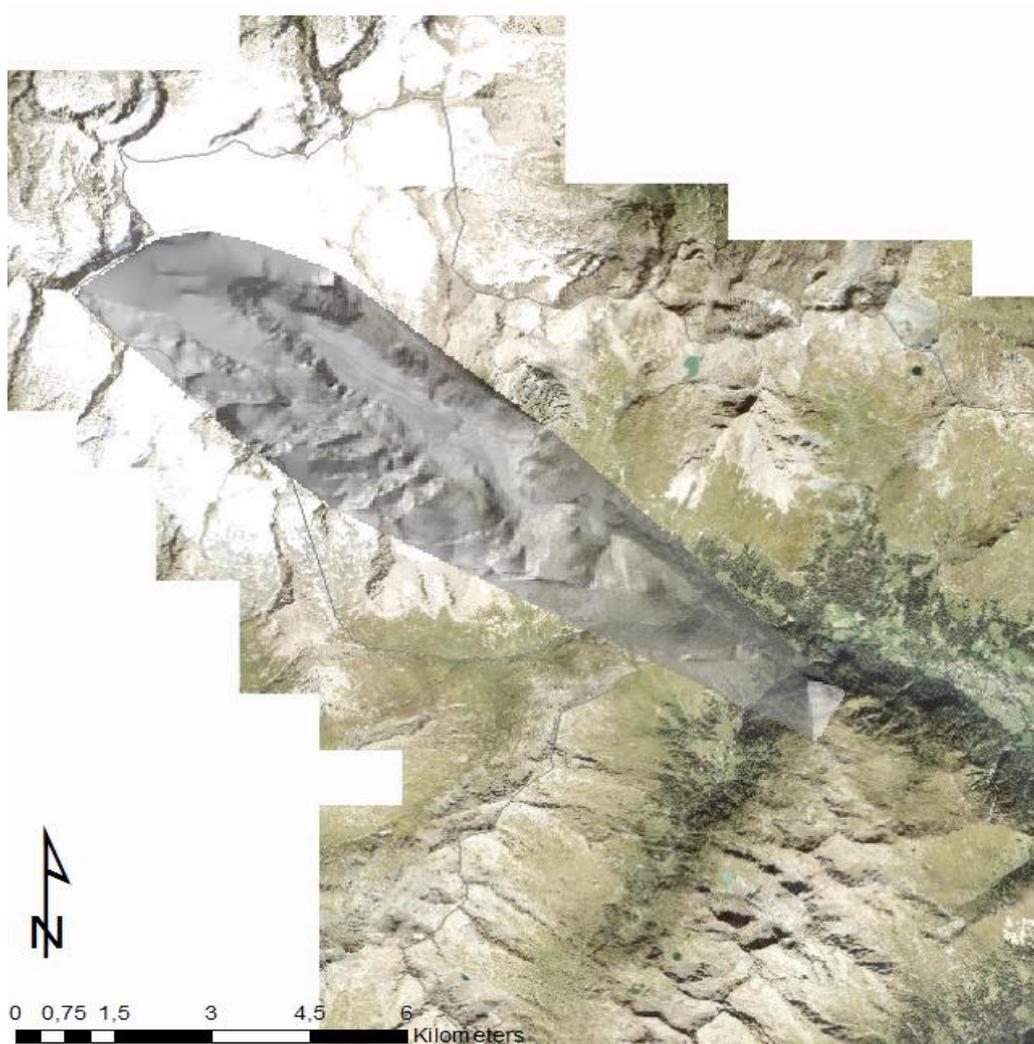


Abb.23: Hillshade erstellt in ArcGIS aus dem Laserscan (Zangerle 2018)

interpoliert, im Hillshade sind die Messschatten gut erkennbar. Jedoch scheint der Großteil der vergletscherten Pasterze bzw. der Pasterzenboden sehr gut abgebildet zu sein. Das sehr anschauliche Hillshade des Laserscans lässt beim Hineinzoomen einzelne Gesteinsblöcke erkennen. Auf dem Gletscher sind kleine Spalten und sogar Kanäle von Schmelzwasser an der Oberfläche erkennbar.

Nun bei der wohl aussagekräftigsten Abbildung dieser Arbeit, bei der Abbildung 24, wurde das DEM aus dem 25P SFM-Modell minus dem DEM des Laserscans gerechnet. Wiederum der schwarze Bereich von -1m bis 1m stellt den Schwankungsbereich der Messmethoden dar. Es gibt einen weiten Bereich der sich nahe des Schwankungsbereichs der Messmethode befindet, dargestellt im grünlichen und gelblichen Bereich. Die falsch ausgerichteten Bilder und Messschatten des Laserscanners erzeugen den nicht darstellbaren Bereich, in der Abbildung

24 weiß hinterlegt. Ebenso sind hier im rechten unteren Bereich, also der südliche Teil des Modells, Messfehler ersichtlich. Diese Messfehler haben sich aus dem 25P Modell in das neue „Minus-Modell“ weiter fortgepflanzt. Außerdem scheint der östliche Teil tendenziell überhöht und der westliche Teil eher abgesenkt zu sein. Weiteres soll erwähnt sein, dass die Pixelseitenlänge 10m ist, was bei der Interpretation der Ergebnisse noch berücksichtigt werden wird. Zudem gibt es einen leichten Schnitt der von Nordost nach Südwest verläuft. Dieser Schnitt ist jener Teil des Laserscans, der zusammengebaut wurde. Erkennbar ist der Schnitt am dunkelblauen Bereich auf der Gletscherzunge. Darauf wird in der Diskussion noch eingegangen.

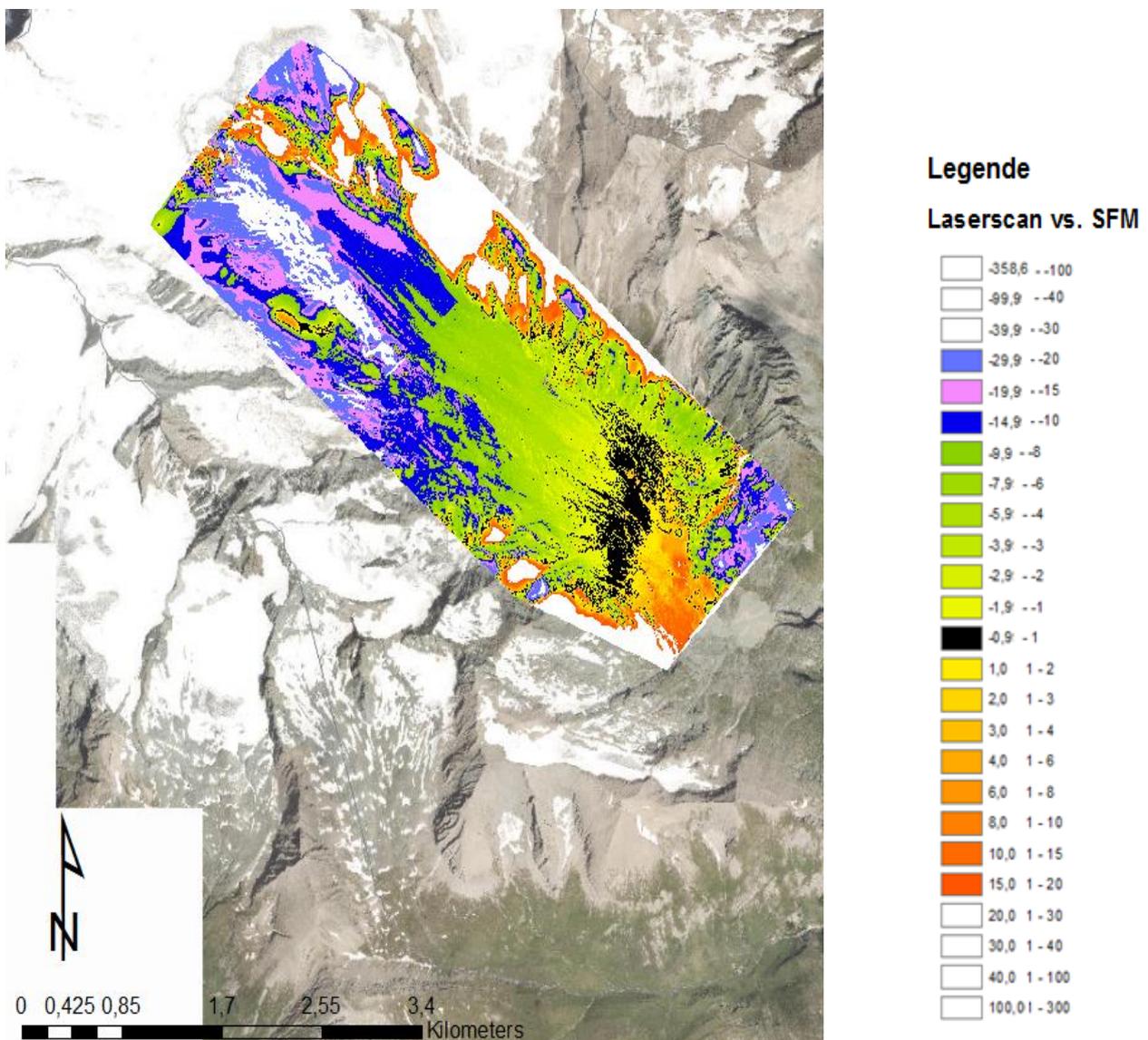


Abb.24: DEM 25P aus SFM „minus“ DEM aus dem Laserscan (Zangerle 2018)

Das Histogramm in Abbildung 25 gehört zu der Auswertung von Abbildung 24. Dargestellt ist die Standardabweichung der Abweichungswerte zwischen den beiden DEM's. Erkennbar ist, dass der Großteil der Werte sich um Null streut. Nur ein verhältnismäßig geringer Anteil ist in den äußeren Teilen der Glockenkurve angesiedelt.

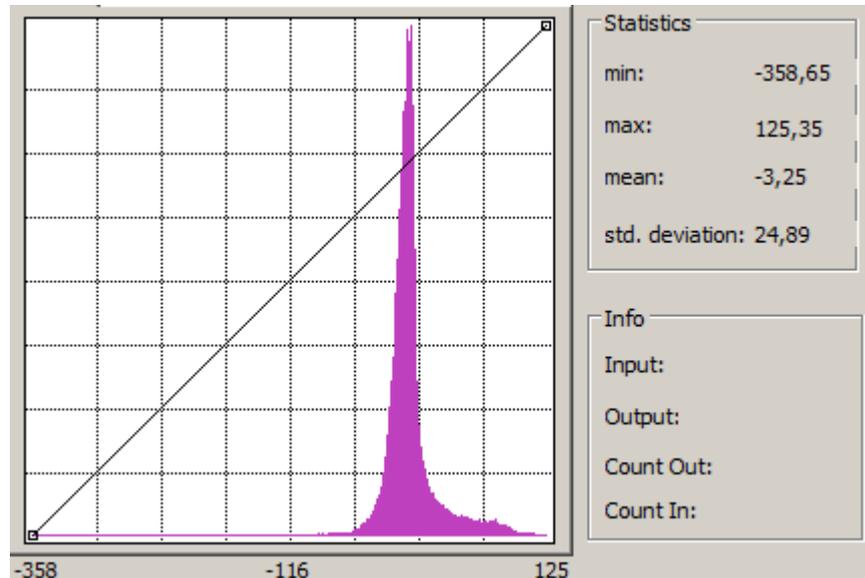


Abb.25: Darstellung der Standardabweichung der Abbildung 24 mittels Histogramm (Zangerle 2018)

5.3 Update zu Abbildung 2 Langzeitreihe

In Abbildung 26 und Abbildung 27 ist die Entwicklung der Gletscherfläche der Pasterze dargestellt. Das aktuell in dieser Arbeit erstellte DEM aus dem Jahr 2017 aus Agisoft „minus“ dem Modell 2015 ist in Abbildung 26 dargestellt. Es zeigt den Rückgang des Gletschereises in den zwei Jahren. Die Talflanken zeigen ebenso einen Rückgang auf wie die Fläche am Pasterzenboden. Laut Legende ist der maximale Rückgang des Eises 30m-50m. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass in den vorherigen Rechenschritten die Pixelseitenlänge 10m gewählt wurde. Dies hat natürlich einen Einfluss auf die Ergebnisse. Verglichen mit den Ergebnissen von Hynek in Abbildung 26 scheint das Ergebnis aber dennoch valide. Der Bereich auf der

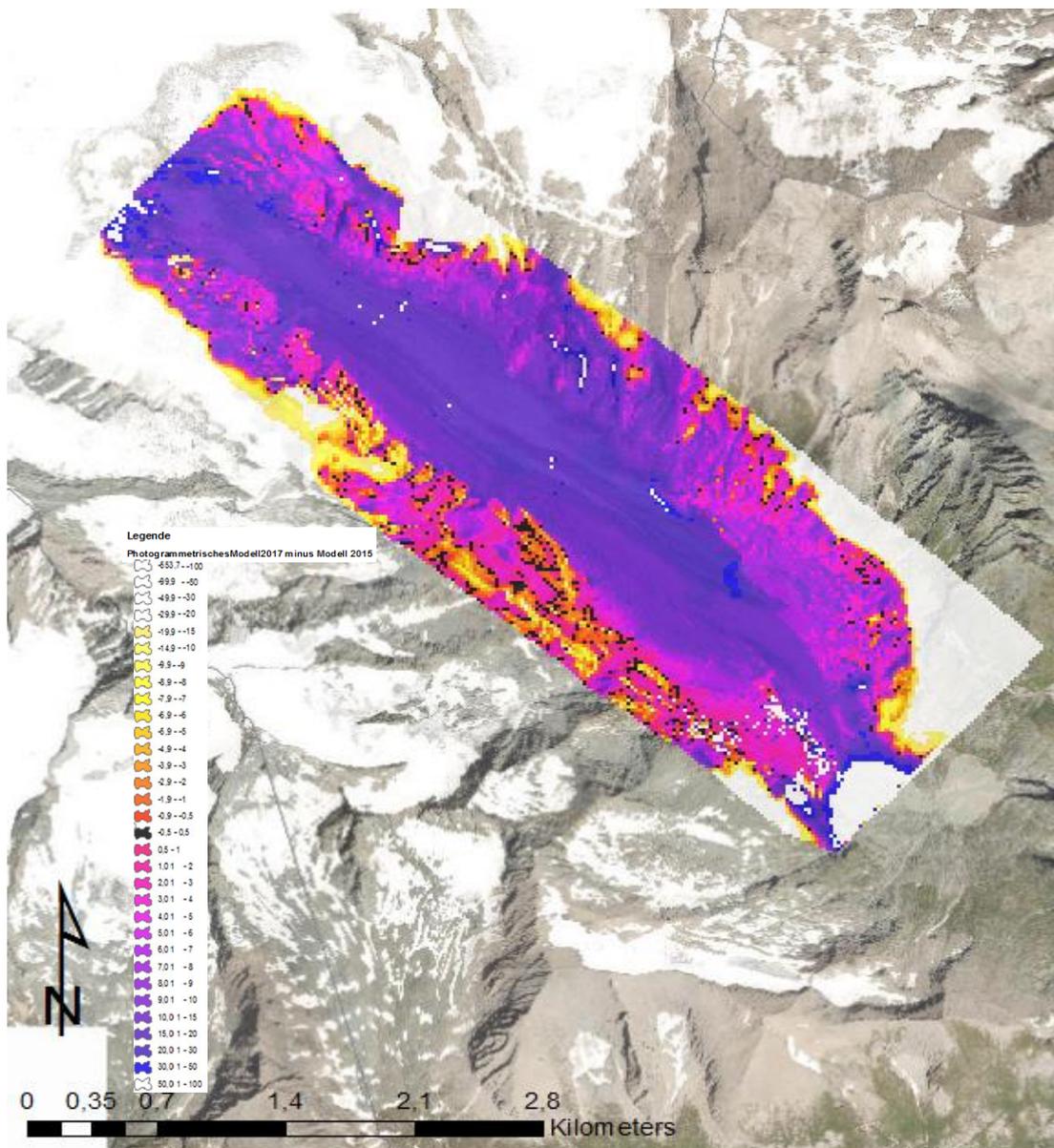
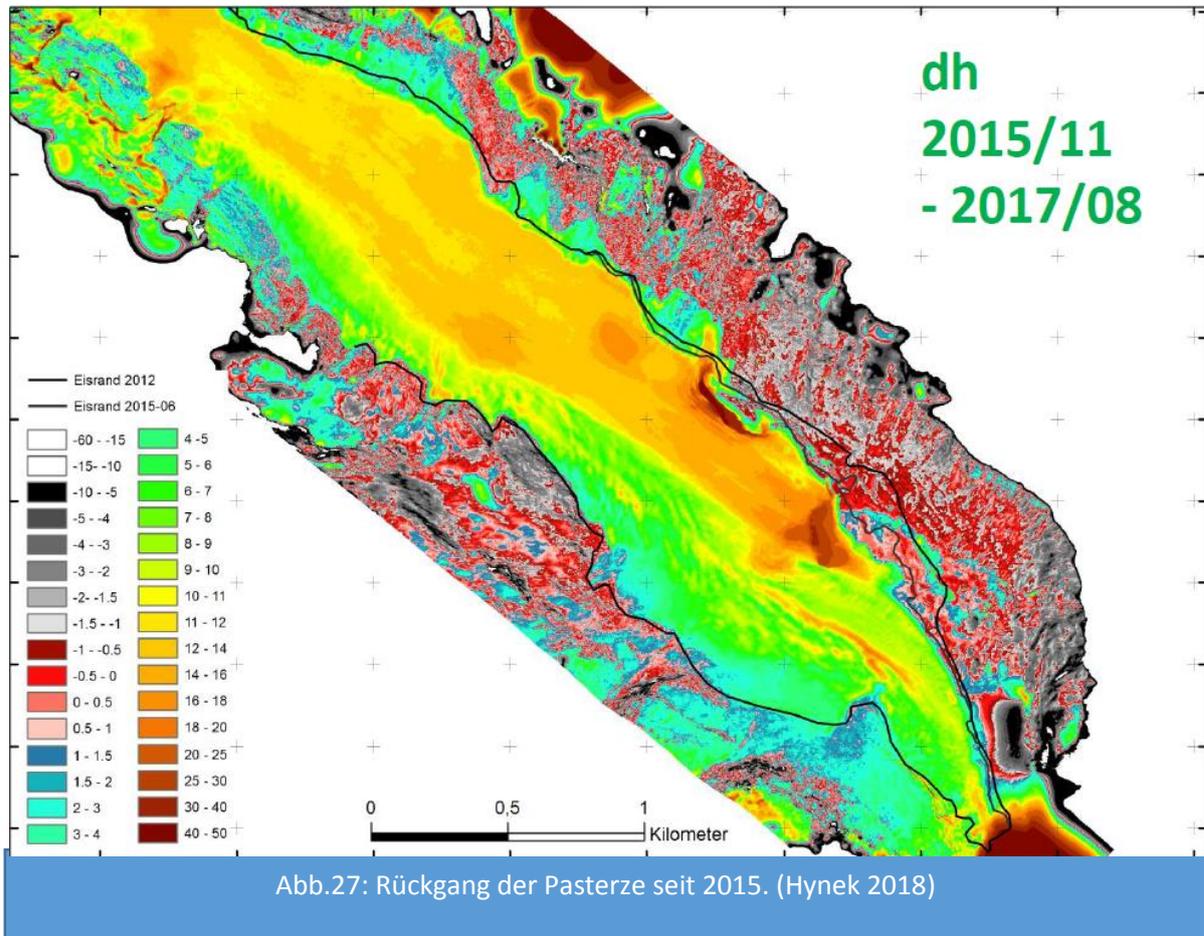


Abb.26: Veränderung der Eisdicke seit 2015 (Zangerle 2018)

Gletscherzunge bewegt sich im 10m bis 30m Rückgang Bereich was sich auch mit den Ergebnissen von Hynek deckt siehe Abbildung 27. An den Talflanken ist in Abbildung 26 ebenfalls ein Rückgang im niedrigen Meterbereich zu erkennen. Der Übergangsbereich von Talflanke auf Gletscherzunge weist einen Rückgang von 4-10m auf. Dieser Bereich ist zwar noch teilweise vergletschert, ist aber mit Geröll und Geschiebe überdeckt.



Von Hynek die Abbildung 27 stellt einen ähnlichen Rückgang dar. Die Abbildung 27 zeigt auf dem Pasterzenboden ein Rückgang von 10m bis 30m sehr homogen. Der grüne äußere Bereich ist nicht, oder nicht mehr von Eis bedeckt. Hier handelt es sich um die Seitenflanken des Tals welche in früheren Perioden von Eis bedeckt war. Der orange bis rote Bereich zeigt einen Rückgang der Eisfläche von bis maximal 50m. Die Ergebnisse in Abbildung 27 decken sich Großteils mit den Ergebnissen dieser Arbeit, wobei die Auflösung der Abbildungen dieser Arbeit geringer ist. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Eisfläche, daher ist der äußere Bereich der Pasterze nicht von Interesse. Die einzelnen weißen Punkte auf der Gletscherzunge in Abbildung 26 sind tendenziell auf Messfehler und unerfahrene Arbeitsweise zurückzuführen. Die geringere Auflösung von Abbildung 26 im Vergleich zu Abbildung 37 ist auf die

Rechenleistung der verwendeten Rechengeräte zurückzuführen. Wie Hynek die genauen Eisränder des Gletschers eruieren konnte ist nicht klar. Speziell der am tiefsten gelegene Teil zeigt auf den mittlerweile historischen Luftbildern bereits einen Gletschersee und kein Eis mehr siehe Abbildung 28.

6. Diskussion

Grundsätzlich werden in der Diskussion die Ergebnisse besprochen, welche Vor- und Nachteile der jeweiligen Methode zugeordnet werden kann und wie die Ergebnisse zustande gekommen sind. Die Ergebnisse werden mit früheren Arbeiten verglichen und auf ihre Validität geprüft. Besondere Aspekte sind die Genauigkeit der Methoden, welche Informationen aus den Methoden erhalten werden können und was mit diesen Informationen gemacht werden kann. Dieser Teil soll Aufschluss über die erste Fragestellung dieser Arbeit geben. Weiteres sind geeignete Positionen für die Scans zu erörtern bzw. welche Gehrouten für die SFM-Aufnahme geeignet ist. Dabei soll ebenso der finanzielle Teil der Arbeit berücksichtigt werden, genauso wie der zeitliche Aufwand. Außerdem wurde die Abbildung 2 geupdatet. Die Eisdickenänderung seit 2015 ist ebenfalls ein Teil dieser Arbeit und was daraus geschlossen werden kann. Hierbei wird ein Vergleich mit den Ergebnissen von Hynek durchgeführt. Schlussendlich wird noch ein Ausblick auf mögliche zukünftige Arbeiten gegeben, welche in diesem Zusammenhang als sinnvoll erachtet werden.

Für diese Arbeit wurde mit zwei unterschiedlichen Methoden gearbeitet um dasselbe Ziel zu erreichen. Das Ziel war ein möglichst hoch aufgelöstes DEM zu erhalten. Bei der SFM-Methode sind an Daten Fotos von unkalibrierten Digitalkameras nötig, mit DGPS-Punkten für die Referenzierung und die Entzerrung, bei der anderen Methode ein Laserscan ebenso mit DGPS-Punkten zur Referenzierung. Das Ergebnis ist bei beiden Methoden ein Höhenmodell mit einer unterschiedlichen Auflösung. Grundsätzlich unterscheiden sich bereits die erstellten Punktwolken voneinander. Der Laserscan erzeugt eine Wolke über einen weiteren Bereich als die Photogrammetrie. Ursache dafür ist die Art der Datenaufnahme. Bei der Photogrammetrie wird nur exakt der benötigte Bereich aufgenommen. Der Laserscanner nimmt den gesamten, von Lasern abgetasteter Bereich auf. Dieser Bereich muss erst in der Nachbearbeitung ausgebessert werden. Generell ist die Nachbereitung des Laserscans mit ein wenig Arbeitserfahrung sehr rasch durchführbar, da lediglich die Scanposition zusammengeführt werden müssen. Hingegen ist die Nachbereitung der Photogrammetrischen Methode in AgisoftPhotoscan immer ein zeitintensiver Prozess. Außerdem ist auf falsch zugeordnete Bilder während des «Align-Prozesses» in AgisoftPhotoscan acht zu geben. Einerseits kann dadurch die Punktwolke und somit das DEM verfälscht werden, andererseits fehlen diese Bilder dann andernorts wo sie korrekt aligned wären. Die Abbildung 19 zeigt einen Bereich an dem falsch zugeord-

nete Bilder Fehler erzeugt haben. Angenommen dieser Prozess würde noch einmal durchgeführt werden, können durch die gewonnene Arbeitserfahrung solche Fehlerquellen besser ausgeschlossen werden. Optisch verglichen ist bezüglich der Hillshades jenes vom Laserscan detaillierter. Beachtet werden muss aber, dass die Hillshades aus den DEM's erstellt wurden. Das heißt, die Auflösung wird unter anderem auch von der Rechenleistung des verwendeten Computers bestimmt und nicht nur von der Methodik der Punktwolkenerstellung. Die Details im Hillshade vom Laserscan sind besser erkennbar und es können sogar Oberflächenabflüsse auf der Gletscheroberfläche erkannt werden. Ob diese Details besser mit einem mächtigeren Rechner dargestellt werden können ist jedoch nicht klar. Außerdem sind die Hillshades sehr gut geeignet, interpolierte Flächen zu erkennen und Fehler im DEM erkennbar zu machen.

Die Photogrammetrie Software bietet die Möglichkeit einerseits eine Punktwolke des DEM's zu exportieren und andererseits ein fertiges DEM zu exportieren. Aus der Punktwolke wurde in der GIS-Software ebenfalls ein DEM erstellt. Nun wurden die beiden grundsätzlich selben DEM's voneinander subtrahiert und in Abbildung 21 dargestellt. Weite Bereiche zeigen keine bis kaum Abweichungen von einander schwarz dargestellt. Speziell in interpolierten Bereichen sind die Abweichungen von den beiden DEM's sehr groß. Auch hier in dieser Abbildung 21 sind die Interpolierten Bereiche gut erkennbar. Die interpolierten Bereiche sind Großteils im violetten und blauen Bereich angesiedelt, während die falsch zugeordneten Bilder sich tendenziell eher im gelblichen Bereich befinden. Die Gletscherfläche, welche Großteils schwarz also ohne Unterschiede ist, ist aber konstant mit Punkten durchzogen die so nicht stimmen können. Die Gründe für diese Art von Abweichungen sind nicht bekannt. Geschlossen werden kann, dass die Gletscherzunge deshalb schwarz dargestellt ist, weil bei den Fotografien das Hauptaugenmerk auf der Gletscherzunge lag. Die Abweichungen können von den falsch zugeordneten Bildern kommen. Bezüglich der Punktwolke aus dem Laserscan wurde bereits die größere Fläche im Verhältnis zu der Punktwolke aus der SFM-Methode angesprochen. Das hat zur Folge, dass weite Teile durch die Natural Neighbour Interpolation aufgefüllt werden, da es zu Messschatten während des Scanprozesses gekommen ist. Außerdem ist der erreichte Höhenbereich des Laserscanners weiter. Der Laserscanner erreichte ein Gebiet von 1857m bis knapp 3500m während bei der SFM-Methodik 1713m bis 3200m abgedeckt werden.

Nach der Anpassung der photogrammetrischen Punktwolke an die Laserscanpunktwolke wurden diese beiden voneinander subtrahiert dargestellt in Abbildung 24. Der Anpassungsprozess soll gewährleisten, dass die Verkippung der einen Punktwolke so aufgehoben wird, als dass

diese nach dem Prozess sauber übereinanderliegen. Eine Entzerrung soll durch diesen Prozess nicht stattfinden. Grundsätzlich kann aus der Abbildung 24 entnommen werden, dass der Anpassungsprozess nicht vollständig funktioniert hat. Der untere Bereich der Pasterze scheint tendenziell nach unten gekippt zu sein, während der obere Bereich herauszuragen scheint. Zudem ist im westlichen Bereich des Pasterzenbodens, an der Stelle wo der dunkelblaue Bereich beginnt eine sehr gerade Begrenzung zwischen blau und grün zu erkennen. An dieser Stelle wurde eine Scanposition angefügt, wobei bei diesem Prozess vermutlich unsauber gearbeitet wurde. Generell bewegen sich die Abweichungen der beiden Punktwolken am Pasterzenboden, auf dem das Hauptaugenmerk liegt, zwischen -15m und 10m. Auch hierbei muss berücksichtigt werden, dass gewisse Punkte durch falsch zugeordnete Bilder vermutlich die maximalen Ausreißer widerspiegeln. Genauer konnten die beiden DEM's in diesem Prozess nicht angepasst werden. Bezüglich des Histogramms aus Abbildung 25 ist erkennbar, dass ein Großteil der Werte um Null gestreut ist. Ziel wäre es, die Werte aus den äußeren Bereichen mehr Richtung Null zu bewegen bzw. die Standardabweichung gegen Null zu bringen.

Bezüglich der Forschungsfrage 1 kann auf die Abbildung 26 und Abbildung 27 eingegangen werden. Jener Bereich der als vollkommen unverändert angenommen werden kann ist schwarz dargestellt. Grundsätzlich müssten weite Bereiche der Talflanken, speziell der felsige Bereich, ebenfalls schwarz sein, da es wenige Änderungen dieser Fläche gegeben haben kann. Tatsächlich ist nur ein verhältnismäßig kleiner Teil schwarz dargestellt. Weiß wurde jener Bereich markiert, welcher entweder von Messfehlern oder falscher Interpolation bestimmt ist. Der hellgelbe Bereich zeigt sehr große Änderungen an, wobei sich der gelbe Bereich direkt dem Weißen anschließt. Daraus wird geschlossen, dass es sich hierbei nicht um Eisveränderungen handelt, sondern es der Übergangsbereich zwischen Interpolation und real gemessener Fläche handelt. Dieser Bereich kann vernachlässigt werden und ist als Übergangsbereich zu sehen. Die Nahbereiche um die Null-Änderung sind rötlich und rosa hinterlegt. Der orange bis in den gelben Teil hinein beschreibt eine Änderung von 1-10m an den Talflanken. Zurückzuführen ist diese Änderung erstens durch Erosion, entstanden durch das stete Auftauen des Permafrosts, und zweitens durch Messungenauigkeiten, dadurch, dass der Fokus der Bilder stets auf die Gletscherzunge selbst gerichtet war. Dieser Bereich kann als felsiger bis moräniger Bereich identifiziert werden. Von größerem Interesse für die Arbeit ist der rosa und violette Teil der Abbildung 26. Der rosa Bereich in der Nähe der Gletscherzunge kann schon teilweise vereist sein, aus den Orthofotos ist das nicht eruierbar. Naheliegender wäre, dass dieser Bereich vereist ist, jedoch nur mit einer sehr geringen Dicke und bereits mit Geschiebe überdeckt.



Abb.28: Darstellung des ehemals unterirdischen Abflusses auf der Pasterze (googlemaps abgerufen am 26.10.2018)

Diese sehr geringe Dicke dürfte innerhalb der letzten beiden Jahren vollkommen abgeschmolzen sein. Das wurde aus der Gesamtentwicklung der Pasterze gefolgert siehe Abbildung 2. Der violette Bereich dominiert auf der Pasterzenzunge. Hier handelt es sich um einen Rückgang der Gletschermächtigkeit von 6m bis 30m. Der sehr kleine blaue Teil im Nordwesten der Zunge stellt einen Abfluss innerhalb des Gletschers dar auf Abbildung 28, einem Orthofoto, erkennbar. Dieser ehemals unterirdische Abfluss dürfte mit den Jahren eingebrochen sein und kann entweder deshalb einen solchen Ausreißer, 50m Verlust in zwei Jahren, erzeugen, oder weil die photogrammetrische Methodik diesen Bereich nicht erfassen kann. Verglichen mit dem Ergebnis von Hynek in Abbildung 27 gab es ebenfalls ein Maximum des Rückgangs an derselben Stelle von 50m. Ebenfalls sind die Talflanken, ähnlich wie in den Ergebnissen dieser Arbeit, von einer Veränderung betroffen. Die berechneten Rückgänge des Eises seit 2015 verglichen mit Hyneks Ergebnissen sind generell kaum unterschiedlich. Zu beachten ist noch die höhere Auflösung der Darstellung von Hynek. Tendenziell kann eine höhere Rechenleistung, die Arbeitszeit verringern und die Genauigkeit der Ergebnisse erhöhen. Wie bereits in der Einleitung angesprochen ist der Rückgang des Eises auf der Pasterze von 2012-2015 in Abbildung 2 mit -5,1m beziffert. Verglichen mit dem Rückgang nach Abbildung 26

und Abbildung 27 von maximal 50m und auf weiten Bereichen der Pasterze von 10-20m gab es somit eine Vervielfachung des Rückgangs des Eises seit 2012.

Bezüglich der Forschungsfrage 2 spielen mehrere Faktoren eine Rolle. Einerseits ist ein langfristiges Monitoring mit finanziellen Kosten verbunden. Laut diversen Autoren (Nouwakpo 2014, Carrivick 2016, Reinhard 2016) ist die SFM-Methode sehr kostengünstig. Unkalibrierte Kameras mit vernünftiger Auflösung sind derzeit (August 2018) um 300€ im öffentlichen Markt erhältlich. Darüber hinaus wird noch die Software AgisoftPhotoscan und ein GIS-Programm benötigt. AgisoftPhotoscan kostet in der Standard Edition 179\$ und die Professional Edition 3499\$ (Stand August 2018) während mittlerweile GIS-Programme als OpenSource-Format erhältlich sind. Grundsätzlich kann die Datenaquisition durch eine einzelne Person erarbeitet werden. Da die Datenaquisition ein sehr simpler Prozess bei der SFM-Methode ist, kann der Prozess bereits nach einer kurzen Einschulung verständlich gemacht werden. Dieser Punkt spricht offensichtlich für die SFM-Methodik. Im speziellen Fall der Pasterze ist durch die Größe der Fläche und die damit verbundenen langen und teilweise sehr ausgesetzten Gehwege die Fotoaufnahme durch Einzelpersonen nicht empfehlenswert. Im Idealfall ist jede Route in Zweierteams, welche sich gegebenenfalls gegenseitig Sichern, abzugehen empfehlenswert. Darüber hinaus muss, speziell auf den südlichen Routen, das Aufnahmeteam alpinistisch versiert sein. Die DGPS-Aufnahme muss ebenfalls mindestens in Zweierteams erfolgen. Eine dritte Person kann bei der Suche von geeigneten Stellen für eine DGPS-Aufnahme sehr hilfreich sein. Dieser Kostenposten der DGPS-Aufnahme ist jedoch insofern zu vernachlässigen, als dass dieser bei beiden Methoden notwendig ist.

Die hohe Flexibilität der SFM-Methode zeigt sich durch die diversen Anwendungsgebiete in denen sie zum Einsatz kommt. Ursprünglich in der Archäologie entwickelt um Ausgrabungsstätten kostengünstig und rasch in verschiedenen Stadien der Ausgrabung festzuhalten und dreidimensional darzustellen, findet SFM mittlerweile im Bereich der Biologie, Geologie, Geomorphologie und Architektur Anwendung. Ein großer Unterschied zwischen SFM und dem verwendeten Laserscanner VZ-6000 von Riegl ist, dass sich SFM auch für sehr kleine Darstellungen wie beispielsweise Fossilien oder Knochen eignet. Dieser Laserscanner dagegen ist speziell auf große offene Flächen ausgelegt und wird hauptsächlich für große Bereiche wie eben Gletscher oder Rutschungen verwendet. Die sehr hohe Genauigkeit welche nicht, wie bei der SFM-Methode, von der Pixelanzahl einer Kamera bestimmt ist und die kurze Arbeitsdauer der Datenbeschaffung sprechen für den Scanner. Wie in Abbildung 10 ersichtlich ist das Gerät speziell auf lange Distanzen und mehrere Targets ausgelegt. Was jedoch nicht in

der Abbildung 10 festgehalten ist, ist das Gewicht der gesamten Gerätschaft. Die beiden Akkus und der Scanner mit Koffer sind ergonomisch betrachtet zu schwer für eine einzelne Person, da sich das Material im 10kg Bereich befindet. Gegen den Scanner spricht der finanzielle Aufwand wie in Tabelle 2 ersichtlich. Bei der Datenaquisition für das SFM-Modell wurde wie in Abbildung 9 erkennbar eine Gehroute für die Fotografien im Vorhinein grob bestimmt. Tatsächlich musste die Route aber individuell angepasst werden. Einerseits ist die Idealroute sehr ausgesetzt, um einen guten Blick auf die gesamte Gletscherfläche zu haben, andererseits ist damit eine gewisse Absturzgefahr verbunden. Eine Verbesserung der Aufnahme wäre in diesem alpinen Gelände durch Zweierteams, wie bereits angesprochen, möglich. Dadurch ist eine Verbesserung der Fotoqualität möglich, da durch die Sicherung der einen Person, Diese beide Hände zum Ausführen der Fotografien frei hat. Darüber hinaus sind höher auflösende Kameras erstrebenswert. 21,1MP, von den verwendeten Kameras, sind auf sehr große Distanzen insofern zu wenig, als dass die DGPS Punkte nicht genau verortet werden können. Die Pixelgröße beim tiefen Zoomen wurde dazu zu groß und die Verortung wurde erschwert. Inwiefern höher aufgelöste Bilder die Rechenkapazität des verwendeten Computers erhöht ist

nicht klar. Bezüglich zu den DGPS Punkten wurden Fotos von der Stelle der eingemessenen DGPS Punkten gemacht. Die Punkte wurden nach keinem speziellen Kriterium ausgesucht, sie mussten lediglich gut aus der Distanz erkennbar sein. Dieses Kriterium wurde in vielen Fällen nicht erfüllt. Von den 44 eingemessenen Punkten, konnten für das Modell nur 25 verwendet werden und von den 25 verwendeten Punkten konnten 16 Punkte auf unter einem halben Meter genau verortet werden ersichtlich in Abbildung 29. Eine Verbesserung der Bilder von den GPS-Punkten ist möglich durch eine Vergrößerung des Teams. Dadurch, dass die Punkte innerhalb eines Tages aufgenommen werden müssen, gibt es einen gewissen Zeitdruck. Bei zukünftigen Arbeiten ist bei der DGPS-Aufnahme mehr Sorgfalt auf die spätere Verortung zu legen. Spalten sind tendenziell schwieriger zu verorten als Gesteinsblöcke, erhobene Stellen leichter als niedere Stellen zu erkennen. Zusätzlich ist eine höhere Quantität und Qualität an Bildern von den DGPS Punkten erstrebenswert. Wie in Abbildung 21 ersichtlich entstehen ebenfalls durch unterschiedliche Programme welche unterschiedliche Arbeitsweisen verwenden, unterschiedliche Ergebnisse, selbst wenn grundsätzlich idente Daten zum Einsatz kommen. Selbst auf dem Pasterzenboden, auf welchem das Hauptaugenmerk bei der

Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)	
<input type="checkbox"/>	102	402209.000000	217517.000000	2387.000000	0.005000	0.110806	34	4.632
<input type="checkbox"/>	103	402284.000000	217624.000000	2390.000000	0.005000			
<input type="checkbox"/>	104	402327.000000	217671.000000	2386.000000	0.005000	0.602307	7	5.760
<input type="checkbox"/>	107	402375.000000	217391.000000	2352.000000	0.005000	0.073299	37	4.475
<input type="checkbox"/>	108	402467.000000	217520.000000	2358.000000	0.005000	0.108434	6	28.074
<input type="checkbox"/>	109	402494.000000	217255.000000	2339.000000	0.005000		1	0.000
<input checked="" type="checkbox"/>	128	402623.000000	217446.000000	2337.000000	0.005000	0.042333	45	4.707
<input checked="" type="checkbox"/>	140	403065.000000	217149.000000	2320.000000	0.005000	0.048189	19	4.195
<input type="checkbox"/>	146	402800.000000	217369.000000	2318.000000	0.005000	0.120810	10	5.573
<input type="checkbox"/>	154	402891.000000	217309.000000	2309.000000	0.005000	0.044519	15	5.432
<input type="checkbox"/>	158	402975.000000	216957.000000	2289.000000	0.005000	0.210703	55	4.929
<input type="checkbox"/>	167	403065.000000	216849.000000	2275.000000	0.005000	0.085697	27	3.787
<input checked="" type="checkbox"/>	170	403090.000000	217216.000000	2292.000000	0.005000	0.022857	5	4.966
<input type="checkbox"/>	176	403204.000000	216478.000000	2244.000000	0.005000	0.672327	20	6.293
<input type="checkbox"/>	193	403342.000000	217058.000000	2266.000000	0.005000	1.670352	26	2.595
<input type="checkbox"/>	195	403375.000000	216937.000000	2257.000000	0.005000	0.143063	24	8.230
<input type="checkbox"/>	234	403720.000000	216653.000000	2209.000000	0.005000	0.822917	21	4.298
<input type="checkbox"/>	235	403728.000000	216667.000000	2209.000000	0.005000	0.909326	37	6.136
<input type="checkbox"/>	236	403747.000000	216332.000000	2194.000000	0.005000	0.724847	21	5.246
<input type="checkbox"/>	237	403760.000000	216406.000000	2197.000000	0.005000	0.552386	9	5.759
<input type="checkbox"/>	239	403779.000000	216611.000000	2204.000000	0.005000			
<input type="checkbox"/>	255	403891.000000	215911.000000	2205.000000	0.005000	3.702605	19	3.894
<input type="checkbox"/>	264	403981.000000	215812.000000	2197.000000	0.005000	1.198214	10	2.115
<input type="checkbox"/>	267	404029.000000	216221.000000	2170.000000	0.005000	0.711539	30	3.381
<input type="checkbox"/>	273	404101.000000	216226.000000	2164.000000	0.005000			
<input type="checkbox"/>	277	404148.000000	215709.000000	2174.000000	0.005000			
<input type="checkbox"/>	291	404297.000000	215609.000000	2156.000000	0.005000	0.753022	8	2.646
<input type="checkbox"/>	300	404437.000000	215953.000000	2126.000000	0.005000	0.113393	22	6.817
<input checked="" type="checkbox"/>	301	404440.000000	215920.000000	2119.000000	0.005000	0.053362	6	4.337
<input checked="" type="checkbox"/>	311	404532.000000	215434.000000	2140.000000	0.005000	0.100062	7	2.349
<input type="checkbox"/>	340	404703.000000	215354.000000	2132.000000	0.005000			
<input type="checkbox"/>	345	404742.000000	215422.000000	2106.000000	0.005000	0.117018	26	3.954
<input type="checkbox"/>	348	404748.000000	215482.000000	2090.000000	0.005000	0.160541	56	1.756
<input type="checkbox"/>	353	404776.000000	215614.000000	2071.000000	0.005000	0.496746	13	4.048
Total Error								
Control points					0.059155			4.426
Check points					0.990719			5.593

Abb.29: Darstellung der DGPS-Punkten mit Fehlerangabe in Agisoft (Zangerle 2018)

Aufnahme gelegt wurde, sind Abweichungen der beiden Modelle von bis zu 9m erkennbar. An diesem Punkt kann eine zukünftige Arbeit einhaken und die erreichbare Genauigkeit von den DGPS-Punkten für Agisoft analysiert werden bzw. ein geeignetes Programm für derartige Vergleiche evaluiert werden. Bezüglich des Laserscans wurden drei Positionen auf der Nordwestflanke der Pasterze ausgewählt. Dadurch konnte eine ausreichend gute Abdeckung erreicht werden. Eine vierte Position auf der südlichen Seite der Pasterze und eine fünfte Position auf der westlichen Seite kann die Qualität des Scans durchaus erhöhen, Messschatten können dadurch verringert werden das ist in Abbildung 31 ersichtlich. Eine Erhöhung der Positionen erfordert aber auch eine Erhöhung der Marschdistanz, was in Verbindung mit der großen Masse des Gerätes einen ergonomischen Nachteil mit sich bringt. Das heißt, der Scan kann nicht mehr von einer Einzelperson durchgeführt werden, sondern sollte zumindest in einem Zweierteam stattfinden. Die Universität Wien verwendet mittlerweile für Laserscans ein geländefähiges Vehikel für den Transport des Scangeräts. In Zusammenhang mit einer erhöhten Anzahl von Scanposition steht ein größerer Arbeitsaufwand während der Aufnahme und eine erhöhte Nachbearbeitungsdauer der Punktwolke des Scans mit dem Program RiSCAN PRO, da die Positionen zusammengeführt werden müssen. Die Erhöhung der Scanposi-

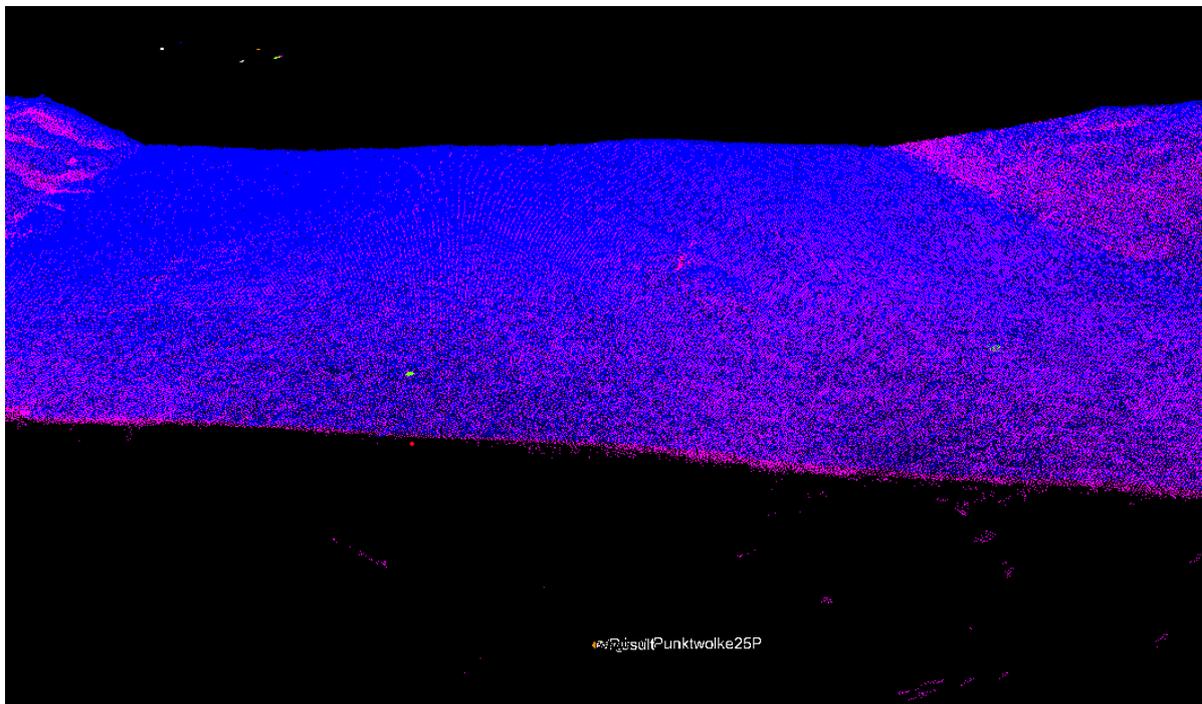


Abb. 30: Darstellung der Divergenz zwischen Laserscan und Agisoftwolke (Zangerle 2018)

tionen erhöht ebenfalls die Fehlermöglichkeit, da die gegenseitige Anpassung der Scans nicht zu 100% möglich ist. Wie in den Methoden besprochen arbeitet das Tool MSA mit einem iterativen Prozess, was immer in Verbindung mit einer gewissen Ungenauigkeit und einem

gewissen Zeitaufwand steht. Zudem war meine persönliche Erfahrung mit dem MSA meine Erste. Daher ist anzunehmen, dass durch einen erfahrenen Bearbeiter von Laserscans eine durchaus genauere Anpassung erfolgen kann. In Abbildung 30 ist der Unterschied zwischen Laserscan- und Agisoftwolke nach der iterativen Anpassung erkennbar. Beim direkten optischen Vergleich der Wolken am Pasterzenboden ist eine leichte Diskrepanz erkennbar. Der Unterschied wird hauptsächlich optisch korrigiert. Diese Diskrepanz setzt sich in der weiteren Bearbeitung in ArcGIS fort. Durch das Tool «Minus» wurde der direkte Vergleich der angepassten Agisoft-Wolke und der zusammengebauten Laserscan Wolke möglich. Dieses Tool zieht das eine DEM vom anderen DEM ab. Durch den vorhandenen Offset entsteht eine offensichtliche Fehlerquelle. Wie in Abbildung 30 ersichtlich gab es nach der Anpassung noch Unterschiede am Pasterzenboden von bis zu 50m die optisch nicht zu erkennen waren. Diese Höchstwerte sind aber auf falsch zugeordnete Bilder bei der Erstellung des DEMs in AgisoftPhotoscan entstanden. Während der Nachbereitung der Agisoft-Wolke, wurde darauf geachtet möglichst viele falsch zugeordnete Punkte zu löschen, dies war jedoch speziell im Nahbereich des Pasterzenbodens nicht möglich. Dieser Arbeitsschritt erfolgte manuell. Im unteren Drittel der Abbildung 30 sind violette Punkte außerhalb erkennbar. Diese Punkte sind durch falsch ausgerichtete Bilder entstanden, wie oben angesprochen. Es gab ebenso hier eine Fortpflanzung der Fehler.

Durch die große Anzahl an möglichen Fehlerquellen, wie beispielsweise die Schwierigkeit der Verortung der GPS Punkte und die unterschiedlichen Algorithmen, ist eine höchst möglich erreichbare Genauigkeit nicht definierbar bezüglich der SFM-Methodik. Außerdem kam es bei der Erstellung der Modelle zu einem Try-and-Error-Verfahren. Dadurch konnten teilweise Knicke erkannt und ausgebessert werden, teilweise konnten Fehlerquelle identifiziert und ausgemerzt werden. Hierzu wird eine zusätzliche Arbeit empfohlen um die effizienteste Arbeitsweise zu eruieren. In Abbildung 24 ist zu erkennen, dass lediglich ein kleiner Bereich schwarz dargestellt ist und sich vollkommen überdeckt. Auf den gesamten nicht von Eis bedeckte Bereich, also die Seiten des DEM's wurde bei der Datenerhebung nicht geachtet, dieser überdeckt sich auch sehr wenig. Daher sind die weißen, roten und violetten Bereiche an den Talseiten nicht relevant. Die grünen, blauen bis gelben Bereiche zeigen in dieser Darstellung Abweichungen von bis zu 30m auf. Der grüne Bereich im Nordwesten kann als Messchatten des Laserscanners identifiziert werden. In einer Arbeit von Andrews 2013 wurde der Außenbereich einer Scheune mittels SFM in Kombination mit Agisoft und Laserscanning vermessen. Andrews argumentiert, dass die Methodik für die archäologische Wissenschaft und Analyse entwickelt wurde. Zudem gibt es Unterschiede in den verwendeten Algorithmen und den

Methoden zwischen den Software-Paketen (Andrews 2013). Diese grundsätzlichen Unterschiede spielen eine Rolle beim Vergleich der Punktwolken. Ein direkter Vergleich als das ArcGIS-Tool «minus» wäre mit anderen Programmen möglich wie beispielsweise die open source Softwarelösung «CloudCompare». Außerdem ist das Agisoft-Programm nicht auf weite Geländebereiche ausgelegt, eher auf Gebäude und verhältnismäßig kleinere Bereiche. (Andrews 2013) Das spricht klar gegen eine Verwendung für ein Monitoring von derartig großen Flächen. Dagegen ist der verwendete Scanner VZ-6000 auf große Scandistanzen ausgelegt. Für sehr große Modellbereiche ist der Scanner VZ-6000 gut geeignet. Diese Aspekte sprechen für eine Verwendung von Laserscannern für ein langfristiges Monitoring Projekt. Aktuell sind in der Glaziologie die Auswirkungen des Klimawandels auf den Rückzug der Gletscher interessant. Um die Deformationsmessungen durchzuführen eignet sich insbesondere für flächenhafte Messungen der TLS. (Wujanz 2016)

Bezüglich der Kosten ist mehrfach die angesprochen worden, dass die SFM Methode günstiger ist. Der Scanner VZ-6000 allein kostet laut Rieglaustria 149.250€. Zusätzlich zum Scanner werden auch noch Nickel-Metallhydrit Akkumulatoren benötigt. Ein Akku kostet 1250€ mit einem Ladeset 270€. Die Software RiScan ist beim Scanner inkludiert.

Posten SFM	€		Posten Scanner	€
Kamera	300		VZ-6000	149250
Software	179		Akkumulator	2500
			Ladeset	270

Tabelle 3: Auflistung der Kosten, SFM vs. Laserscanner (Zangerle 2018)

Offensichtlich sind die Instrumente der Datenaufnahme für die Laserscannung sehr viel teurer. Für die Erstellung von Höhenmodellen von großen Bereichen ist der Scanner besser geeignet und damit ist für ein langfristiges Monitoring ein Laserscanner mehr geeignet. Dagegen sprechen die Kosten wie in Tabelle 2 angegeben. An diesem Punkt kann eine Kosten-Nutzen-Analyse für jedes spezielle Projekt empfohlen werden.

Für den Fall der Pasterze waren die Gehrouten passend. An diesem Punkt ist festzuhalten, dass geeignete Standorte für den Laserscanner gefunden werden müssen und die Aufnahmen immer an derselben Stelle und am selben Datum durchgeführt werden. Vorschläge für die besten Scanpositionen sind der Abbildung 31 zu entnehmen. Die eingezeichneten Punkte in Abbildung 31 gewährleisten eine Abdeckung der Pasterze ohne Messschatten.

Laut Oerlemans von 1998 ist die beste Art Massenbilanzen von Gletschern zu erstellen via in situ Messungen. Mit den beiden Methoden SFM und Laserscan kann die Arbeitszeit jedoch sehr verringert werden. Weiter wird argumentiert „historical variations in glacier length can provide us with information about climatic variability in the past. By understanding the relation between glaciers and climate in the past one can predict the future behavior of glaciers under various climate scenarios.” (Oerlemans 1998) Hierzu konnte mit meiner Arbeit ein Beitrag geleistet werden. Die Erstellung von möglichst hoch aufgelösten DEM's mittels SFM und Laserscan wurde für die Pasterze durchgeführt. Somit wurde ein Weg eröffnen, mit möglichst wenig Kosten ein effizientes Monitoring durchzuführen.

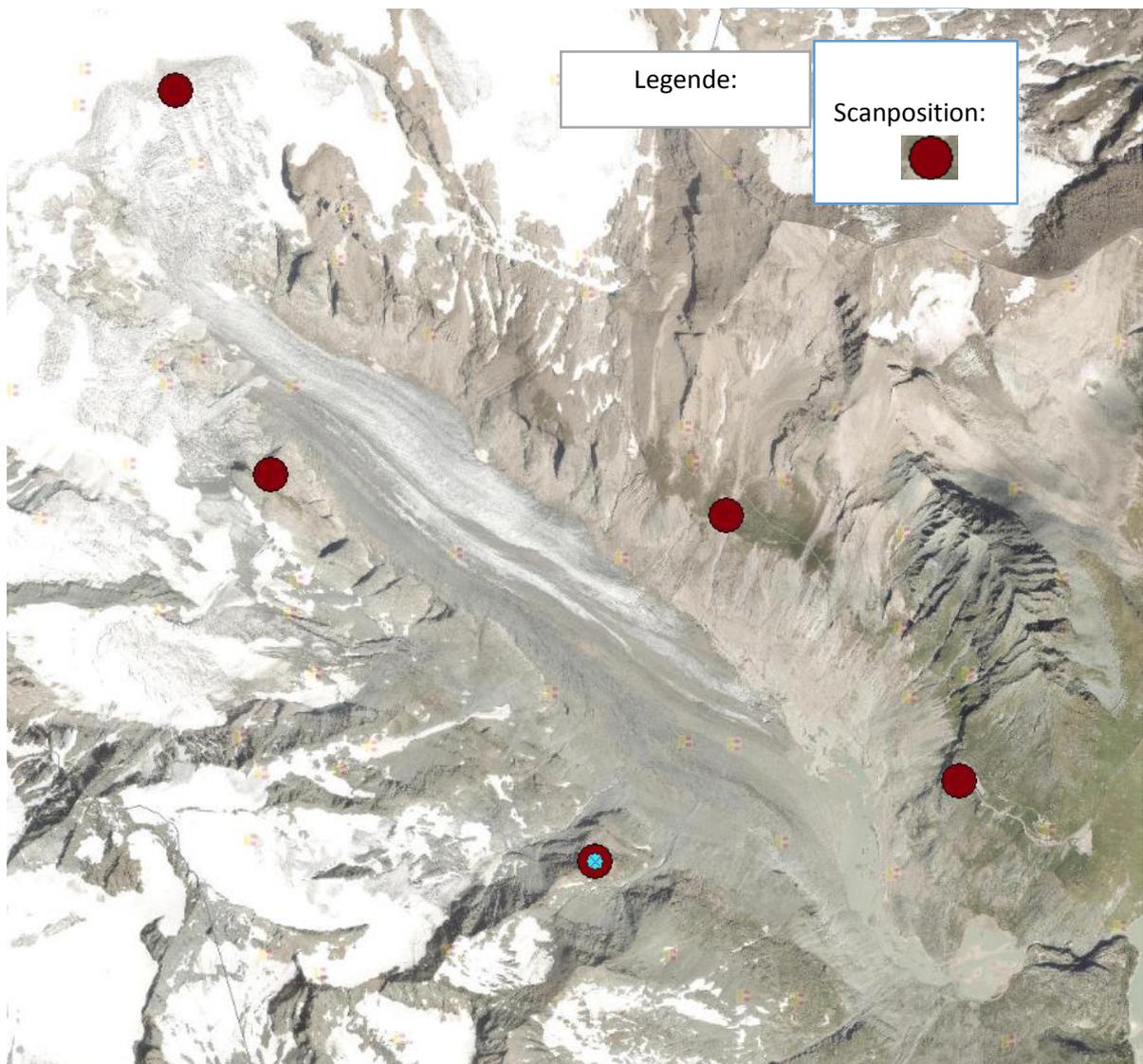


Abb.31: Ideale Scanpositionen für den Scanner VZ-6000 (Zangerle 2018, Orthofoto aus kagis)

Im Gegensatz zum DEM aus Agisoft sind im Hillshade aus dem Laserscan erstellt in ArcGIS Messschatten und schlecht abgelichtete Bereiche sehr gut erkennbar. Die Interpolation mit

NaturalNeighbor erzeugt in jenen Bereichen ein glattes Gelände. Verglichen mit dem Hillshade aus dem SFM-Modell scheint die Auflösung aber höher zu sein. Es sind einzelne Felsblöcke erkennbar, auf der Zunge sind Abflüsse und Spalten erkennbar. Ab diesem Zeitpunkt kann eine Aussage über die Scanpositionen gemacht werden. Die südliche Seite Pasterze erscheint gut dargestellt, der Schmelzwassersee im unteren Bereich ist ebenfalls gut erkennbar. Im nördlichen Teil gibt es einen Abschnitt des Abhangs, der nicht, oder nur teilweise erfasst wurde. Gewisse Ecken sind für den Scanner nicht erreichbar, jedoch kann durch geeignete Scanpositionen dieser Teil minimiert werden.

Zusammenfassend kann für die Forschungsfrage 2 geschlossen werden, dass die Frage nach der geeigneteren Methodik für ein langfristiges Monitoring vor allem die finanziellen Kosten ausschlaggebend sind. Bei Vernachlässigung des Kostenpunktes ist die Verwendung eines Laserscanners sicherlich insofern empfehlenswert, als dass das Gerät speziell für derartige Zwecke entwickelt wurde. Die Schwächen der SFM-Methodik zeigen sich speziell bei großen Flächen und Distanzen. Außerdem ist die Nachbearbeitung der Daten für den SFM-Ablauf unverhältnismäßig viel höher als beim Laserscan. Unabhängig davon wurden die Modelle der Pasterze von 2015, 2012 und 2017 mit der SFM-Methodik durchgeführt und die Ergebnisse scheinen ausreichend gut zu sein. Für die Zukunft ist jedoch die State-of-the-Art Methode mittels Laserscan anzuvorschieben, da hoch aufgelöste Punktwolken eine größere Menge an Daten speichern können. Durch die bisherige Entwicklung in der Soft- und Hardwaretechnik im Computerbereich ist eine dementsprechend bessere Bearbeitungsmöglichkeit für große Punktwolken zu erwarten.

7. Conclusio

In der Conclusio werden die Forschungsfragen noch einmal aufgegriffen und zusammenfassend beantwortet. Darüber hinaus sollen die Vor- und Nachteile der beiden Methoden angesprochen werden und ein Ausblick auf und Vorschläge für zukünftige Arbeiten gegeben werden.

Forschungsfrage 1: Welche der verwendeten Methoden, SFM und Laserscanning, ist besser für ein langfristiges Monitoring von Gletschern geeignet und warum?

Da beide verwendeten Methoden darauf basieren, dass Höhenmodelle des Gletschers erstellt werden, ist ein offensichtliches Kriterium die Qualität des erstellten Höhenmodells der jeweiligen Methode. SFM wurde nicht in der Glaziologie entwickelt und das verwendete Auswertungsprogramm ist daher nicht auf solch weite Bereiche ausgelegt. Grundsätzlich ist die Erstellung von georeferenzierten Höhenmodellen und Punktwolken in dieser SFM-Software auf simple Weise möglich, aber die Nachbereitung ist gleich wie die Erstellung des DEM's zeitintensiv. Außerdem sind während des Erstellungsprozesses falsch zugeordnete Bilder aus dem Projekt zu eliminieren. Im Gegensatz dazu steht die Erstellung von Höhenmodellen mittels terrestrischem Laserscanning. Das Scangerät ist auf weite, tendenziell weiße und spiegelnde Flächen ausgelegt. Die Punktwolken sind sehr hoch aufgelöst, das heißt die Punktwolke ist äußerst dicht. Die hohe Anzahl an aufgenommenen Punkten, ca. 17 Millionen, beim Laserscan im Gegensatz zu der SFM-Punktwolke von 12 Millionen Punkten macht den Unterschied deutlich. Darüber hinaus ist die Nachbereitung des Scans mit wenig Zeitaufwand verbunden. Die Größe der Punktwolke ist durch die weiten erfassten Bereiche und der hohen Dichte teilweise mit der verwendeten Software ArcGIS nicht mehr bearbeitbar. Hier ist eine andere Softwarelösung sinnvoll. Bezüglich der Pasterze sind beide Methoden als langfristiges Monitoring durchaus valide. Durch beide Methoden kann die Änderung der Eismasse errechnet werden. Bei einem langfristigen Monitoring kann der finanzielle Aufwand ebenfalls von Interesse sein. Hierbei zeigt die SFM-Methode ihre Stärken. Die äußerst günstige SFM-Methode ist außerdem sehr flexibel in der Anwendung und in Abbildung 27 ist zu erkennen, dass selbst bei sehr weiten Bereichen anschauliche Modelle erstellt werden können. Ist der finanzielle Aspekt vernachlässigbar wird ein Laserscanner empfohlen. Einerseits durch die Schnelligkeit der Datenaufnahme und der Nachbereitung zeigt die hohe Qualität der erstellten Punktwolke die Stärken dieser Methode. Für ein Monitoring mittels SFM von Gletschern sollte die Vorgangsweise teilweise verändert werden. Ein größeres Team mit adäquater Ausrüstung ist nötig. Bezüglich

der Frequenz des Monitorings ist mindestens zweimal pro Jahr anzustreben. Höher auflösende Kameras sind sehr zu empfehlen. Die Gehrouten sind natürlich für jeden anderen Gletscher speziell zu eruieren. Ein direkterer Vergleich der verwendeten Methoden fällt insofern schwer, als dass unterschiedliche Algorithmen verwendet werden um die DEM's zu erstellen, DGPS-Punkte werden jeweils auf dem Laserscan und dem SFM-Modell separat verortet und die Kapazitäten des verwendeten Rechners ist bei 30m Seitenlänge pro Pixel. Für die SFM-Methodik steht der geringe finanzielle Aufwand. Für den Laserscan die hohe Genauigkeit und gute Vergleichbarkeit.

Forschungsfrage 2: Um wieviel Meter hat die Pasterze seit 2015 an Dicke verloren?

Abbildung 26 und Abbildung 27 geben die Änderung der Dicke der Pasterze seit 2015 wieder. Ein Maximum an Eisdickenverlust ist in beiden Abbildung mit 50m zu erkennen. Im Randbereich, in welchem keine Dicke von 50m erreicht werden kann, gab es Rückgänge vom tiefen Meterbereich beginnen bis 10m. Im tiefer gelegenen Bereich sind die Rückgänge tendenziell geringer, da weniger Eis vorhanden ist. Im höher gelegen Bereich gab es Rückgänge von 10-20m seit 2015. Generell erscheint die Zunge in Bereichen mit großer Gletschermächtigkeit mehr an Dicke verloren zu haben als in Bereichen mit ohnehin geringer Gletschermächtigkeit. Auf der Gletscherzunge selbst ist der Rückgang sehr homogen dargestellt in Abbildung 27 sowie auf Abbildung 26. Hier zeigen die Abbildungen einen Rückgang zwischen 10m und 40m. Im Verhältnis zu der Abbildung 2 in der es innerhalb von drei Jahren, von 2012-2015, einen Rückgang von 5,1m gab, innerhalb von 14 Jahren, von 1998-2012, einen Rückgang von 4,3m gab und innerhalb von 29-Jahren, von 1969-1998, einen Rückgang von 1,8m gab, ist der Rückgang von knapp 25m auf der Gletscherzunge innerhalb von zwei Jahren unverhältnismäßig hoch. Es bedeutet, dass sich der Rückgang in den Jahren von 2015-2017 verfünffacht hat im Verhältnis zu den drei Jahren davor. Einerseits besteht die Möglichkeit, dass es in den letzten beiden Jahren einen extremen Niederschlagsmangel in Kombination mit sehr hohen Temperaturen gab und dass somit kein Zuwachs im Akkumulationsbereich möglich war und dadurch das starke Abschmelzen des Eises begünstigt wurde. Andererseits können die Messungen falsch sein und die erstellten DEM's nicht aussagekräftig sein. Hier sind jährliche Messungen zu der Entwicklung der Pasterze, also ein langfristiges Monitoring zu empfehlen. Dabei können meteorologische Daten, Niederschlag und Temperatur, mit den Gletscherentwicklungen im Verhältnis gesetzt werden um diesen Zusammenhang zu erörtern.

8. Literatur

Agisoft PhotoScan. <http://www.agisoft.com/> (10.10.2017).

Andrews, D.P., Bedford, J., Bryan, P. G. (2013) A comparison of laser scanning and structure from motion as applied to the great barn at Harmondsworth, UK. English Heritage, 37 Tanner Row, York YO1 6WP, UK.

Augustin, L., et. Al. (2004) Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. Nature publishing group Vol. 429.

Bennett, M. R., Neil F. Glasser (2009) Glacial Geology Ice Sheets and Landforms. ISBN: 978-0-470-51690-4 (HB) und 978-0-470-51691-1 (PB).

Bernard, E., Friedt, J. M., Prokop, A., Tolle, F., Griselin, M., Marlin, Ch. (2017) Investigating Snowpack volumes and icing dynamics in the moraine of an arctic catchment using UAV photogrammetry. The Photogrammetric Record, The Remote Sensing and Photogrammetry Society and John Wiley & Sons Ltd.

Boehler, W., Marbs, A. (2003) Investigating Laserscan Accuracy. i3mainz, Institute for Spatial Information and Surveying Technology, FH Mainz, University of Applied Sciences, Mainz, Germany.

Böhm, R.; (1948-2012) Gletscher im Klimawandel. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Wien: Eigenverlag der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik; 2007.

Carrivick, J. L., Smith, W. M., Quincey, J. D. (2016) New Analytical Methods in Earth and Environmental Science: Structure from motion in the geosciences. John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO10 8SQ, UK.

Dyrgerov, M. (2002) Glacier Mass Balance and Regime: Data of Measurements and Analysis. Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado,. Occasional Paper No. 55.

Fischer, A. (2011) Comparison of direct and geodetic mass balances on a multi-annual time scale. Institute of Meteorology and Geophysics, University of Innsbruck, Austria.

Fischer, A., Patzelt, G., Achreiner, M., Groß, G., Karl Lieb, G., Kellerer-Priklbauer, A., Bendler, G. (2018) Gletscher im Wandel – 125 Jahre Gletschermessdienst des Alpenvereins. Springer Spektrum. Springer-Verlag GmbH Deutschland 2018.

Fraedrich, W. (2016) Spuren der Eiszeit – Landschaftsformen in Mitteleuropa. 2. Auflage, Springer Spektrum.

Haeberli, W., Maisch, M.. (2007) Klimawandel im Hochgebirge. S98-107.

Hynek, B., Fischer, A., Stocker-Waldhuber, M., Seiser, B., Slupetzky, H. (2014) Glaciological monitoring in Hohe Tauern National Park. ISSN 2073-106X

Hynek, B., Prokop, A., Bührle, L., Zangerle, D., Neureiter, A. (2018) Multiple crowd-sourced SfM-DEMs of an Alpine valley glacier: Validation by LIDAR and surface change detection 2012-2017. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Climate Research Department, Vienna. The University Centre in Svalbard (UNIS), Longyearbyen. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna.

- Karpilo Jr., R.D. (2009) Glacier monitoring techniques. Department of Geosciences, Colorado State University, and Geologic Resources Division, National Park Service, Fort Collins, Colorado 80523, USA.
- Kaser, G., Fountain, A., Jansson, P. (2003) A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers. International hydrological programme. Technical Documents in Hydrology, No.59.
- Kleman, J. und Borgstroem, I. (1996) Reconstruction of palaeo-ice sheets: The use of geomorphological data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 893-909.
- Kleman, J. (1994) Preservation of landforms under ice sheets and ice caps. *Geomorphologz*, 9, 19-32.
- Larsson, P. und Henriksson-Larsén, K. (2001) The use of dGPS and simultaneous metabolic measurements during orienteering. *Medicine and Science in Sports and Exercise*: November 2001 - Volume 33 - Issue 11 - p 1919-1924.
- Lorrain R.D., Fitzsimons S.J. (2011) Cold-Based Glaciers. In: Singh V.P., Singh P., Haritashya U.K. (eds) *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht.
- Machgut, H., et al. (2016) Greenland surface mass-balance observations from the ice-sheet ablation area and local glaciers. Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS), Copenhagen, Denmark.
- Mark A. Fonstad, M., Dietrich, J., Courville, B., Jensen, J. und Carbonneau, P.. (2011) Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth surface processes and landforms*, John Wiley & Sons. Ltd. Weley Online Library 2013.
- Marcis, M., 2005: Quality of 3D Models generated by SFM Technology.
- Matthews, J. A. (1992) The ecology of recently-deglaciated terrain – a geoecological approach to glacier forelands and primary succession. Department of Geology, University of Wales Vollege of Cardiff (UWCC). Cambridge University Press 1992, Cambridge.
- Matulla, C., Gerersdorfer, T., Haas, P., Melcher, A., Schmutz, S.. (2006) Assessing the impact of a downscaled climate change simulation on the fish fauna in an Inner-Alpine River. *Climate Research Divison, Science and Technology Branch, Environment Canada*. Toronto. Springer.
- Meier, M.F., Dyurgerov, M.B., Rick, U.K., et al. (2007) Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st Century. *Science*, 317, 1064-7.
- Moser, M., Schober, S.. (2014) Stand der Technik im Naturgefahreningenieurwesen – Tagungsband. S24-27, Fachtagung an der Universität für Bodenkultur.
- Nicolussi, K., Patzelt, G. (1999) Discovery of early-Holocene wood and peat on the forefield of the Pasterze Glacier, Eastern Alps, Austria: Institute of High Mountain Research University of Innsbruck, Innsbruck, Austria.
- Oerlemans, J., Zuo, Z., (1997) Numerical modelling of the historic front variation and the future behavior of the Pasterze glacier, Austria. Institute for Marine and Atmospheric Research, Utrecht University, Netherlands.
- Orlove, B., Wiegandt, E. und Luckman, B. H. (2008) *Darkening Peaks – Glacier Retreat, Science, and Society*. University of California Press. Berkeley and Los Angeles, California.
- Peter. G. Knight: *Glaciers*. (1999) ISBN 0-7487-4000-7.

Pfeffer, W. T., Harper, J. T., O'Neel, S. (2008) Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise. *Science* Vol 321 1340- 1342.

Prokop, A. (2008) Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements. Institute of Mountain Risk Engineering, Department of Civil Engineering and Natural Hazards, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, A-1190 Wien, Peter Jordanstrasse 82, Austria.

Reinhard, J. (s.A) Structure-from-Motion-Photogrammetrie mit Agisoft PhotoScan. Erste Erfahrungen aus der Grabungspraxis. Undine Lieberwirth, Irmela Herzog (eds.), 3D-Anwendungen in der Archäologie, *Verlin Studies of the Ancient World* 34.

Siegenthaler, U., et al. (2005) Atmospheric Methane and Nitrous Oxide of the Late Pleistocene from Antarctic Ice Cores. *Science* Vol 310, Issue 5752. November 2005.

Sobota, I. (2007) Selected methods in mass balance estimation of Waldemar Glacier, Spitsbergen. *Zakład Kriologii i Badań Polarnych, Instytut Geografii UMK, Gagarina 9, 87–100 Toruń.*

Spektrum, Akademischer Verlag Heidelberg.

<https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/permafrost/12095> Abgefragt am 05.05.2018.

Wübbena, G., Bagge, A., Seeber, G., Böder, V., Hankemeier, P. (2001) Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks, Geo++-Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH Steinriede 8, D-30827 Garbsen, Germany.

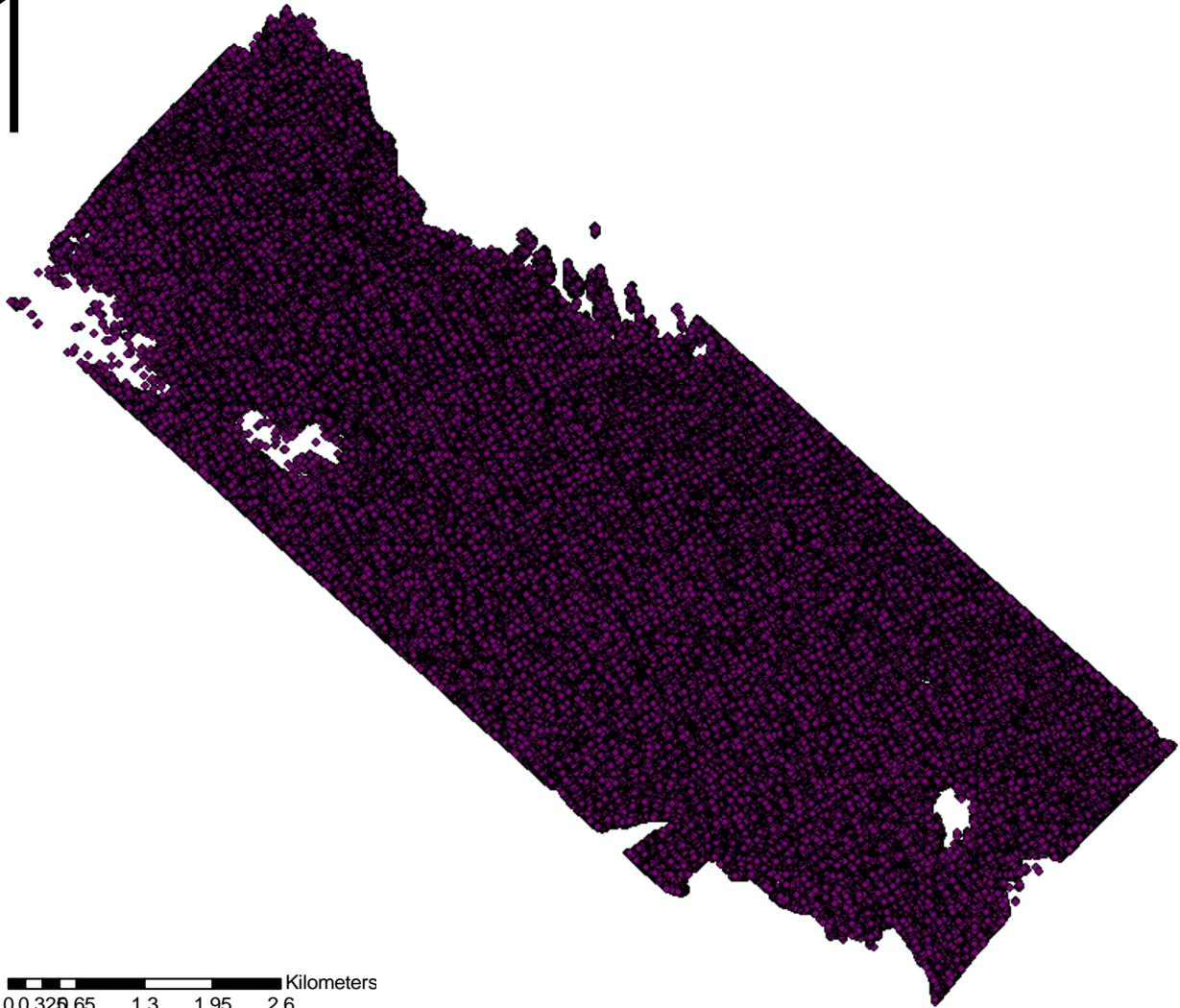
Wujanz, D., Krueger, D., Avian, M., Neitzel, F. (2016) Identifizierung stabiler Areale in unreferenzierten Laserscans für Deformationsmessungen am Beispiel des Pasterzengletschers Österreich.

Zemp, M., Hoelzle, M., Haeberli, W. (2009) Six decades of glacier mass-balance observations: a review of the worldwide monitoring network. *Annals of Glaciology* 50(50) 101- 111. World Glacier Monitoring Service, University of Zuerich, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zuerich Switzerland.

9. Anhang

25P Punktwolke aus Agisoft:

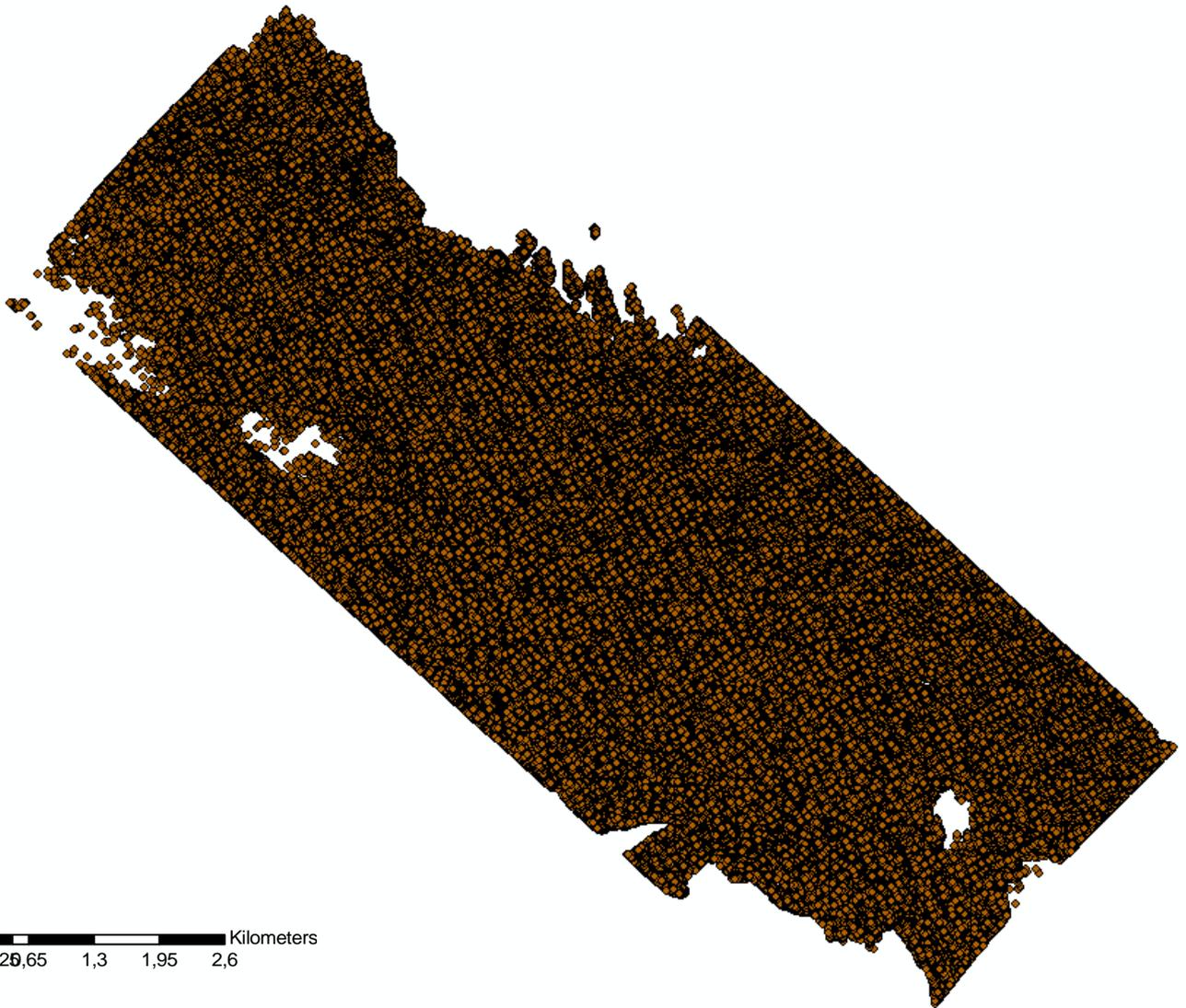
1



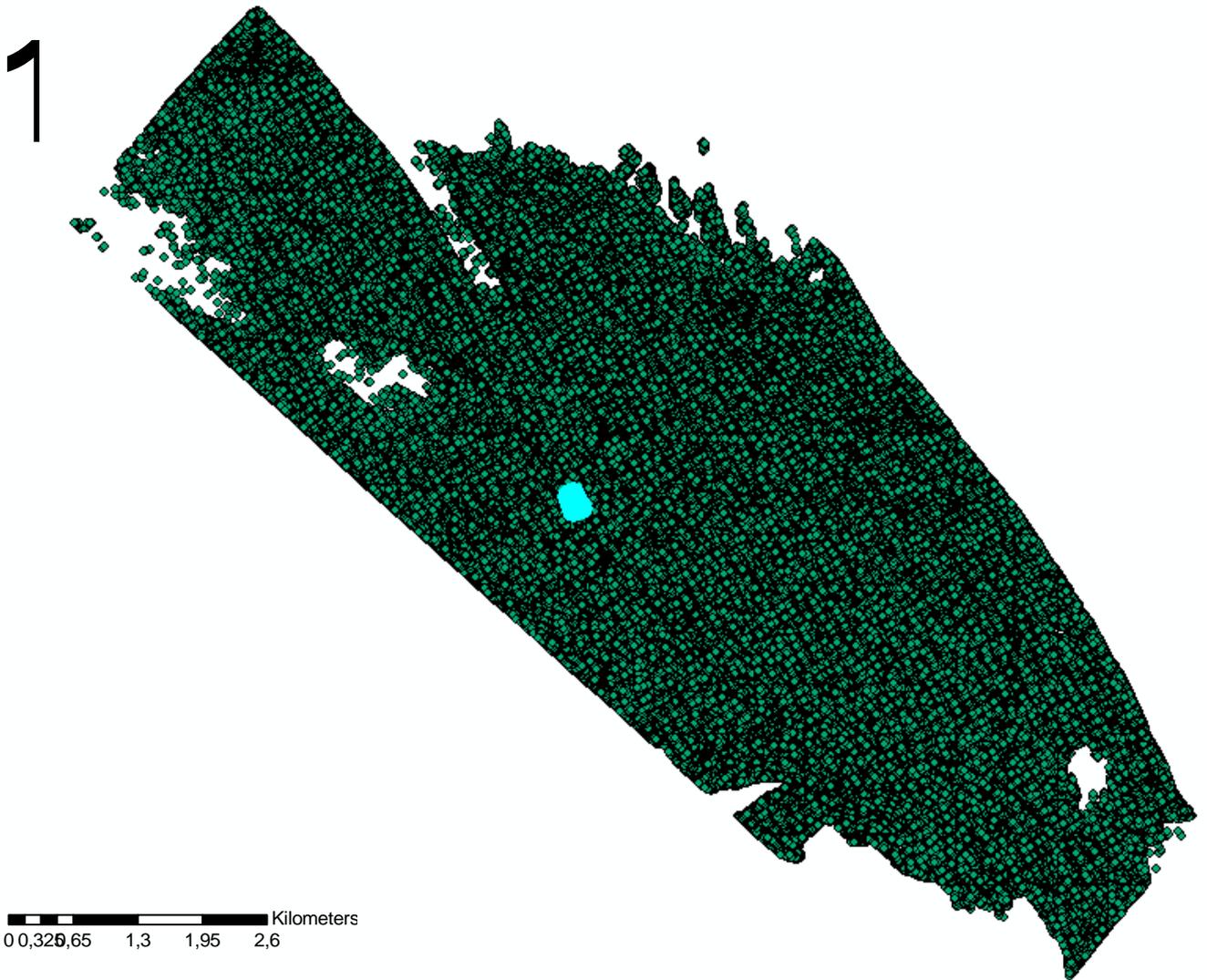
0, 0,32, 0,65 1,3 1,95 2,6 Kilometers

15P Punktwolke aus Agisoft

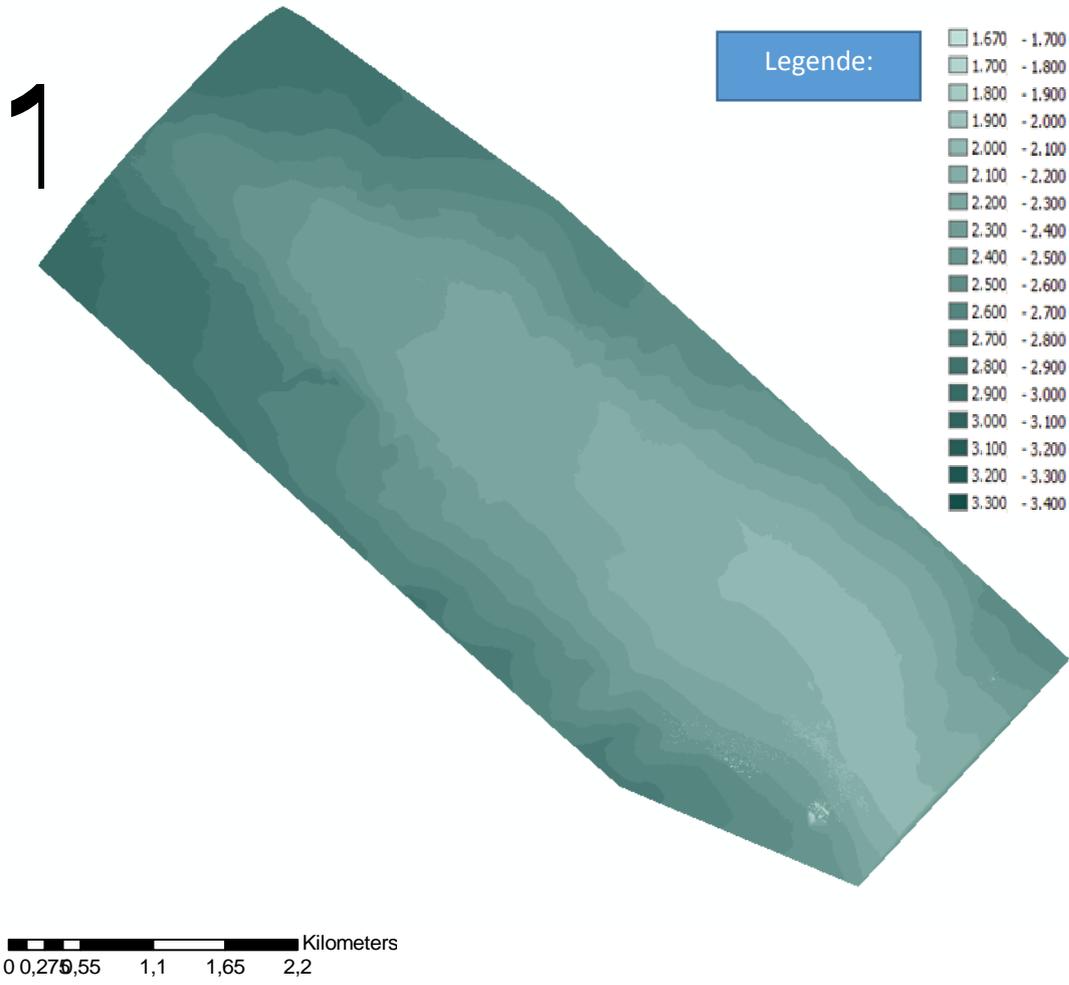
1



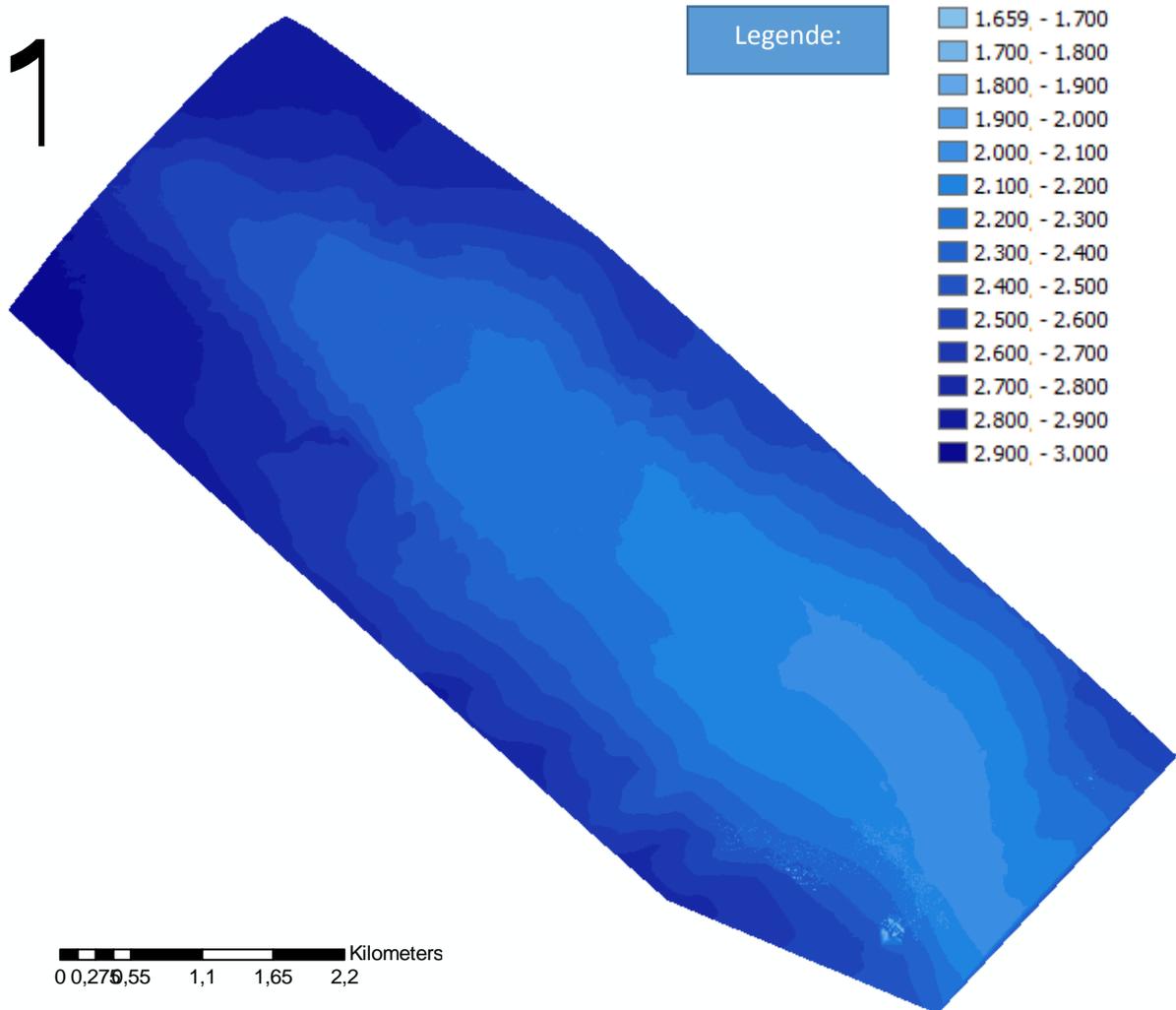
5P Punktwolke aus Agisoft



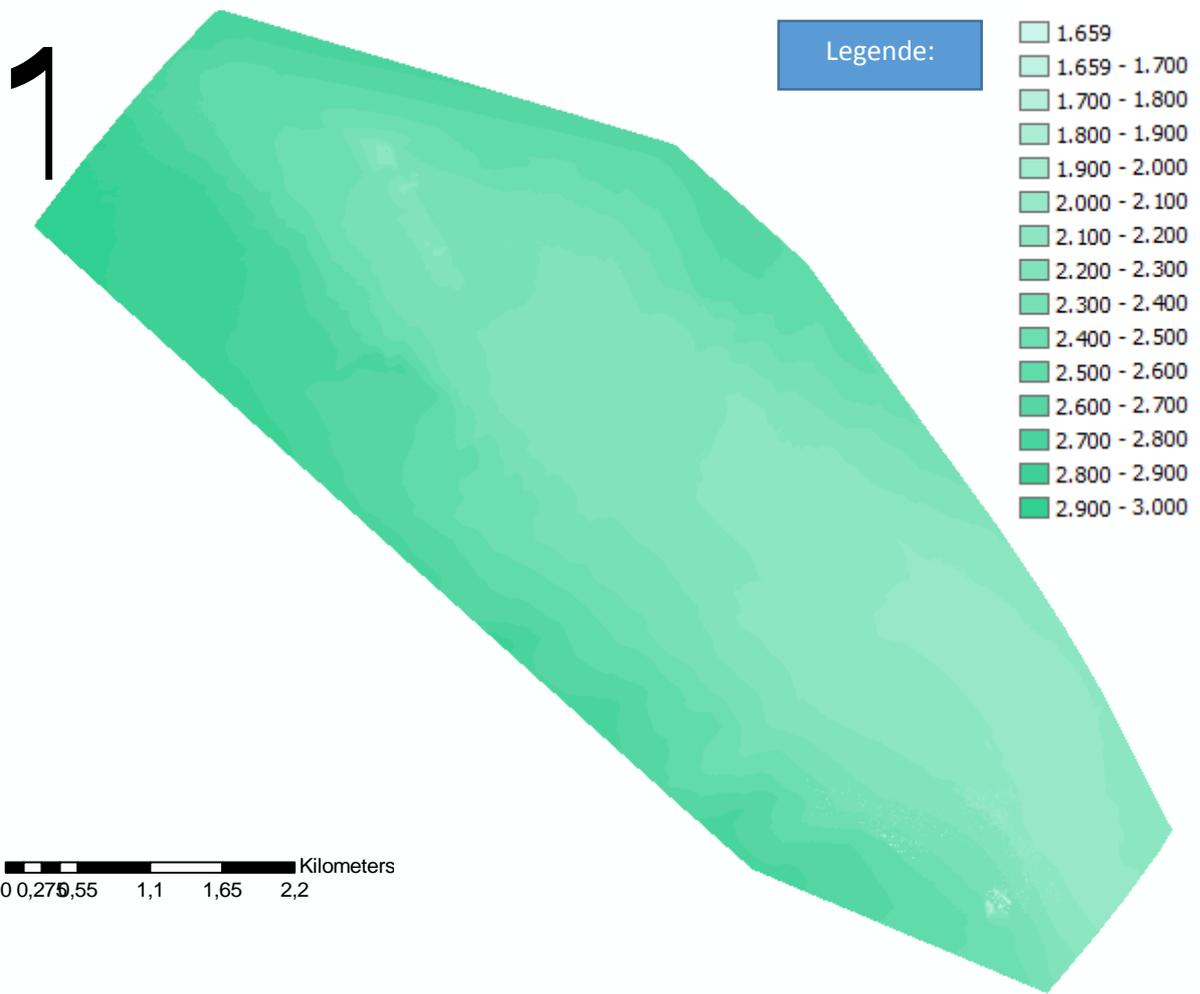
25P DEM aus ArcGIS aus Punktwolke von Agisoft



15P DEM aus ArcGIS aus Punktwolke Agisoft

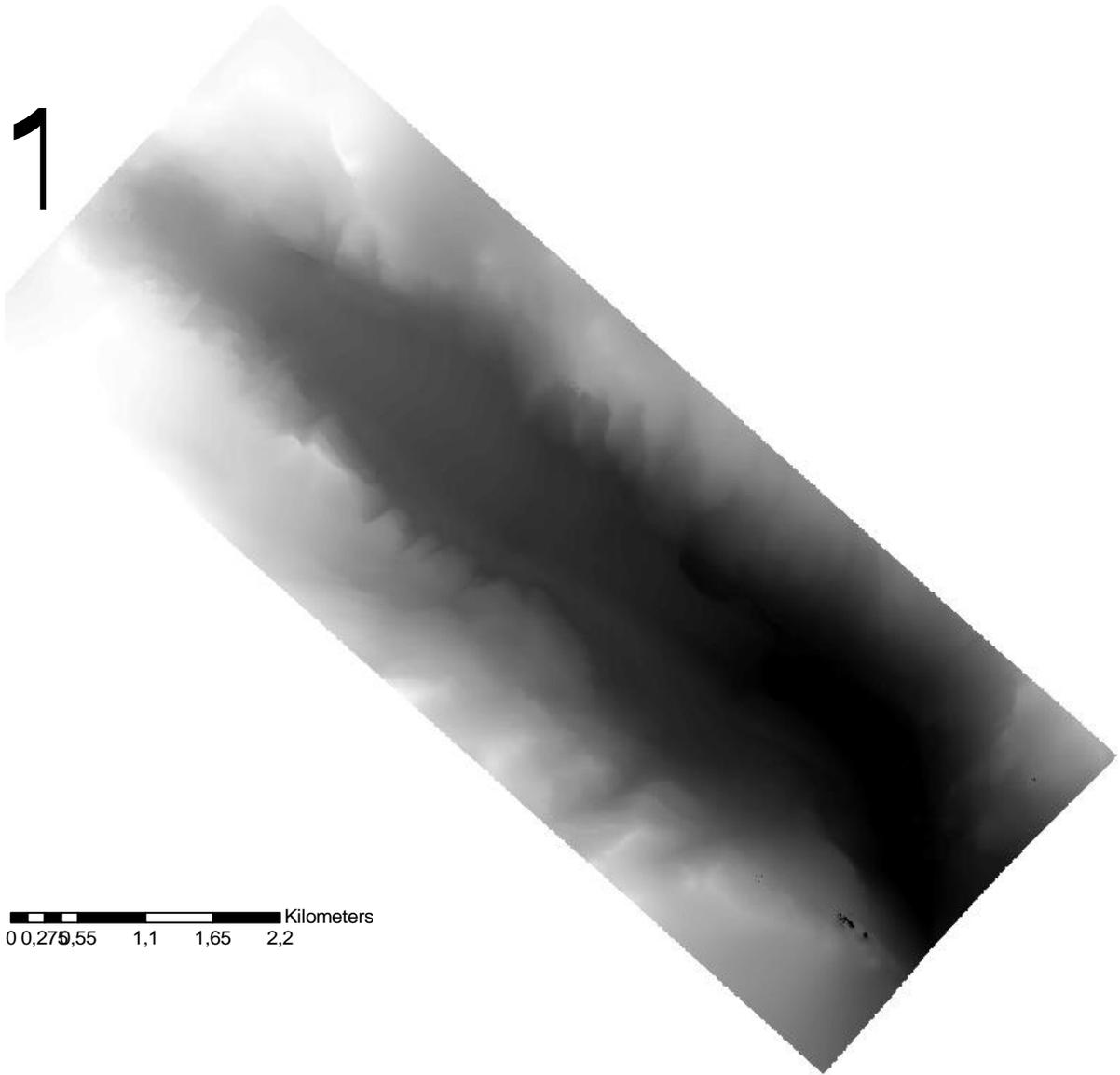


5P DEM aus Agisoft



25P DEM aus Agisoft:

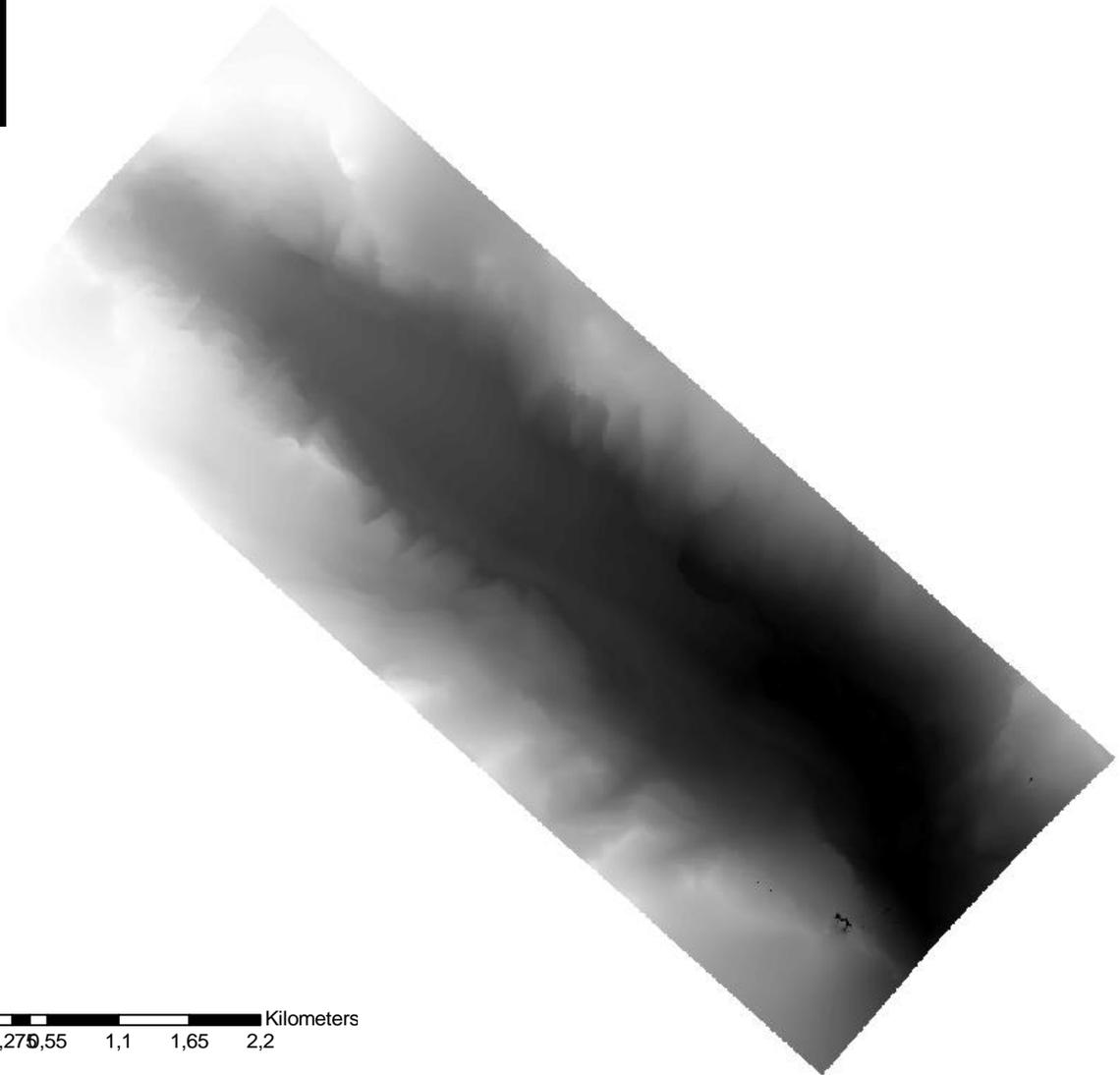
1



0,27 0,55 1,1 1,65 2,2 Kilometers

15P DEM aus Arc-GIS

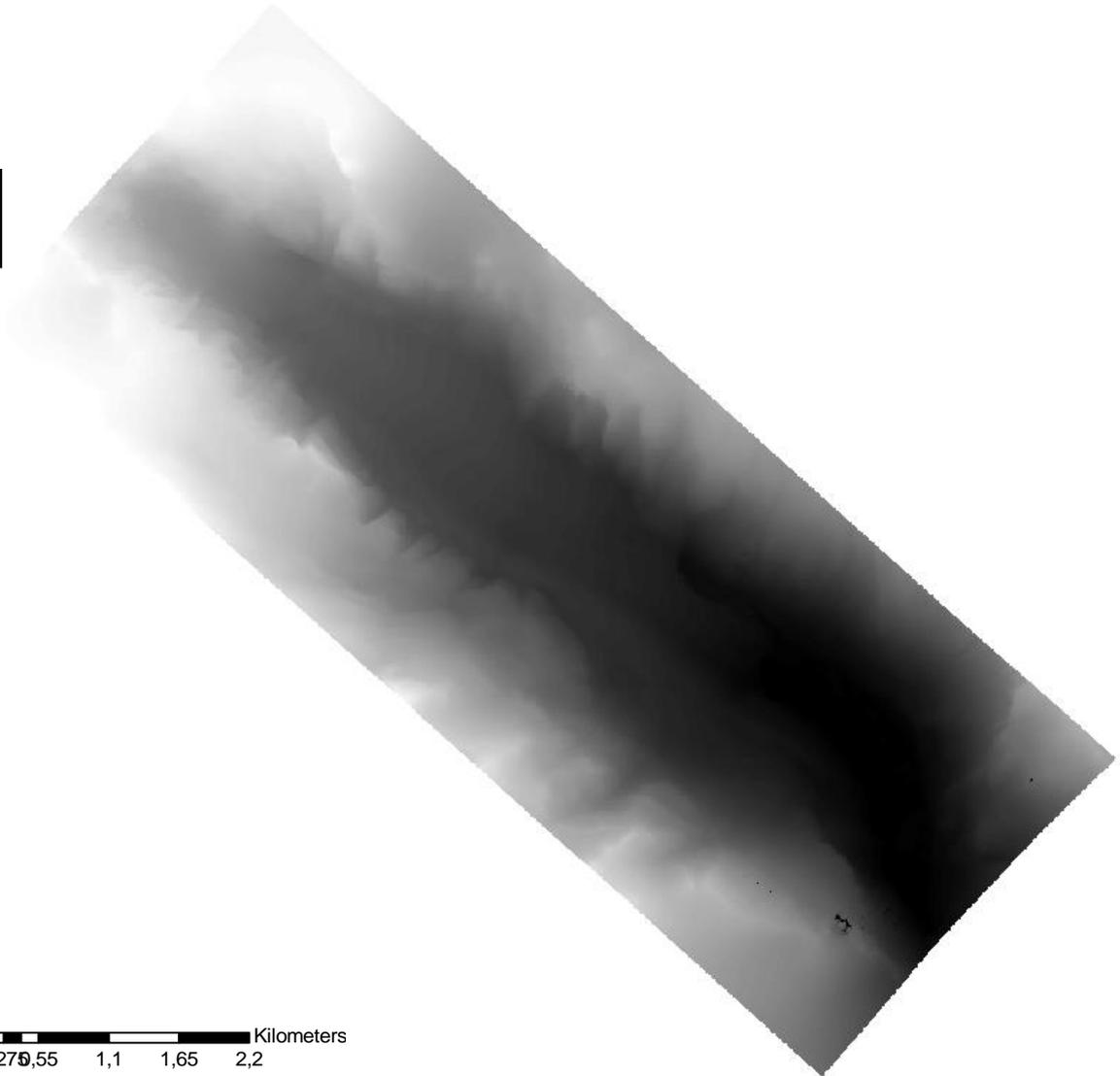
1



0 0,27 0,55 1,1 1,65 2,2 Kilometers

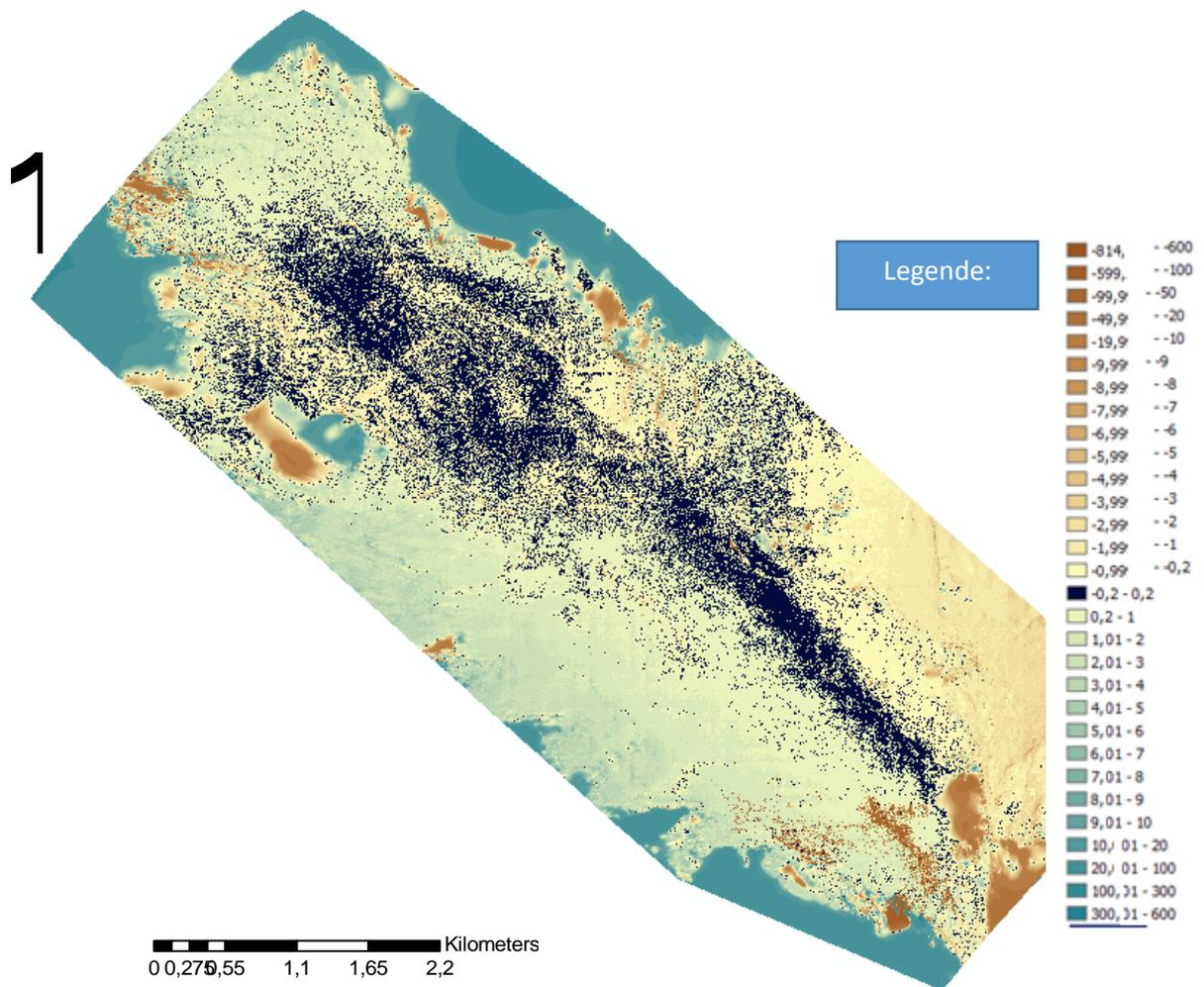
5P DEM aus Arc-GIS

1

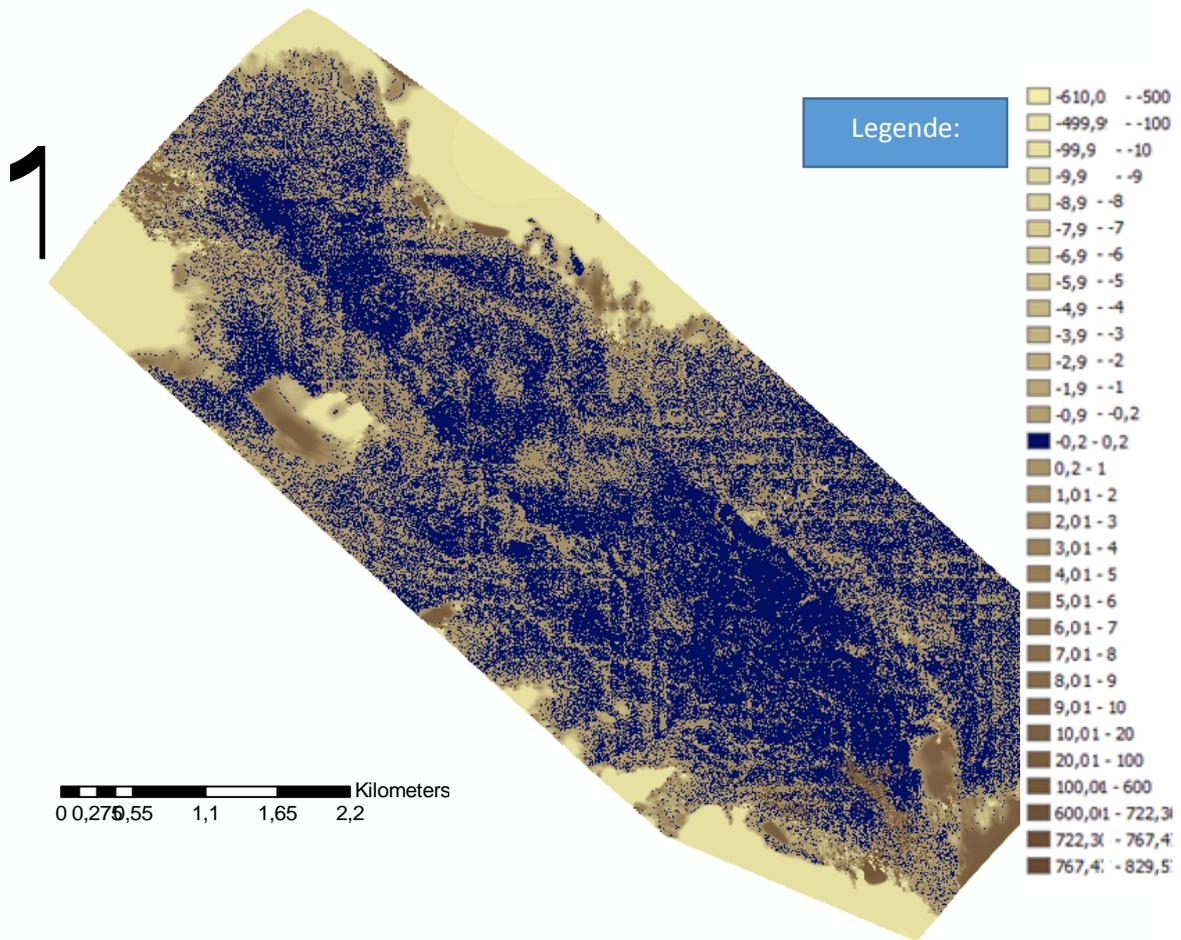


0 0,27 0,55 1,1 1,65 2,2 Kilometers

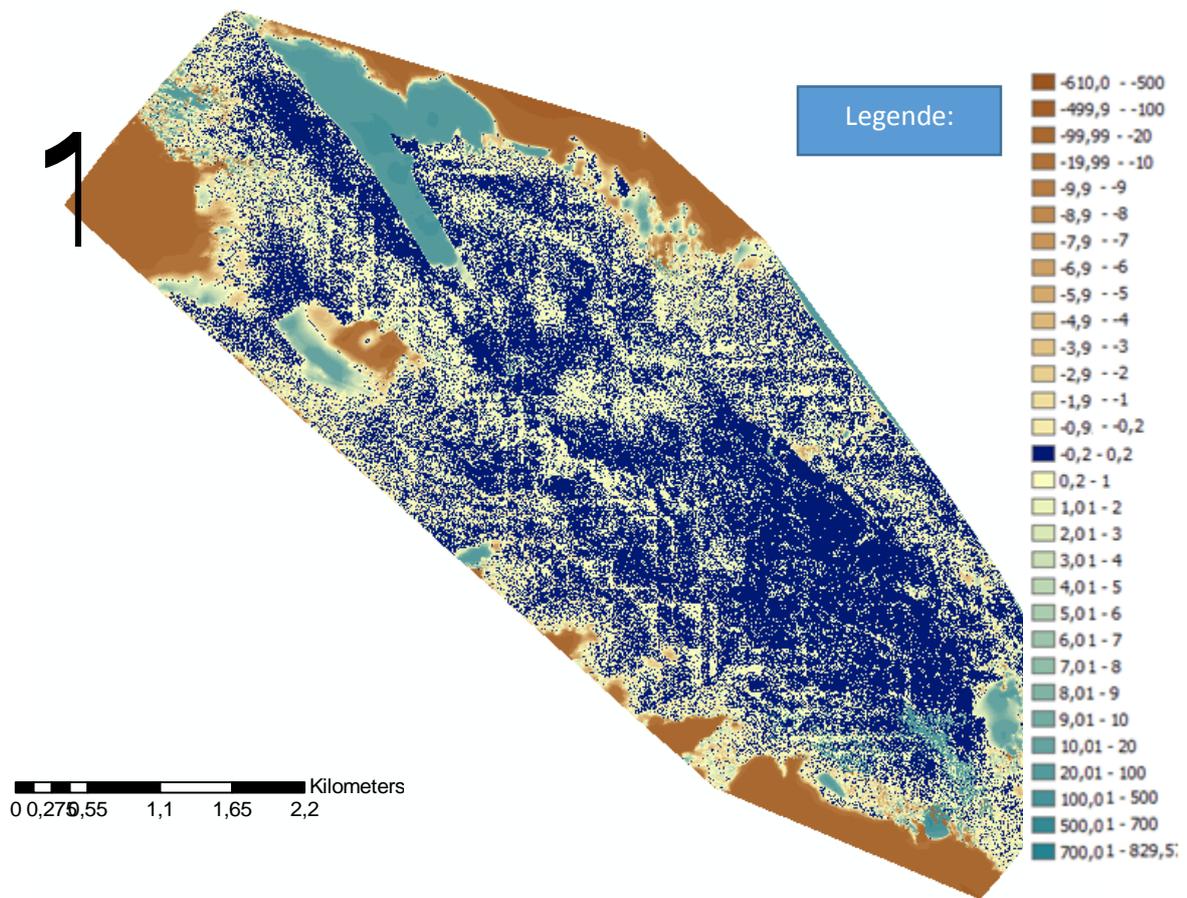
25P DEM aus Arc-GIS minus 25P DEM aus Agisoft



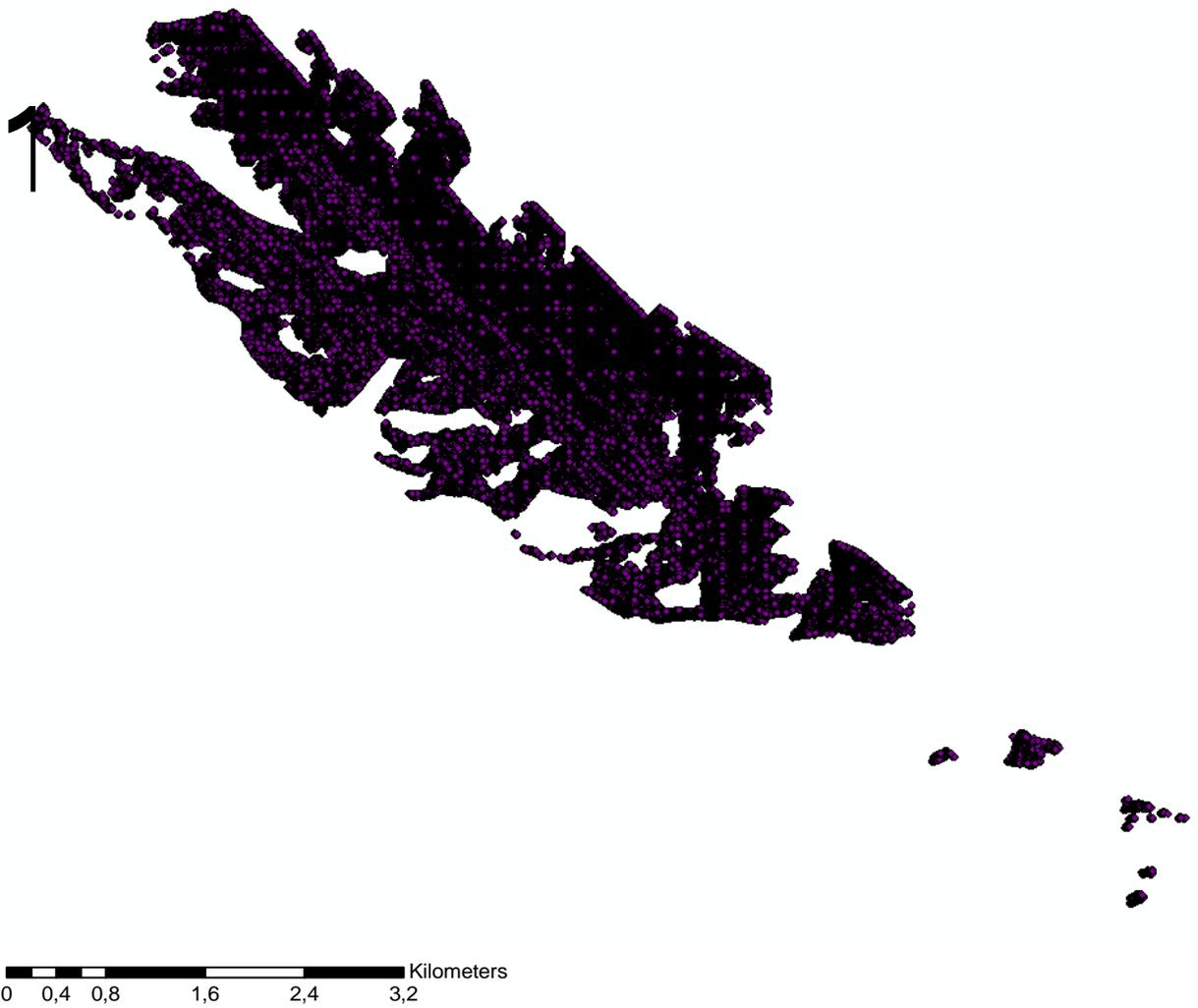
15P DEM aus Arc-GIS minus 15P DEM aus Agisoft



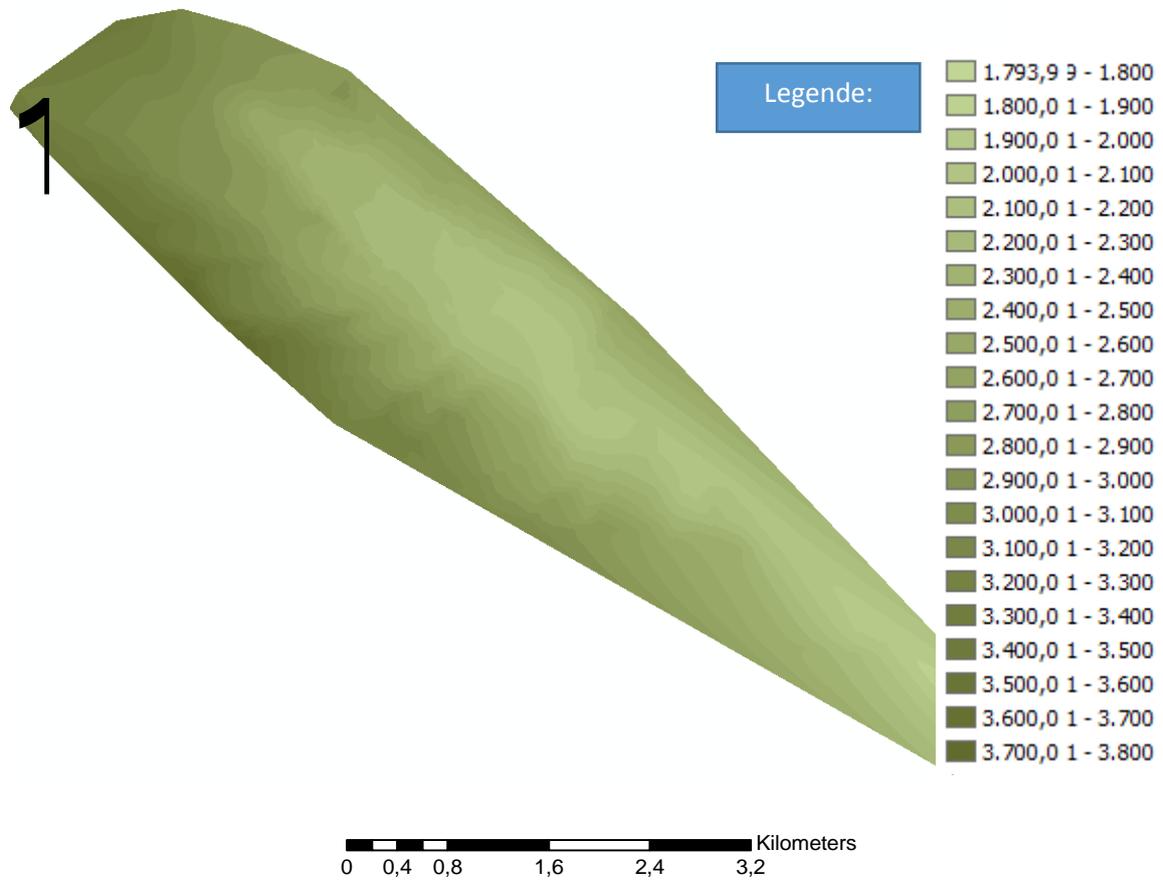
5P DEM aus Arc-GIS minus 5P DEM aus Agisoft



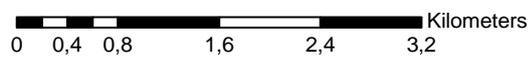
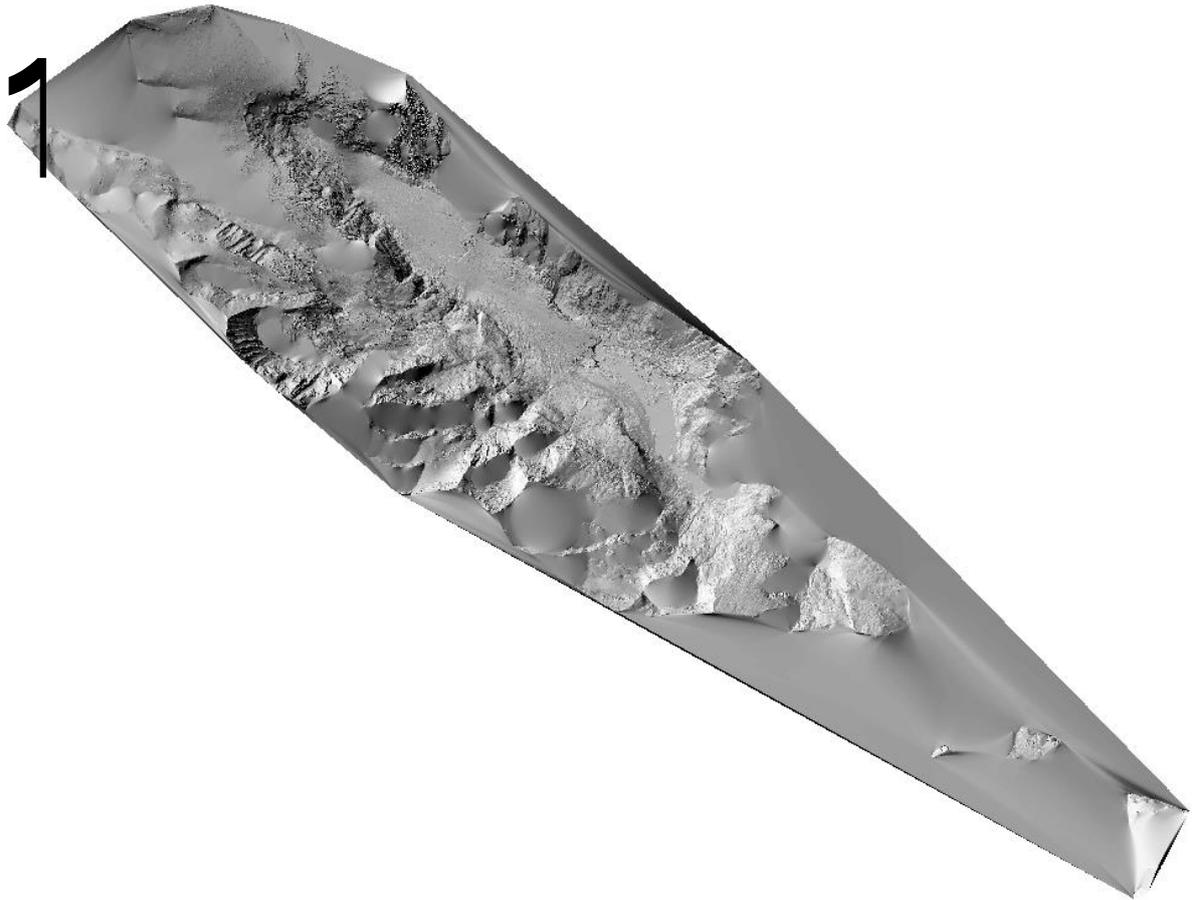
Result aus Risscan Punktwolke:



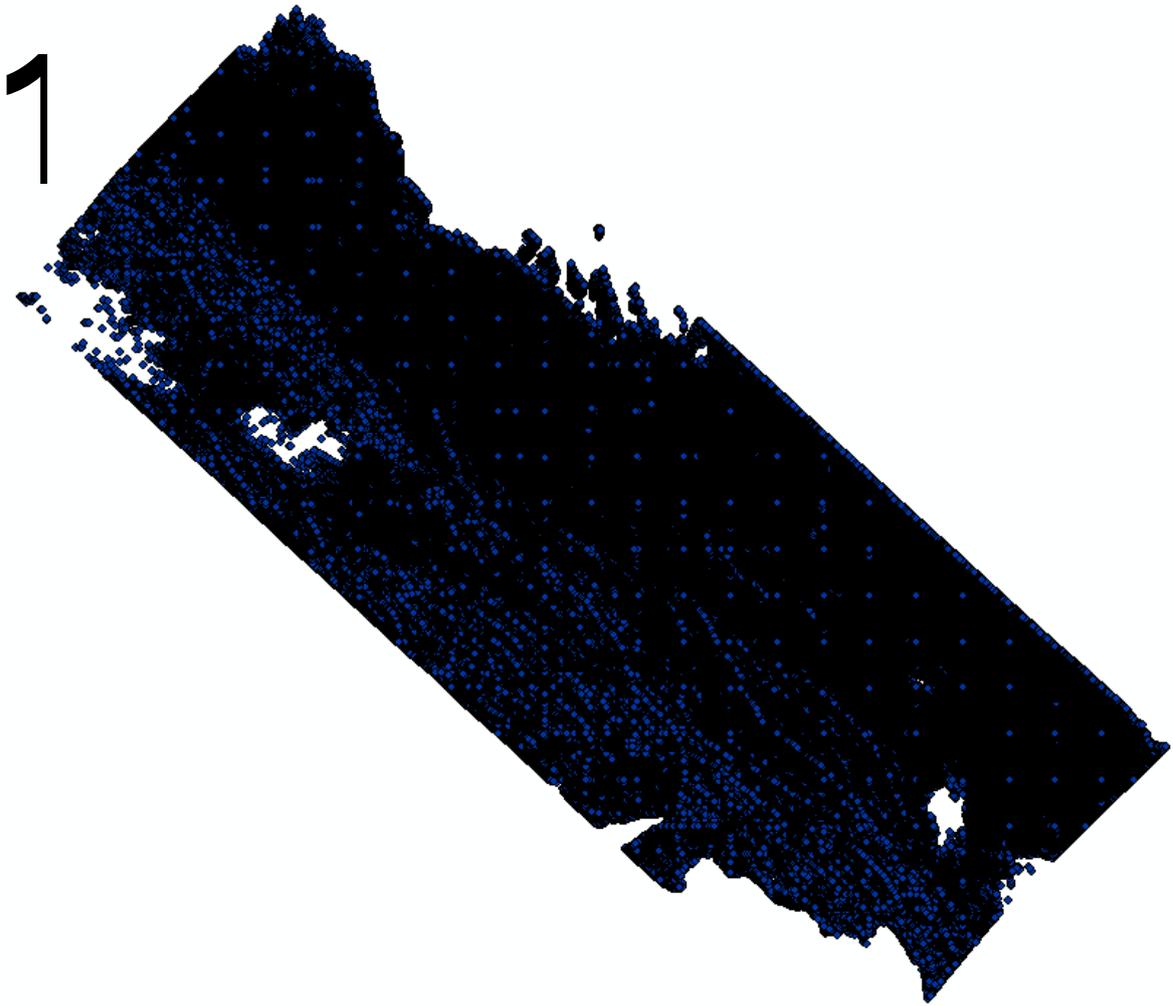
DEM aus Risscan Punktwolke:



Hillshade aus dem Laserscan

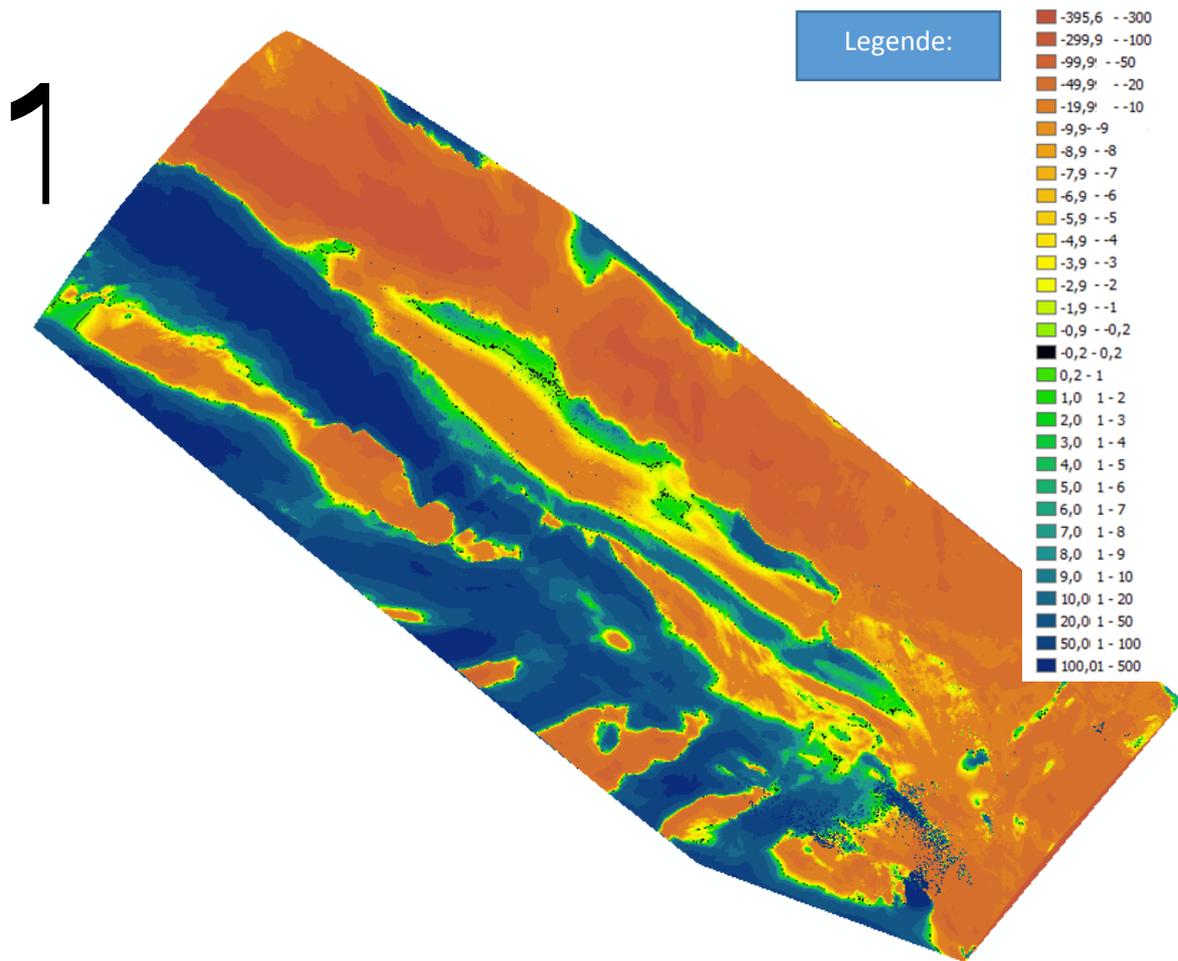


Angepasste 25P Punktwolke:



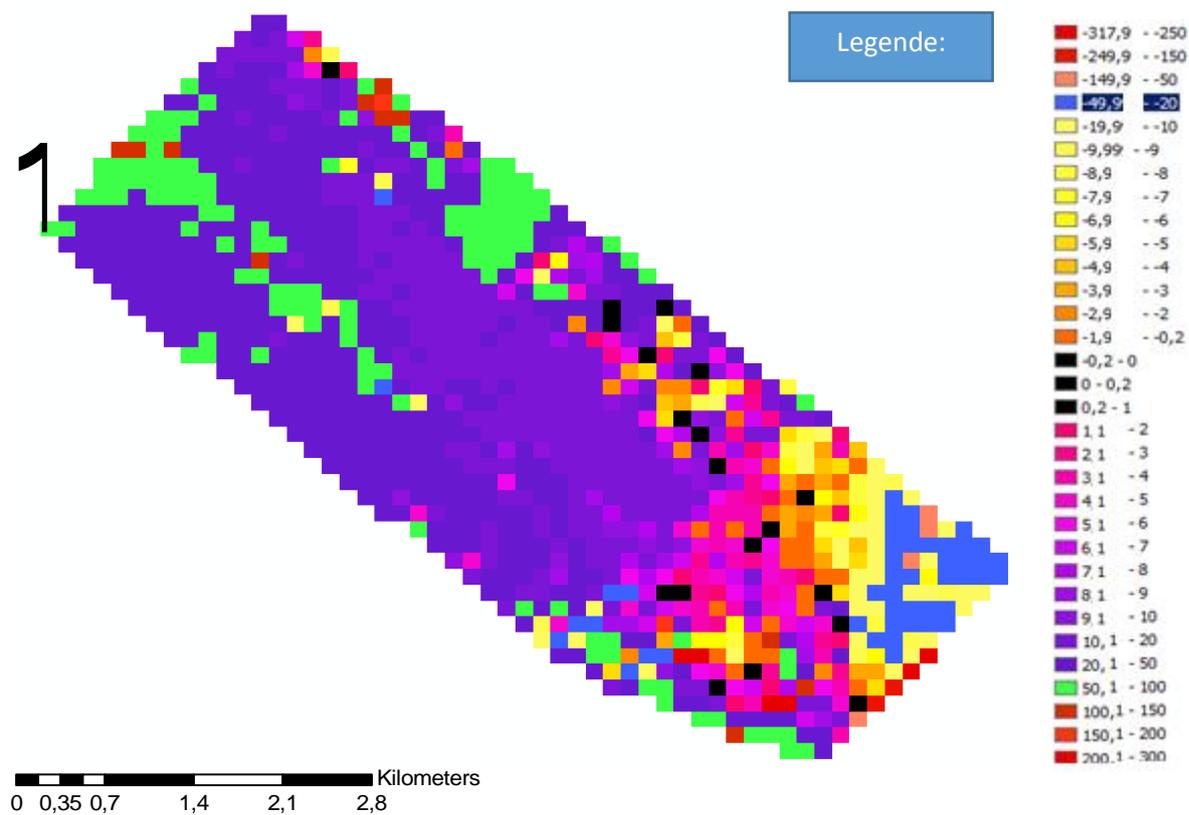
0 0,4 0,8 1,6 2,4 3,2 Kilometers

Resultat aus Risscan minus angepasste 25P Punktwolke:



0 0,4 0,8 1,6 2,4 3,2 Kilometers

Resultat aus Risscan minus angepasste 25P Punktwolke Pixelgröße 100m:



Änderung der Eisdicke von 2015 bis 2017

