

Geografisches Institut Universität Zürich  
Abteilung Physische Geografie – 3G  
GEO 511 Masterarbeit

---

## **Wandernde Blöcke**

Ein Vergleich von Gletschertischbewegungen in den  
Schweizer Alpen

---

### **Betreut durch**

Dr. Michael Zemp

Dr. Jürg Alean

Rheinstrasse 6

8193 Eglisau

Juerg.alean@gmail.com

### **Fakultätsvertretung**

Prof. Andreas Vieli

### **Eingereicht durch**

Lea Schwendener

10729192

### **Eingereicht am**

29.09.2017



## I. Vorwort

Diese Masterarbeit bot die Gelegenheit, sich vielfältig in Feldarbeit, Theorie und Literatur vertiefen zu können. Mein Interesse gilt den Schweizer Alpen, sowie deren Gletscher, ob in der Freizeit oder an der Universität. Zum einen bedeutete diese Aufgabe zahlreiche Tage im Feld. Als begeisterte Geografin, ist die Arbeit im Feld die grösste Verlockung, bedeutet aber gleichzeitig viel Aufwand in der Vor- und Nachbearbeitung, welcher nicht zu unterschätzen ist. Die weiterführende Bearbeitung der gesammelten Daten konnten in dieser Arbeit mit Programmen durchgeführt werden, welche ich als Geografin auch in Zukunft verwenden werde.

Natürlich war dies alles nur möglich, dank der Unterstützung anderer. Einen grossen Dank möchte ich meinen Betreuern Michael Zemp und Jürg Alean ausrichten, welche mich durchwegs unterstützen, in der Feldarbeit sowie im Prozess des Schreibens. Die vielen Tage im Feld wären des Weiteren nicht möglich gewesen ohne Jessica Lardon, Fabian Emmenegger und Petra Schwendener, welche mich mit starker Hand und ausdauernder Geduld unterstützten. Einen weiteren Dank geht an Patrick Marchi für die Unterstützung bei technischen Problemen am Computer. Matthias Huss von der VAW für den Erhalt der Luftbilder und Philip Jörg für die Benutzung der Infrastruktur in seinem Büro und die Hilfe bei zahlreichen Stolpersteinen. Franziska Mohr und Miriam Reut erhalten einen grossen Dank für das Gegenlesen in der Schlussphase der Arbeit. Bei Andreas Schwendener und Eva Gubler möchte ich für Ihren Einsatz im grafischen Bereich bedanken. Und nicht zuletzt meiner ganzen Familie und meinem Freund für die Unterstützung während des ganzen Studiums.



## II. Zusammenfassung

Die Schuttbedeckung auf Gletschern hat einen Einfluss auf dessen Schmelzregime und somit auch auf die lokale Bevölkerung, welche von dem Schmelzwasser als Frischwasser oder zur Energiegewinnung profitiert. Die Gefahren bei hohem Schmelzwasser sind hingegen Murgänge und Hochwasser. Die Bedeutung der Schuttbedeckung auf den Gletschern wurde in der Forschung erkannt und viele Studien dazu verfasst. Einzelne Blöcke wurden jedoch kaum untersucht. Es finden sich nur knappe Definitionen über den Aufbau und die Beschaffenheit von Gletschertischen. Ziel dieser Arbeit ist es Erkenntnisse über die Bewegung der Gletschertische zu gewinnen. Aufgrund Beobachtungen im Feld, wurde die Annahme getroffen, dass Gletschertische zusätzlich zu ihrer Bewegung mit der Gletschermoräne eine Ablenkung erfahren.

Diese Ablenkung wurde im Feld durch einzelne vermessene Blöcke über zwei Schmelzperioden auf dem Oberaar- und dem Persgletscher beobachtet. In Luftbildern wurde der räumliche und der zeitliche Rahmen der Beobachtungen erweitert. Dabei wurden Luftbilder von drei Gletschern der Schweizer Alpen verwendet, dem Oberaar-, Unteraar- und dem Gornergletscher von 2012-2015. Es wurden zufällig Blöcke auf den Gletschern ausgewählt und ihre Bewegung über vier Jahre hinweg verfolgt. Eine weitere Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit sollte dazu dienen zukünftige Feldarbeit zu erleichtern. Es wurden Schmelzmodelle angewendet und verglichen. Ziel dieses Vergleichs war es, die Schmelze bei den vermessenen Blöcken zu modellieren. Dies könnte den Materialaufwand bei weiteren Untersuchungen vermindern.

Es lässt sich zusammenfassen, dass durch die angewandten Methoden eine Abweichung der Gletscherblöcke zur Gletscherfliessbewegung entdeckt wurde. Diese ist vorwiegend in südöstlicher Richtung zur Mittelmoräne und bewegt sind in der Grössenordnung vom einstelligen Meterbereich. Die untersuchten Schmelzmodelle deckten sich in dieser Arbeit nicht mit den Resultaten im Feld.



## III. Inhalt

<b>I. Vorwort</b> .....	<b>I</b>
<b>II. Zusammenfassung</b> .....	<b>II</b>
<b>III. Inhalt</b> .....	<b>III</b>
<b>IV. Abbildungen</b> .....	<b>V</b>
<b>V. Tabellen</b> .....	<b>VII</b>
<b>VI. Abkürzungen und Erläuterungen</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1. Motivation .....	1
1.2. Stand der Forschung .....	3
1.3. Fragestellungen und Ziele .....	4
<b>2. Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>6</b>
2.1. Gletschertische .....	6
2.2. Mittelmoräne .....	7
2.3. Schutttransport .....	8
2.4. Strahlungsbilanz .....	9
2.5. Der Einfluss der Schuttbedeckung .....	11
<b>3. Untersuchungsgebiet</b> .....	<b>13</b>
3.1. Oberaargletscher .....	13
3.2. Persgletscher .....	15
3.3. Unteraargletscher .....	17
3.4. Gornergletscher .....	18
<b>4. Daten</b> .....	<b>21</b>
4.1. Luftbilder .....	21
4.2. swissALTI3D .....	22
4.3. Meteorologische Daten .....	23
<b>5. Methoden</b> .....	<b>24</b>
5.1. Konzept der Feldarbeit .....	24
5.1.1. Modellversuch .....	25
5.1.2. Vermessung .....	27
5.1.3. Nachbearbeitung zu 3D Modellen .....	30

---

5.2. Luftbildanalyse.....	31
5.3. Schmelzmodell .....	35
<b>6. Resultate .....</b>	<b>39</b>
6.1. Feldstudie.....	39
6.1.1. Persgletscher .....	41
6.1.2. Oberaargletscher.....	43
6.1.3. Zusatzstudie Oberaargletscher .....	47
6.2. Luftbildanalyse.....	49
6.2.1. Oberaargletscher.....	50
6.2.2. Persgletscher .....	54
6.2.3. Gornergletscher.....	54
6.2.4. Unteraargletscher.....	57
6.3. Schmelzmodell .....	62
6.3.1. Persgletscher .....	63
6.3.2. Oberaargletscher.....	64
6.3.3. Zusammenhang Schmelze – Blockbewegung .....	67
<b>7. Diskussion .....</b>	<b>68</b>
7.1. Feldstudie.....	68
7.2. Luftbildanalyse.....	74
7.3. Schmelzmodell .....	79
<b>8. Schlussfolgerungen .....</b>	<b>81</b>
<b>9. Ausblick.....</b>	<b>83</b>
<b>10. Literatur.....</b>	<b>84</b>
<b>11. Anhang.....</b>	<b>90</b>
11.1. Feldstudie .....	90
11.2. Luftbildanalyse .....	96
11.3. Schmelzwerte .....	102
<b>12. Persönliche Erklärung .....</b>	<b>105</b>

## IV. Abbildungen

Abbildung 2.1 Beziehung zwischen Schuttbedeckung und Ablation .....	11
Abbildung 3.1 Kartenausschnitt des Oberaargletschers .....	14
Abbildung 3.3 Längenveränderung des Oberaargletschers zwischen 1858 und 2013.....	14
Abbildung 3.4 Kartenausschnitt des Persgletschers.....	15
Abbildung 3.5 Längenveränderung des Morteratschgletscher zwischen 1878 und 2015.....	16
Abbildung 3.6 Kartenausschnitt des Unteraargletschers .....	17
Abbildung 3.7 Längenveränderung des Unteraargletschers zwischen 1858 und 2013.....	18
Abbildung 3.8 Kartenausschnitt des Gornergletscher.....	19
Abbildung 3.9 Längenveränderung des Gornergletschers zwischen 1858 und 2013.....	20
Abbildung 5.1 Ausschnitt des Modellversuches in Agisoft.....	26
Abbildung 5.2 Ausschnitt des Modellversuches in Agisoft.....	26
Abbildung 5.3 Verbindung zweier Ablationsstangen.....	27
Abbildung 5.4 Die Dampfdruckkurven von Propan und Butan.....	28
Abbildung 5.5 Situation im Feld .....	30
Abbildung 5.6 Ausschnitt aus dem Arbeitsprozess der Luftbildanalyse in ArcMap.....	33
Abbildung 5.7 Berechnung der Gletschertischbewegung bei der Luftbildanalyse .....	34
Abbildung 5.8 Darstellung einer Feldmessung mit Ablationsstangen .....	36
Abbildung 6.1 Lage der Gletschertische PE1 und PE2 am Persgletscher .....	41
Abbildung 6.2 Lage der Gletschertische OA1, OA2 und OA3 auf dem Oberaargletscher.....	43
Abbildung 6.3 Bildserie des 3D Modells von dem Gletschertisch OA1 der Feldsaison 2017 .....	44
Abbildung 6.4 Der Block OA1 in der Saison 2017 im Profil .....	45
Abbildung 6.5 Der Block OA2 fotografiert von Südwesten .....	46
Abbildung 6.6 Lage des Feldversuches .....	47
Abbildung 6.7 Vergleich zwischen Blockgrösse und Sockelhöhe der Zusatzstudie .....	47
Abbildung 6.9 Kartenausschnitt bearbeitet aus dem Luftbild des Oberaargletschers 2014 .....	50
Abbildung 6.10 Vergleich der Bewegung quer zur Mittelmoräne und der Blockgrösse .....	51
Abbildung 6.11 Vergleich der Bewegung in Gletscherfliessrichtung und der Blockgrösse. ....	51
Abbildung 6.12 Kartenausschnitt bearbeitet aus dem Luftbild vom Gornergletscher 2014 .....	54
Abbildung 6.13 Vergleich der Blockgrösse mit der Blockbewegung am Gornergletscher .....	55
Abbildung 6.14 Kartenausschnitt bearbeitet aus dem Luftbild vom Unteraargletscher 2015 .....	58
Abbildung 6.15 Vergleich der Blockgrösse und der Blockbewegung am Unteraargletscher .....	59
Abbildung 6.16 Kumulative Schmelzwerte am Persgletscher 2016.....	64
Abbildung 6.17 Kumulative Schmelzwerte Oberaargletscher 2016.....	65
Abbildung 6.18 Kumulative Schmelzwerte Oberaargletscher 2017.....	66
Abbildung 7.1 Schema eines Gletschertischzyklus .....	68
Abbildung 7.2 Block nördlich der Mittelmoräne am Oberaargletscher .....	71
Abbildung 7.3 Ausschnitt aus dem Luftbild vom Gornergletscher 2015. ....	75
Abbildung 11.1 Serie der 3D Modelle des Blockes PE1 in der Schmelzsaison 2016.....	90
Abbildung 11.2 Serie der 3D Modelle des Blockes PE1 in der Schmelzsaison 2016.....	90
Abbildung 11.3 Serie der 3D Modelle des Blockes PE2 in der Schmelzsaison 2016.....	91

---

Abbildung 11.4 Serie der 3D Modelle des Blockes PE2 in der Schmelzseason 2016.....	91
Abbildung 11.5 Serie der 3D Modelle des Blockes OA1 in der Schmelzseason 2016. ....	92
Abbildung 11.6 Serie der 3D Modelle des Blockes OA1 in der Schmelzseason 2017. ....	92
Abbildung 11.7 Serie aus den Fotoaufnahmen des Blockes OA1 in der Schmelzseason 2017 ..	93
Abbildung 11.8 Serie der 3D Modelle des Blockes OA2 in der Schmelzseason 2017. ....	94
Abbildung 11.9 Serie aus den Fotoaufnahmen des Blockes OA2 in der Schmelzseason 2017 ..	94
Abbildung 11.10 Serie der 3D Modelle des Blockes OA3 in der Schmelzseason 2017 .....	95
Abbildung 11.11 Serie aus den Fotoaufnahmen des Blockes OA3 2017. ....	95
Abbildung 11.12 Kartenausschnitt des Oberaargletschers 2012.....	96
Abbildung 11.13 Kartenausschnitt des Oberaargletschers 2013.....	96
Abbildung 11.14 Kartenausschnitt des Oberaargletschers 2014.....	97
Abbildung 11.15 Kartenausschnitt des Oberaargletschers 2015.....	97
Abbildung 11.16 Kartenausschnitt des Unteraargletschers 2012.....	98
Abbildung 11.17 Kartenausschnitt des Unteraargletschers 2013.....	98
Abbildung 11.18 Kartenausschnitt des Unteraargletschers 2014.....	99
Abbildung 11.19 Kartenausschnitt des Unteraargletschers 2015.....	99
Abbildung 11.20 Kartenausschnitt des Gornergletschers 2012.....	100
Abbildung 11.21 Kartenausschnitt des Gornergletschers 2013.....	100
Abbildung 11.22 Kartenausschnitt des Gornergletschers 2014.....	101
Abbildung 11.23 Kartenausschnitt des Gornergletschers 2015.....	101

## V. Tabellen

Tabelle 4.1 Liste der verwendeten Luftbilder und ihr Aufnahme Datum. ....	21
Tabelle 5.1 Charakteristische Werte für Schnee und Eis Albedo .....	38
Tabelle 6.1 Tabelle zur Auswertung der Distanzen und Bewegungsrichtung aller Blöcke .....	40
Tabelle 6.2 Einteilung der untersuchten Blöcke der Zusatzstudie in Klassen der Form. ....	48
Tabelle 6.3 Anzahl und Distanz quer zur Mittelmoräne der untersuchten Blöcke.....	49
Tabelle 6.4 Vergleich der Blockgrösse und der Blockbewegung am Oberaargletscher.....	51
Tabelle 6.5 Vergleich der Lage zur Mittelmoräne und der Blockbewegung, Oberaargletscher..	52
Tabelle 6.6 Vergleich des Untergrundes und der Blockbewegung am Oberaargletscher .....	53
Tabelle 6.7 Vergleich der Blockgrösse und der Blockbewegung am Gornergletscher. ....	55
Tabelle 6.8 Vergleich der Lage zur Mittelmoräne und der Blockbewegung, Gornergletscher....	56
Tabelle 6.9 Vergleich des Untergrundes und der Blockbewegung am Gornergletscher .....	57
Tabelle 6.10 Vergleich der Blockgrösse und der Blockbewegung am Unteraargletsche .....	59
Tabelle 6.11 Vergleich der Lage zur Mittelmoräne/Blockbewegung am Unteraargletscher .....	60
Tabelle 6.12 Vergleich des Untergrundes und der Blockbewegung am Unteraargletscher .....	61
Tabelle 6.13 Gemessene Schmelze der Feldstudie .....	63
Tabelle 6.14 Kalibrierte Werte für die kumulativen Schmelzwerte am Persgletscher 2016.....	63
Tabelle 6.15 Kalibrierte Werte für die kumulativen Schmelzwerte am Oberaargletscher 2016..	65
Tabelle 6.16 Kalibrierte Werte für die kumulative Schmelzwerte am Oberaargletscher 2017 ....	66
Tabelle 6.17 Vergleich der kumulativen Schmelze mit der zurückgelegten Distanz.....	67
Tabelle 11.1 Schmelzwerte von OA1 in der Messperiode 2016 .....	102
Tabelle 11.2 Schmelzwerte von PE1 und PE2 in der Messperiode 2016.....	102
Tabelle 11.3 Schmelzwerte des Blockes OA1 in der Messperiode 2017. ....	103
Tabelle 11.4 Schmelzwerte des Blockes OA2 in der Messperiode 2017 .....	103
Tabelle 11.5 Schmelzwerte des Blockes OA3 in der Messperiode 2017 .....	104



## VI. Abkürzungen und Erläuterungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
Agisoft Photoscan	Computer Programm nutzt Photogrammetrie als Auswerteverfahren, um aus Fotos automatisch 3DModelle zu erzeugen.
ArcMap	Bestandteil des ArcGIS-Softwareproduktes des Unternehmens ESRI
Compass A	Funktion für den Kompasswinkel (im Uhrzeigersinn von Norden) in ArcMap
DTM	digitales Terrainmodell
EBM	Energy Balance Model (dt: Energiebilanz Modell)
GIS	Geografisches Informationssystem
GLAMOS	Schweizerisches Gletschermessnetz
PDD	Positive Degree Day Model (dt.: Positives Gradtag Modell)
PDDSW	Positive Degree Day Model Short Wave Radiation (dt.: Positives Gradtag Modell unter Einbezug der kurzwelligen Strahlung)
$R^2$	Bestimmtheitsmass
$\sigma$	Standardabweichung
Swiss Alti 3D	Digitales Höhenmodell, welches die Oberfläche der Schweiz ohne Bewuchs und Bebauung beschreibt
SwissMetNet	Referenzmessnetz der MeteoSchweiz
SwissTopo	Bundesamt für Landestopografie
VAW	Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich



# 1. Einleitung

Der oberflächige Transport von Schutt auf den Gletschern beschäftigte die Forschung im 19. Jahrhundert sehr. Leider lassen sich in der aktuellen Forschung nur wenige Studien finden, welche sich mit dieser Thematik auseinandersetzen. Genau an diesem Punkt soll deshalb diese Masterarbeit ansetzen. Sie zielt darauf ab, oberflächige Blockbewegungen mittels verschiedener Methoden zu charakterisieren und analysieren. Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den aktuellen Forschungslücken und erläutert die Fragestellungen und Ziele, welche in dieser Arbeit beantwortet werden.

## 1.1. Motivation

Die Schuttbedeckung der Gletscher ist ausschlaggebend für die Gletscherdynamik (Nakawo et al. 1999). Folglich hat diese auch einen Einfluss auf das Schmelzwasserregime (Nicholson und Benn 2013), welches auf lokaler Ebene von grosser Bedeutung für die Energieversorgung (KWO) ist oder einen möglichen Auslöser hydrologischer Gefahren wie Überschwemmungen oder Murgängen darstellt (Haeberli und Beniston 1998). Umso erstaunt, dass schuttbedeckte Gletscher zwar sehr gut erforscht und dokumentiert sind, das Wissen über die Bewegung der einzelnen Blöcke auf den Gletschern jedoch sehr gering ist. Die Literatur über Gletschertische beschränkt sich auf kurze Definitionen zur Entstehung der Gletschertische und die Rutschung durch die Schwerkraft und Schmelzvorgänge. Die folgende Arbeit wird sich den einzelnen Blöcken und ihrer Bewegung widmen.

Der Schweizer Geologe und Alpenforscher Franz Joseph Hugi beschrieb 1842 am Unteraargletscher wohl als einer der Ersten einen Gletschertisch schriftlich: «Die zwei Granitblöcke, zwischen denen die Hütte in den Eisgrund eingehauen war, stehen jetzt 17 Fuss auseinander, da sie damals nur 8 Fuss abstanden. [...] Ein 26'000 Kubikfuss starker Granit bei der Hütte lag damals unterm Firnschnee begraben, der nun in Gletscher umgewandelt ist, und den Block nicht nur auf die Oberfläche gehoben, sondern auf zwei Eiskegeln hoch in die Luft gestellt hat, sodass unter ihm eine Menge Menschen Obdach finden könnten» (Hugi 1842). Während Franz Joseph Hugi 1842 nur eine Beschreibung der Gletschertische wagte, wurde 11 Jahre später von Rudolph Ludwig (1853) eine These zur Bewegung der Blöcke gewagt. Er

vermutete, dass sich Blöcke auf den Gletschern mehrheitlich gleichmässig mit dem Gletscher fortbewegen oder «[...] Gletschertische bildend, d.h. eine untererliegende Eissäule vor dem schnellen Auftauen schützend, allmählich auf eine über der allgemeinen Fläche emporragenden Eismasse, welche dünner ist, als der Durchmesser des Felsstückes, zu liegen kommen, nach dem Abschmelzen des Eisfusses sich überstürzend auf der Gletscheroberfläche fortrollen». (Ludwig 1853) So hat er im 19.Jhd. die Beobachtung gemacht, dass Blöcke durch die Bildung von Gletschertischen eine Abweichung zur Gletscherfliessrichtung machen. Es wurden jedoch keine weiteren und tiefergehenden Studien dazu durchgeführt.

Luftbilder und Beobachtungen im Feld sprechen für diese These. Auf dem Persgletscher in den Schweizer Ostalpen ist zu erkennen, dass eine Verteilung der Blöcke der Mittelmoräne quer zur Fliessbewegung des Gletschers stattfindet (Abbildung 1.1).

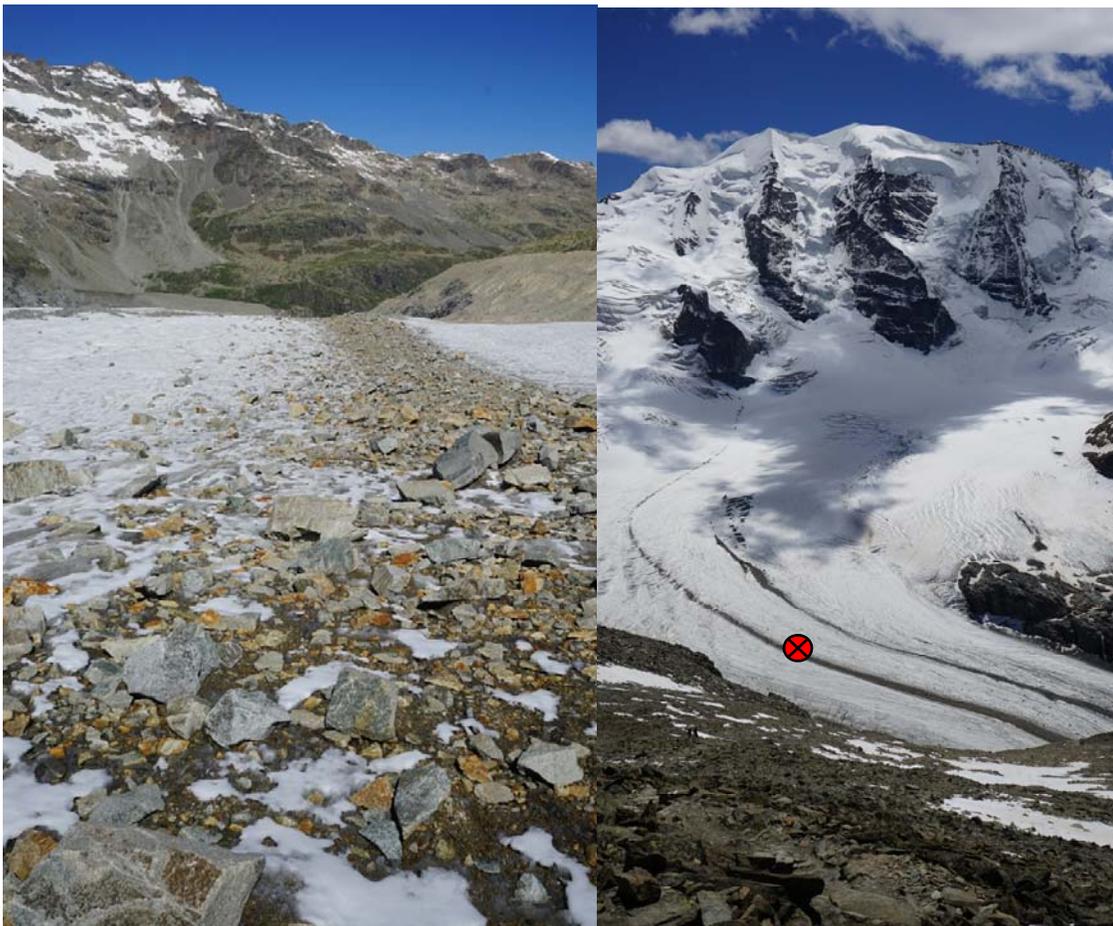


Abbildung 1.1 Die Verteilung des Schuttes auf dem Persgletscher (eigene Bilder 02.08.2017). Die Moräne auf dem linken Bild zeigt eine Verteilung von Schuttblöcken südlich der Moräne, während auf der nördlichen Seite der Moräne keine Verteilung der Blöcke zu erkennen ist. (linkes Bild: Blickrichtung nach Westen, rechtes Bild: Blick vom Munt Pers in Richtung Südosten, am roten Punkt wurde das linke Bild aufgenommen).

Beobachtungen der Gletschertische zeigen, dass diese eine Tendenz aufweisen, quer zur Mittelmoräne in südlicher Richtung abzurutschen, zumindest bei Gletschern, die sich in der nördlichen Hemisphäre befinden. Diese Tendenz wird vermutlich durch die Sonneneinstrahlung beeinflusst. Die daraus folgende Schmelze ist an der sonnenzugewandten Seite stärker. Diese einseitige Abschmelze führt zu einer Rutschung der Gletschertische in mehrheitlich südliche Richtung (mündliche Information von Jürg Alean, 28.6.2016).

Modernen Definitionen über Gletschertische sind jedoch keine Informationen über Bewegungsrichtung oder Distanzen zu entnehmen. Dieser Unterschied zwischen modernen Definitionen und eigener Beobachtung zeigt, dass es in diesem Themenfeld noch viel zu erforschen gibt.

Das Ziel dieser Arbeit ist deshalb ein verbessertes Verständnis der Bewegungen von Gletschertischen und deren antreibenden Prozessen zu gewinnen. Die hier betriebene Forschung befasst sich mit grundlegenden Prozessen der Glaziologie. Diese Grundlagen tragen dazu bei, die Parameter für weitere Forschungsthemen genauer zu bestimmen. Als Vorgehensweise für die Arbeit wurde eine Kombination aus Luftbildanalyse und Feldarbeit gewählt. Die Feldarbeit erforderte eine detaillierte Planung, einen gezielten Einsatz der Messgeräte, einen hohen Zeitaufwand und eine gewisse Flexibilität aufgrund des Wetters. Für die Luftbildanalyse wurde das Programm ArcMap und für die Verarbeitung der Beobachtungen das Programm Agisoft Photoscan verwendet. Des Weiteren wurden zwei Schmelzmodelle angewendet. Es konnte somit getestet werden, ob sich diese Produkte für eine Auswertung dieser Arbeit eignen oder für weitere Studien bessere Auswertungstools benutzt werden sollten.

## 1.2. Stand der Forschung

Während es viele Studien zum Einfluss des Schuttes auf das Schmelzregime und den Massenhaushalt gibt (z.B. Benn et al. 2012; Matzka und Fiebig 2006), findet man nur wenige Studien zu den einzelnen Blöcken. Die Literatur über Gletschertische beschränkt sich auf kurze Definitionen zur Entstehung der Gletschertische und die Rutschung durch die Schwerkraft und Schmelzvorgängen. Der Stand der Forschung beruht zum grössten Teilen auf Schriften aus dem 19. Jahrhundert. Es wird angenommen, dass die Gletschertische sich mit dem Gletscher mitbewegen oder durch den Aufbau von Gletschertischen und das Abrutschen am Ende des Schmelzzyklus eine Abweichung zur Gletscherfliessrichtung entstehen kann (Reclus 1874,

Ludwig 1853, Zschokke 1842). Modernere Definitionen stützen die These der Wissenschaftler im 19. Jh., beschreiben aber kaum neue Erkenntnisse. Die folgenden modernen Definitionen sind den historischen Quellen sehr ähnlich. In diesen wird der Ablauf der Tischbildung im Vergleich jedoch genauer beschrieben: Während das Gletschereis um den Block herum schmelze, sei das Eis unter dem Schuttblock isoliert und somit vor der Schmelze geschützt. Der Schuttblock stehe relativ zum Gletscher auf einem Eispedest. Je höher der Sockel, desto weiter reiche die Solarstrahlung unter den Gletschertisch, bis ein bestimmter Grenzwert überschritten wird und der Gletschertisch ins Rutschen komme (www.swisseduc.ch, 26.08.2016). In der Literatur finden sich weitere, sehr ähnliche Definitionen von Gletschertischen. In diesen wird der relative Aufbau eines Sockels und einem Block, im Idealfall einer Steinplatte, beschrieben (Cogley et al. 2011; Florin und Bauder 2005; www.spektrum.de, 21.08.2017; www.srf.ch, 21.08.2017; www.satgeo.zum.de, 22.08.2017; www.mars.geographie.uni-halle.de, 22.08.2017). Es würde sich nach diesen Definitionen keine Abweichung der Blockbewegung zur Mittelmoräne zeigen.

Der Literaturrecherche, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde, konnten weder Informationen über die Dauer einer Gletschertischbildung noch über die Distanzen und die Richtung, welche ein Block durch diese Rutschungen zurücklegt, entnommen werden.

### 1.3. Fragestellungen und Ziele

Der Fokus dieser Forschung liegt auf der von der Fließbewegung des Gletschers unabhängigen Bewegung der Gletschertische auf dem Gletscher. Aus den Beobachtungen ergibt sich Grund zur Annahme, dass Gletschertische eine Abweichung zur normalen Fließbewegung des Gletschers aufweisen. In der folgenden Arbeit, werde ich die Fragestellungen, welche sich aus dieser Annahme ergeben, anhand von Messungen der Gletschertischbewegungen im Feld und mithilfe von Luftbildern beantworten.

Um die Forschungsarbeit räumlich einzugrenzen, wurden nur Gletscher in den Schweizer Alpen untersucht. Eine zeitliche Begrenzung ergibt sich durch die Datenverfügbarkeit bei der Luftbildanalyse. Diese beschränkt sich auf die Jahre 2012 – 2015. Die Feldarbeit ist aufgrund des Zeitrahmens dieser Arbeit begrenzt und beläuft sich deshalb auf die Schmelzsaison von 2016 und 2017.

Folgende Fragen ergeben sich aus diesen Hintergründen:

1. Gibt es eine Abweichung in der Bewegungsrichtung der Schuttblöcke zur Gletscherfliessrichtung auf Gletschern in der nördlichen Hemisphäre?
2. In welche Richtung findet die Abweichung der Blockbewegung zur Gletscherfliessrichtung statt?
3. Welche Einflüsse sind für die Abweichung der Blockbewegung zur Gletscherfliessrichtung verantwortlich?
4. Was sind die räumlichen und zeitlichen Bedingungen dieses Phänomens?

Um die gesetzten Forschungsfragen zu beantworten wurden verschiedene Ansätze gewählt:

- Im Feld wurden ausgewählte Gletschertische vermessen und die Schmelzrate des Gletschers mit Ablationsstange bestimmt.
- Es wurde eine statistische Erfassung einer Blockgruppe im Feld erhoben.
- Während der Feldarbeit wurden Fotografien erstellt. In der Nachbearbeitung wurden daraus 3D-Modelle kreiert, mit welchen die Bewegungsweise der Gletschertische genauer festgehalten und analysiert werden konnte. Dafür wurde das Programm Agisoft Photoscan verwendet.
- Mittels Luftbildanalyse wurde auf einer grösseren Skala die Bewegung von Gletschertischen über eine längere Zeit hinweg beobachtet.
- Anhand der im Feld gemessenen Schmelzrate wurde die Verwendbarkeit des Schmelzmodells als erweiterte Methode für Ablationsmessungen getestet.

Durch diese Ansätze sollen in unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Auflösungen klare Aussagen über die exakte Bewegung von Gletschertischen in der Schweiz entwickelt werden.

Nach einer Einführung über die theoretischen Grundlagen und einer Vorstellung des Untersuchungsgebiets werden die verschiedenen Methoden vertieft vorgestellt. Die Resultate der einzelnen Methoden werden in der Diskussion verglichen und in einen grösseren Zusammenhang gebracht.



## 2. Theoretische Grundlagen

### 2.1. Gletschertische

Gletschertische entstehen durch die Abschattung des Gletschereises vor der Solarstrahlung. Ist ein Felsblock dick genug, um das darunterliegende Gletschereis vor der Solarstrahlung und den warmen Temperaturen zu schützen, bleibt das Eis unter dem Felsblock erhalten, während der Gletscher rundherum abschmilzt. Dies geschieht meist unter grösseren und flachen Steinen (Florin und Bauder 2005). So entsteht, in Relation zum umliegenden Gletscher gesehen, ein Sockel. Der Sockel kann im Falle eines Gletschertisches nur entstehen, wenn die Ablation des Eises um den Block herum höher ist als unter dem Block. Der Sockel stellt somit einen potentiellen Indikator für die Menge der Schneeschmelze auf dem Gletscher dar (Cogley et al. 2011; [www.geodz.com](http://www.geodz.com), 07.06.2017; [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de), 21.08.2017). Derselbe Prozess findet bei der Bildung von Sandkegeln oder von Eiskernen der Mittelmoränen statt (Güller 1950). Je höher der Sockel wird, desto stärker scheint die Sonne seitlich unter den Gletschertisch. Der Sockel wird auf der Seite mit der stärksten Solarstrahlung abgeschmolzen und somit rutscht der Gletschertisch durch die Schwerkraft seitlich ab. Dies ist ein sich ständig wiederholender Zyklus ([www.srf.ch](http://www.srf.ch), 21.08.2017, [www.swisseduc.ch](http://www.swisseduc.ch), 26.08.2016). Das Gebilde dieser Form der Ablation erinnert an einen Tisch. Dies erklärt den Ursprung des Namens dieses Phänomens.

Bei allen hier gefundenen Definitionen über Gletschertische, werden dieselben Merkmale erwähnt: „Steinplatte“, „vor der Sonne/Strahlung geschützt“ und „Sockel“. Auch bezüglich Abbau oder Zerfall des Tisches fallen in allen hier gesammelten Definitionen identische Begriffe: „Schwerkraft“ und „Abschmelzen“ (Cogley et al. 2011; Florin und Bauder 2005; [www.satgeo.zum.de](http://www.satgeo.zum.de), 22.08.2017; [www.srf.ch](http://www.srf.ch), 22.08.2017; [www.mars.geographie.uni-halle.de](http://www.mars.geographie.uni-halle.de) 22.08.2017). In einer Definition wird von einer maximalen Höhe des Sockels von einem Meter gesprochen ([www.satgeo.zum.de](http://www.satgeo.zum.de), 22.08.2017), während Reclus (1874) in seiner Beschreibung von Sockeln mit mehreren Meter Höhe spricht. Die Lage von Gletschertischen wird in der Darstellung von der Universität Halle besprochen und auf der Obermoräne lokalisiert, also auf der Oberfläche des Gletschers ([www.mars.geographie.uni-halle.de](http://www.mars.geographie.uni-halle.de), 22.08.2017).

Bisher ist wenig über die genaue Bewegung der Gletschertische bekannt. In der zuvor erwähnten historischen Schrift von Ludwig (1853) wird die Blockbewegung in

Gletscherfliessrichtung beschrieben. Eine später erschienene Schrift von Reclus (1874) vermutet, dass das Strahlungsmaximum der Sonne die Säule oder den Sockel dort stärker zum Schmelzen bringt. Dies habe zur Folge, dass die Steinplatte sich gegen Süden neigt, bis sie in diese Richtung abrutscht. Die Konsequenz ist eine Abweichung der Bewegungsrichtung der Gletschertische zur Gletscherfliessrichtung.

## 2.2. Mittelmoräne

Die Mittelmoräne eines Gletschers ist ein Kamm aus Gesteinsschutt, welcher ein Gletscher mit sich führt. Dieser entsteht meist, wenn zwei Gletscher zusammenfliessen ([www.swisseduc.ch](http://www.swisseduc.ch), 1.6.2017). Dabei verschmelzen die jeweiligen Seitenmoränen miteinander und bilden die Mittelmoräne (Matzka und Fiebig 2006). Das transportierte Material wird an der Gletscheroberfläche kaum mechanisch bearbeitet und weist eine kantige, grobe Form auf (Benn und Evans 2014).

Der Moränenschutt ist oberflächlich abgelagert und besteht in der Mitte aus einem Eiskern. Der Schutt der Oberfläche reicht also nicht bis zum Gletscherbett (Güller 1950; Matzka und Fiebig 2006). Die Fliessgeschwindigkeit des Gletschers spielt eine wichtige Rolle bei der Form der Mittelmoräne. So variiert zum Beispiel die Breite der Mittelmoräne an verschiedenen Lagen eines Gletschers und nimmt gegen Ende der Gletscherzunge zu. Grund dafür ist die verstärkte Abschmelzung des oberflächennahen Eises beim Verlangsamten der Gletscherbewegung, wodurch der Gesteinsschutt seitlich verlagert wird (Anderson 2000).

Die Mittelmoränen können eine enorme Ausdehnung erreichen, bei denen die Eismassen nur am Gletschertor, Brüchen und Spalten sichtbar werden. Wenn die Fliessgeschwindigkeit sehr langsam und der Schutteintrag hoch ist, kann sich aus der Mittelmoräne eine weitausgedehnte Bedeckung des Gletschers entwickeln und ein Blockgletscher entstehen. Eine erhöhte Geschwindigkeit fördert einen effizienten Abtransport des Schuttes. Der Eintrag des Schuttes wird von der Geologie bestimmt wie auch von der Steilheit der Felswände. Je steiler die Felswände sind, desto grösser ist das Volumen von Lawinen und Felsstürzen und somit der Schutteintrag des Gletschers (Shroder et al., 2000).

## 2.3. Schutttransport

Schutt erreicht einen Gletscher entweder an der Gletscheroberfläche oder am Gletscherbett. Supraglazialer Schutt, also Schutt auf der Gletscheroberfläche, kann durch Steinschlag, Lawinen oder kontinuierlicher Abtragung am Gletscherrand auf den Gletscher gelangen. Faktoren, welche diese Situation begünstigen sind Frostsprengung, Erdbeben, starke Niederschläge oder Verwitterung. Je nach der Geologie des Gebirges wird die Schuttbedeckung begünstigt (Benn und Evans 2014). Die Struktur des Gletschers spielt im Falle des Schutteintrages nur eine bedingte Rolle, viel wichtiger ist hier die Struktur des Gebirges rundherum, welche den Schutt liefern (Jennings et al. 2014).

Der Ursprung, die Form, der Transport und schliesslich die Ablagerung sind zum einen schwierig im glazialen Gelände zu beobachten und zum anderen abhängig von zahlreichen Faktoren wie der Schutteigenschaften, Schwerkraft, Temperatur, Fliessgeschwindigkeit, Wasserabflüsse oder sogar des Windes (Benn und Evans 2014). Auch der Schutttransport erfolgt supraglazial, englazial oder subglazial. Abflusssysteme können grosse Volumen der Gletschersedimente transportieren (Benn und Evans 2014). Die Strukturen des Gletschers wie zum Beispiel Abflusssysteme, Seen oder Moränenablagerungen bestimmen dabei die Bewegungsrichtung des Schuttes mit (Jennings et al. 2014; Matzka und Fiebig 2006).

Die Fortbewegung und Verteilung des Schuttes auf dem Gletscher wird durch die Gletscherstruktur bestimmt (Jennings et al. 2014). Der Gesteinsschutt wird von den Strukturen auf dem Gletscher wie Seitenmoränenablagerungen, Schmelzwassersystemen, Toteislöcher oder Stauseen abgelenkt (Matzka und Fiebig 2006). Je nach Grösse, Form und Beschaffenheit des Schuttes variiert der Transport auf dem Gletscher (Benn und Evans 2014). Wagner (2004) beschreibt die Mittelmoräne als Förderband mit Schutt bei feststehendem Ende. Die Ablagerung des Schuttes findet in der Endmoräne statt oder wird durch glazifluviale Prozesse wegtransportiert (Matzka und Fiebig 2006).

## 2.4. Strahlungsbilanz

Obwohl auch Schmelze durch Spannungen und geothermale Wärme am Grund von temperierten Gletschern entstehen kann, ist der Hauptantrieb der Gletscherschmelze die Strahlung an der Gletscheroberfläche. Die oberflächige Schmelze wird stark durch das Wetter beeinflusst und ist in den Wintermonaten gegen null, während sie im Sommer bis zu 10-20 cm  $d^{-1}$  erreichen kann. Abhängig von dem Strahlungsbudget des Gletschers verändert die Höhe über Meer und der Breitengrad die Menge der Schmelze (Hubbard und Glasser 2005).

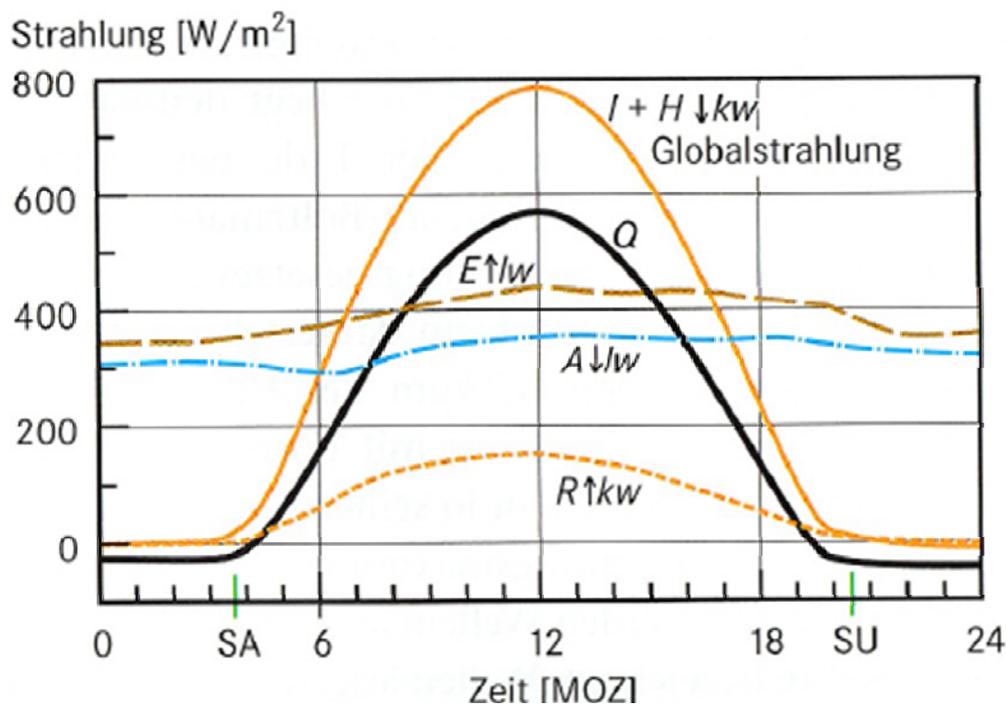


Abbildung 2.2 Tagesgang der verschiedenen Strahlungsströme über einem Wiesenboden an einem wolkenlosen Sommertag in Hamburg (verändert nach Dirmhirn 1964 aus Kraus 2001 in Benn und Evans 2014).

Kurzwellige, sichtbare Strahlung mit einer Wellenlänge kleiner als  $3\mu m$  ist das Licht, welches direkt von der Sonne ausgestrahlt oder gestreut und reflektiert wird. Die langwellige Strahlung hingegen ist von Auge nicht erfassbar, hat aufgrund seiner niedrigeren Temperatur eine Wellenlänge von mehr als  $3\mu m$  und ist die Strahlung, welche von Erdboden und der Atmosphäre ausgestrahlt wird. Der Anteil, welcher die Erde erreicht, wird als Globalstrahlung bezeichnet, zusammengesetzt aus der direkten Sonnenstrahlung, dem diffusen Himmelslicht und dem Streulicht, und wird beeinflusst durch die Dichte der Bewölkung. Die Erde kann Teile

der Strahlung absorbieren oder reflektieren. Die direkte Reflexion wird als Albedo bezeichnet und besitzt zum Beispiel bei einer Schneedecke sehr hohe Werte, bei einem Wald geringere. Die Energie, welche die Erde absorbiert, wird als langwellige Emission wieder abgestrahlt. Der Strahlungshaushalt der Erde wird in der folgenden Strahlungsbilanz zusammengefasst:

$$Q = (I + H - R) - (E - A)$$

Wobei,  $Q$  = Strahlungsbilanz aus solarer und terrestrischer Ein- bzw. Ausstrahlung,  $I$  = direkte Sonnenstrahlung (Transmission durch Atmosphäre),  $H$  = diffuses Himmelslicht (kurzwellige Streustrahlung),  $R$  = an der Erdoberfläche reflektierter Anteil der Solarstrahlung (kurzwellig),  $E$  = langwellige Ausstrahlung der Erde (Eigenemission),  $A$  = langwellige Gegenstrahlung der Atmosphäre (Glaser et al. 2007).

## 2.5. Der Einfluss der Schuttbedeckung

Schuttbedeckung auf Gletschern spielt eine grosse Rolle in deren Energiebilanz und Schmelzraten. Der Schutt kann, je nach Dicke, zwei entgegengesetzte Reaktionen auslösen. Mit zunehmender Schuttbedeckung wird die Albedo von Schnee und Eis tiefer, das heisst es wird mehr kurzwellige Strahlung absorbiert, welche mehr Schmelzenergie liefert. Je nach Höhe der Bedeckung ändert sich der Effekt auf die Energiebilanz, wie später in diesem Kapitel genauer erläutert wird. Das Mittelmoränenmaterial kann also, wenn es dick genug ist, das unterlagernde Eis vor Sonnenbestrahlung schützen und verhindert damit das Abschmelzen (Matzka und Fiebig 2006). Benn und Evans (2014) beschreiben einen Anstieg der Schmelzrate mit der Schuttbedeckung bis ungefähr 2cm. Kayastha et. al. (2000) setzt die Grenzwerte ein wenig höher an, wobei bei der Forschung am Khumbu Gletscher in Nepal ein Maximum der Schmelzrate bei 3cm stattfindet. Nach diesem Maximum sinkt die Schmelzrate wieder. Die Ablation nimmt, nach dem Höhepunkt von einigen Zentimeter, exponentiell ab. Somit sollte zum Beispiel nach 2-3m Schuttbedeckung die Ablation nur noch minimal sein (Bozhinskiy et. al. 1986 zit: in Clark, 1994).

Spielt man dieses Szenario weiter, und geht von einem grossen Nachschub von Schutt und einem ineffizienten Transport aus, kann so ein Blockgletscher entstehen (Shroder et al. 2000).

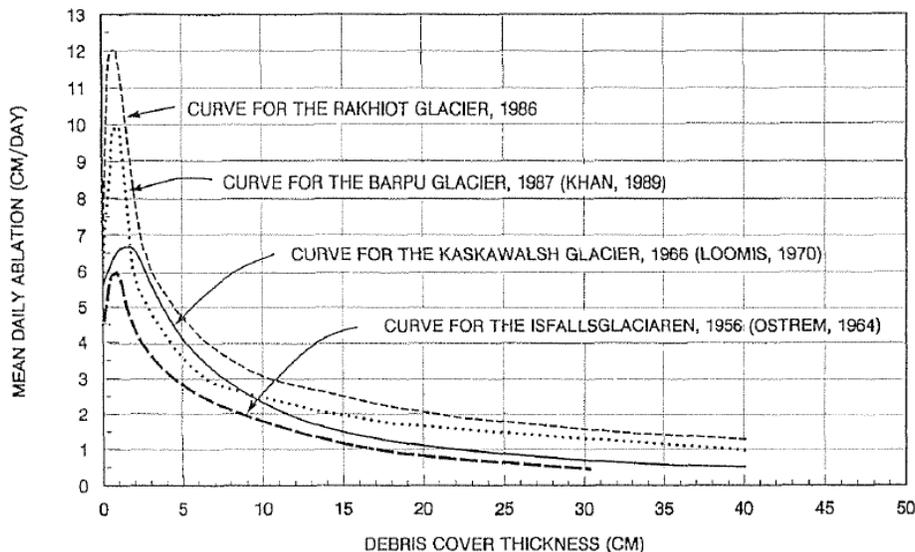


Abbildung 2.1 Beziehung zwischen Schuttbedeckung und Ablation, nach verschiedenen Studien von 1964 bis 1989 (Nicholson und Benn, 2006 zit: in Benn und Evans, 2010).

Bis zu einer Dicke von 2cm überwiegt die Wirkung der Absorption der kurzwelligeren Strahlung, was zur schnelleren Ablation führt. Abbildung 2.1 vergleicht Studien an verschiedenen Gletschern zwischen 1964 und 1989. Die Grafik stellt die tägliche Ablation auf dem Gletscher mit der Dicke der Schuttbedeckung gegenüber. Es ist gut zu erkennen, dass aufgrund der zuerst überwiegender Ablation und des danach vorherrschenden Isolationseffektes eine hyperbolische Kurve entsteht. Abweichungen in Ablation bei gleicher Schuttbedeckung an verschiedenen Gletschern bestehen aufgrund lokaler meteorologischer Unterschiede und globaler Lokalitäten, welche den Ablationsprozess mitbestimmen (Mattson, 1993).

Quantitativ lässt sich dieser Vorgang nach der Formel von Nakawo und Young begründen (1981, 1982, zit: in Benn und Evans, 2010). Die Formel beschreibt den konduktiven Wärmefluss von der Oberfläche des Schuttes zum untersten Punkt.

$$Q_c = k (T_s - T_i) / hd,$$

wobei  $k$  die Wärmeleitfähigkeit des Schuttes beschreibt.  $T_s$  und  $T_i$  sind die Temperaturen an der Oberfläche und der Unterseite des Schuttes und  $hd$  ist die Höhe des Schuttes. Die Formel ist nach Benn und Evans (2010) sehr gut als Modell zu verwenden, funktioniert jedoch in der Praxis nicht immer. Fluktuationen der Temperatur erschweren den Einsatz und die Speicherfähigkeit des Schuttes und verzögern den Effekt von Erwärmung oder Abkühlung. Im Tagesverlauf zeigt sich das folgendermassen: Die Lufttemperatur am Tag ist hoch und erwärmt so den Schutt. Es entsteht ein Wärmefluss in die Tiefe. In der Nacht, wenn die Luft abgekühlt ist, fließt die gespeicherte Wärme aus dem Schutt an die Oberfläche.

Die Gleichung von Nakawo und Young ergibt, gerechnet mit der Tagesmitteltemperatur, einen linearen Gradienten, womit die Schmelzrate kalkuliert werden kann (Nicholson und Benn, 2006).

Der mit dieser Formel erklärte Effekt bewirkt, dass die Ablation nicht direkt mit der Lufttemperatur und der Strahlung einhergeht, sondern sich verzögert und abhängig von der Dicke des Schuttes verstärkt oder geschwächt wird (Schwendener 2013).



### 3. Untersuchungsgebiet

Für die Feldarbeit wurden auf zwei Gletschern Gletschertische ausgewählt. In einer Pilotstudie Ende der Schmelzsaison wurden die Untersuchungsstandorte eingerichtet und im folgenden Jahr über eine ganze Schmelzsaison beobachtet. Die wichtigsten Kriterien zur Auswahl von möglichen Gletschern waren ihre Zugänglichkeit und das Vorhandensein von Blöcken die Gletschertische bilden. Es musste möglich sein, zu Fuss mit viel Gepäck, welche die Feldarbeit erst möglich machte, den Gletscher zu erreichen. Aus diesen Gründen wurden die Untersuchungen auf dem Oberaargletscher am Grimselpass und auf dem Persgletscher am Berninapass durchgeführt.

Für die Luftbildanalyse wurden zusätzlich noch zwei weitere Gletscher ausgewählt. Die Untersuchungen wurden am Gornergletscher südlich von Zermatt und am Unteraargletscher unmittelbar nördlich des Oberaargletschers durchgeführt.

#### 3.1. Oberaargletscher

Der Oberaargletscher liegt am Grimselpass, welcher das Berner Oberland mit dem Oberwallis verbindet. Der Gletscher reicht von einer Höhe von 3400m ü.M. bis hinunter auf 2300m ü.M. und fließt von Westen nach Osten. Die jährliche Durchschnittstemperatur am Feldstandort in 2420m ü.M. beträgt  $0,74^{\circ}\text{C}$  ([www.meteoschweiz.admin.ch](http://www.meteoschweiz.admin.ch), 26.08.2016).

Das Schweizerische Gletschermessnetz trägt jährlich seit 1920 die Längenänderung des Oberaargletschers (Abbildung 3.2) zusammen. Laut diesen Messungen hat sich der Oberaargletscher seit 1850 um mehr als 1800 m zurückgezogen. In den 50er Jahren war das Rückschmelzen besonders stark. Ab den 70ern konnten über knapp 20 Jahren hinweg immer wieder kurze Gletschervorstösse von maximal 10m a<sup>-1</sup> verzeichnet werden. Diese Vorstösse konnten aber dem Rückzugstrend nichts entgegenhalten (Gletscherberichte 2014).

Der Oberaargletscher wurde von Bauder und Rüegg (2009) ausgewertet, wobei sie Fliessgeschwindigkeiten von 2,1 – 19,8m/Jahr erhielten, während die tieferen Werte ganz unten an der Gletscherzunge entnommen wurden und der höhere Wert in der Nähe der Gleichgewichtslinie.

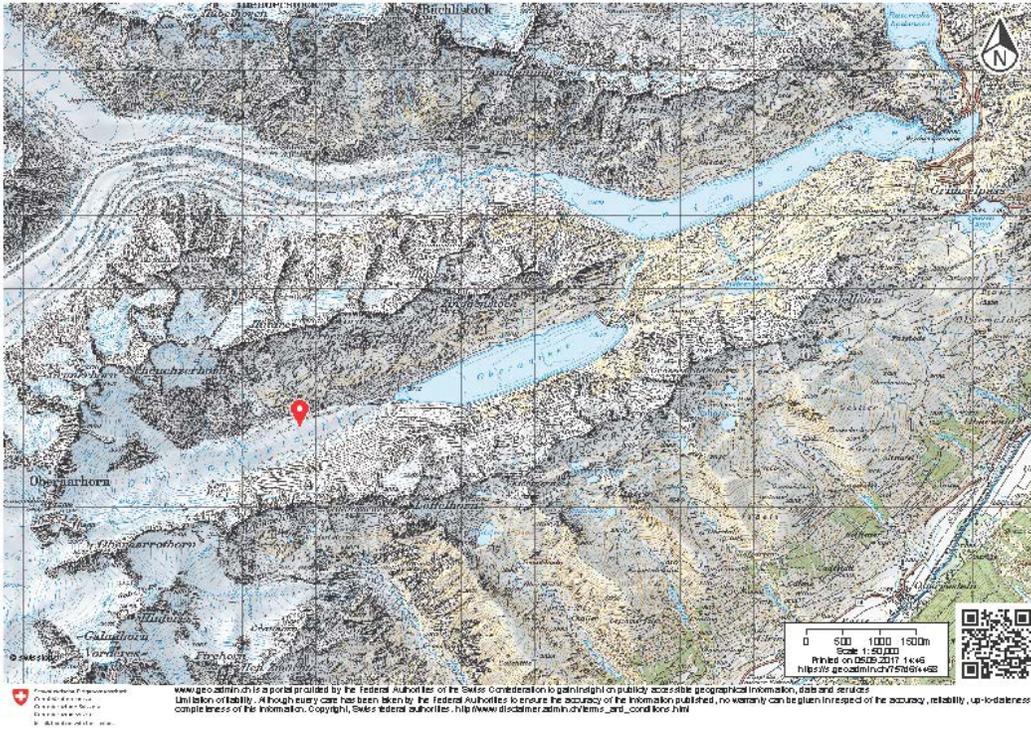


Abbildung 3.1 Kartenausschnitt des Oberaargletschers. Die rote Markierung bezieht sich auf die Lage der Pilotstudie 2016 und der Feldstudie 2017 (Swisstopo).

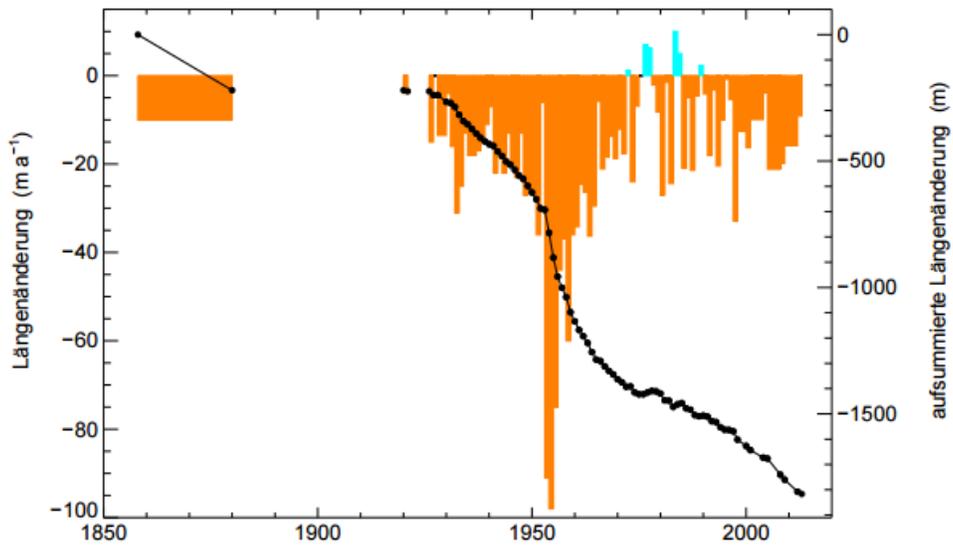


Abbildung 3.2 Längenveränderung des Oberaargletschers zwischen 1858 und 2013. Die Vorstösse des Gletschers sind mit hellblauer Farbe gekennzeichnet, Rückzüge mit oranger Farbe (dargestellt in  $\text{m a}^{-1}$ ). Die schwarze Summenkurve zeigt die kumulative Längenänderung (in m) seit Beginn der vorhandenen Messungen (Gletscherberichte 2014).

### 3.2. Persgletscher

In den Ostalpen der Schweiz, im Kanton Graubünden, liegt der Persgletscher (roman.: Vadret Pers). Ausgangspunkt zum Gletscher ist die Diavolezza Bergbahn, welche mit der Bernina Passstrasse einfach zu erreichen ist. Der Berninapass verbindet das Oberengadin mit dem Puschlav. Der Persgletscher fliesst von Ost nach West in Richtung Morteratschgletscher, mit welchem er jedoch nicht mehr verbunden ist ([www.swisseduc.ch](http://www.swisseduc.ch), 17.01.2017). Der Persgletscher erreicht seinen höchsten Punkt am Piz Palü mit 3900m ü.M. und den tiefsten Punkt, kurz vor dem Morteratschgletscher, zwischen 2400 – 2500m ü.M. Der Persgletscher erfasst eine Länge von 4.5km ([www.map.geo.admin.ch](http://www.map.geo.admin.ch), 29.08.2017). Die jährliche Durchschnittstemperatur in dieser Region (auf 2700m ü.M.) beträgt  $-2,5^{\circ}\text{C}$  ([www.meteoschweiz.admin.ch](http://www.meteoschweiz.admin.ch), 26.08.2016).

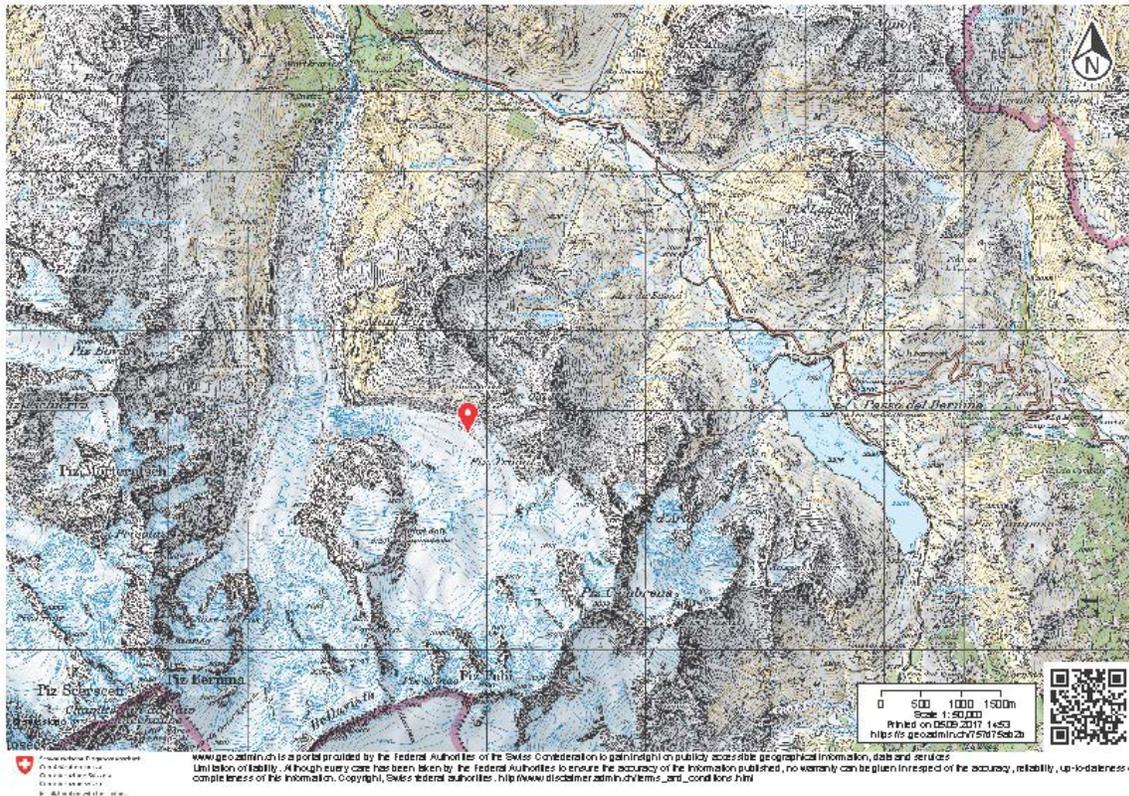


Abbildung 3.3 Kartenausschnitt des Persgletscher. Die rote Markierung bezieht sich auf die Lage der Feldarbeit in der Pilotstudie 2016 (Swisstopo).

Leider werden im Gletscherbericht der ETH keine Längenänderungen des Persgletschers vorgenommen, da er bis vor kurzem noch mit dem Morteratschgletscher verbunden war. Die Trennung von Morteratschgletscher durch starken Massenverlust und Rückzug wurde von Zekollari et al. (2014) auf 2020 prognostiziert. Die Trennung erfolgte wider Erwarten schon fünf Jahre früher, in 2015.

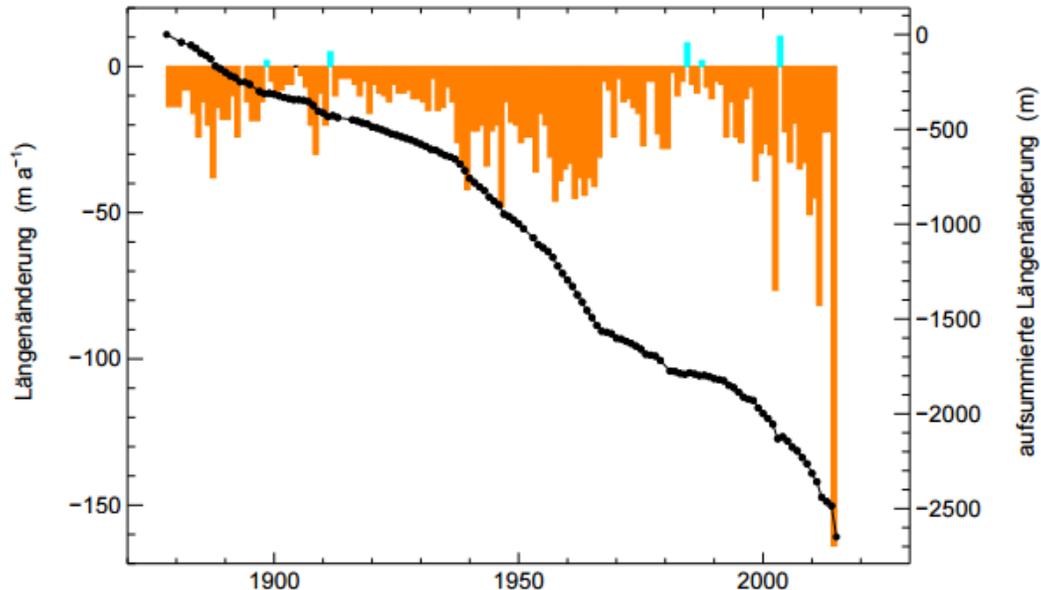


Abbildung 3.4 Längenveränderung des Morteratschgletscher zwischen 1878 und 2015. Die Vorstösse des Gletschers sind mit hellblauer Farbe gekennzeichnet, Rückzüge mit oranger Farbe (dargestellt in  $\text{m a}^{-1}$ ). Die schwarze Summenkurve zeigt die kumulative Längenänderung (in m) seit Beginn der vorhandenen Messungen (Gletscherberichte 2014).

Gemäss Zekollari et al. (2012) wird die Fliessgeschwindigkeit des Morteratschgletschers auf  $15\text{m a}^{-1}$  berechnet. Eigene Vermessungen der Luftbilder zeigen eine Fliessgeschwindigkeit von knapp  $50 - 85\text{m a}^{-1}$ . Der Morteratschgletscher hat sich seit 1878 kontinuierlich zurückgezogen. Seit 1984 gab es drei Vorstösse von 2m, 8m und 10,3m, welche die kumulative Längenveränderung von -2649m seit 1878 aber kaum beeinflussen. Aufgrund mangelnder Daten wird aufgrund der räumlichen Nähe angenommen, dass sich der Persgletscher in den letzten Jahren ähnlich verhalten hat.

### 3.3. Unteraargletscher

Der Unteraargletscher liegt im nördlichen Nebental des Oberaargletschers in derselben Ausrichtung; Er fliesst von Westen nach Osten. Dieser Gletscher entsteht aus der Konfluenz von Lauteraargletschers und dem Finsteraargletschers. Umrandet von den 4000er Bergen Lauteraarhorn, Finsteraarhorn und Schreckhorn beginnt die Abrisskante zwischen 3400m ü.M. und 3700m ü.M. Die Konfluenzzone liegt auf 2400m ü.M. Der Gletscher reicht heute noch knapp bis 1900m ü.M. und ist ferner gut 5km lang. Der Unteraargletscher mündete früher noch in den Grimselsee, (www.map.admin.geo.ch, 27.07.2017), heute ist die Gletscherfront 1,5km von dem Gletschersee entfernt (Steiner et al. 2008). Der Gletscher bedeckt 24,1km<sup>2</sup> und ist auffallend stark von Schutt überzogen (Steiner et al. 2008). Die jährliche Durchschnittstemperatur beträgt 1,9°C (www.meteoschweiz.admin.ch, 28.08.2017). Wie der Oberaargletscher gehört auch der Unteraargletscher zu den Gletschern, welche direkt einen Speichersee der KWO (Kraftwerke Oberhasli AG) speisen (www.grimselwelt.ch, 27.07.2017).

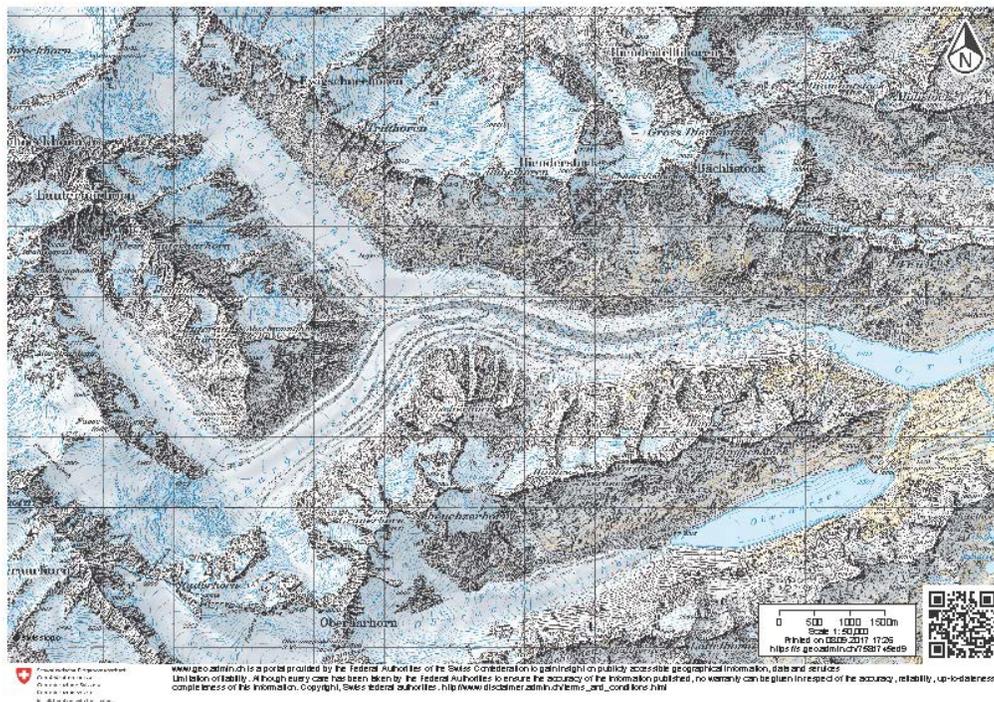


Abbildung 3.5 Kartenausschnitt des Unteraargletschers (Swisstopo).

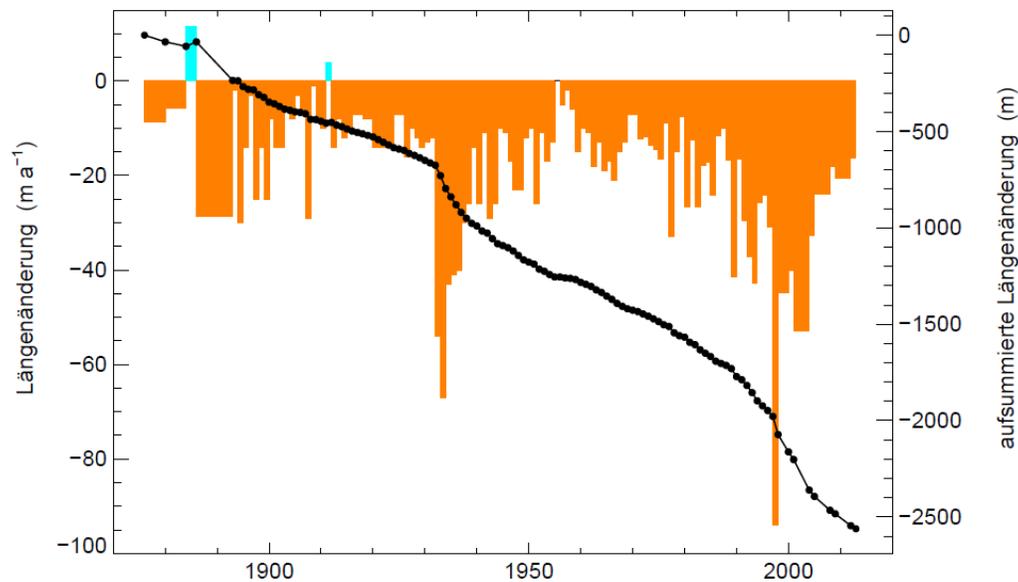


Abbildung 3.6 Längenveränderung des Unteraargletschers zwischen 1858 und 2013. Die Vorstösse des Gletschers sind mit hellblauer Farbe gekennzeichnet, Rückzüge mit oranger Farbe (dargestellt in  $\text{m a}^{-1}$ ). Die schwarze Summenkurve zeigt die kumulative Längenänderung (in m) (Gletscherberichte 2014).

Der temperierte Gletscher bewegt sich auffallend stark saisonal. Messungen in den 70er Jahren zeigen eine zurückgelegte Distanz im Winter von  $53\text{mm/Tag}$ , während die Daten in der Sommersaison von April bis November einen Wert von  $87,4\text{mm/Tag}$  ergaben (Iken et al. 1983). Seit 1880 ist der Gletscherstand kontinuierlich rückläufig (Steiner et al. 2008; Gletscherberichte 2014).

### 3.4. Gornergletscher

Zwischen Strahlhorn, Dufourspitze, Monte Rosa und dem Matterhorn breitet sich oberhalb von Zermatt ein Gletschersystem aus. Über eine Länge von  $16\text{km}$  und einer Breite von gut  $6\text{km}$  ist das System vor allem bestimmt durch den Grenzgletscher und den Gornergletscher. Weitere kleinere Gletscher wie der Breithorngletscher, Schwarze Gletscher und der Zwillingsgletscher speisen das System von Südosten her. Die Hauptfliessrichtung des Gornergletschers ist von Osten nach Westen. Der Gornergletscher beginnt auf einer Höhe von circa  $3500\text{m ü.M.}$  an dem Weissgrat, welcher gleichzeitig auch die schweizerisch-italienische Landesgrenze darstellt. Die Gletscherstirn befindet sich auf knapp  $2100\text{m ü.M.}$ . Messungen von 1973 geben eine Länge von  $13,5\text{km}$  und eine Fläche von  $59,73\text{m}^2$  an ([www.glaciology.ethz.ch](http://www.glaciology.ethz.ch), 28.08.2017), während

neuere Messungen von 2007 eine deutlich kleinere Länge von 12,9km und 54km<sup>2</sup> ergaben (Holzhauser 2008).

Durch die polythermale Natur des Gletschers entstehen im Zehrgebiet des Gornergletscher besonders spezielle Formen. Am Eis, bei welchem die Temperatur unter dem Druckschmelzpunkt liegt, kommen besonders viele Schmelzseen vor. Dies an der Stelle, wo der kalte Grenzgletscher mit dem Gornersystem zusammenfliesst. Da das Wasser nicht durch das kalte Eis abfließen kann, bildet sich infolge dessen ein grosses System von oberflächlichen Schmelzwasserabflüssen (VAW 2010).

Immer wieder kommt es am Zusammenfluss von Grenz- und Gornergletscher zur periodischen Bildung und Entleerung des Gornersees, was zu Hochwassern an der Vispa und zu folgenden Überschwemmungen im Mattertal führen kann. Die Entleerung hat weiter zur Folge, dass der Gletscher eine erhöhte Fliessgeschwindigkeit aufweist und das Gletschereis kurzfristig bis zu einem halben Meter gehoben wird (Gischig 2005).

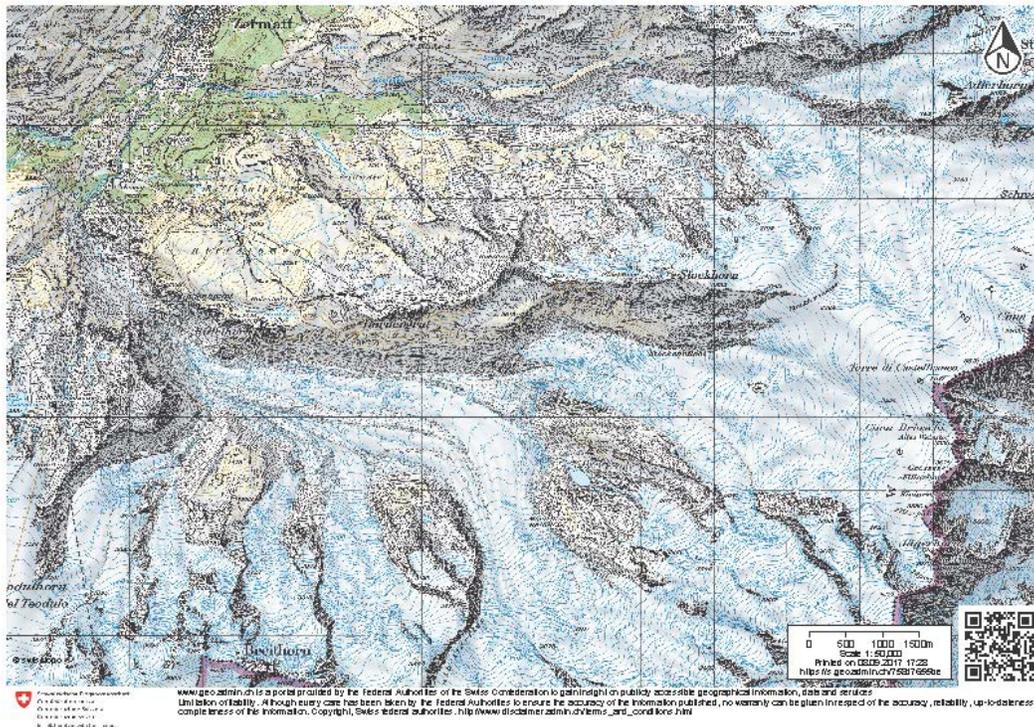


Abbildung 3.7 Kartenausschnitt des Gornergletschers (Swisstopo).

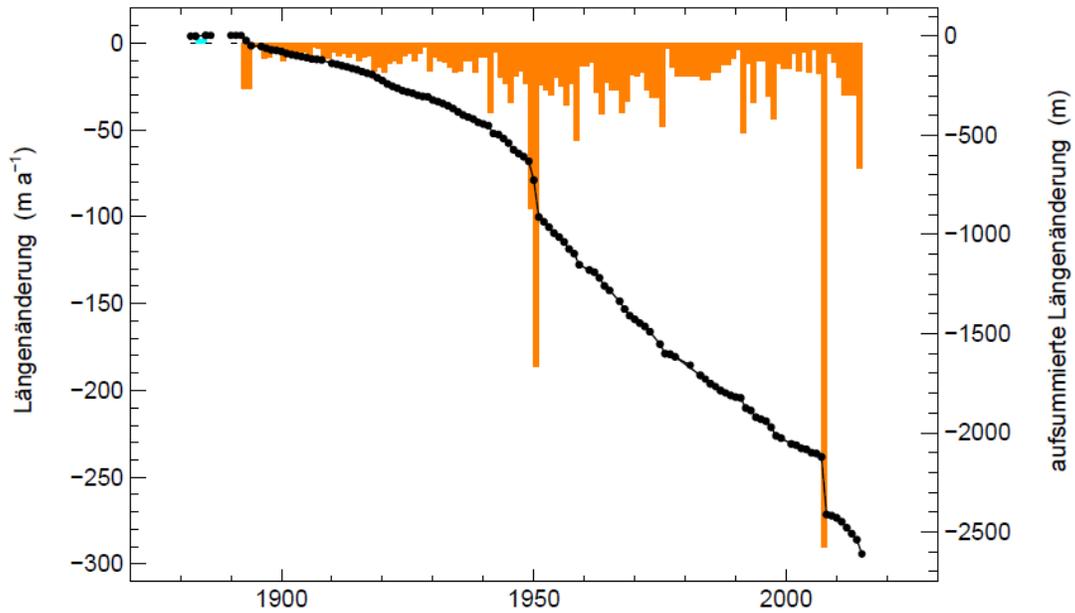


Abbildung 3.8 Längenveränderung des Gornergletschers zwischen 1858 und 2013. Die Vorstösse des Gletschers sind mit hellblauer Farbe gekennzeichnet, Rückzüge mit oranger Farbe (dargestellt in  $\text{m a}^{-1}$ ). Die schwarze Summenkurve zeigt die kumulative Längenänderung (Gletscherberichte 2014).

## 4. Daten

### 4.1. Luftbilder

Zur langzeitlichen und grossräumigen Analyse der Bewegung der Gletscherblöcke wurden im Rahmen dieser Arbeit Serien von Luftbildern verschiedener Gletscher in der Schweiz verwendet. Die Luftbilder, die in dieser Arbeit verwendet wurden, stammen von der Swisstopo und von dem Schweizerischen Gletschermessnetz (GLAMOS). Die Zusammenarbeit der GLAMOS dient der langfristigen Erforschung der Gletscherveränderungen in den Schweizer Alpen. Sie besteht aus der Expertenkommission für Kryosphärenmessnetze der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (EKK/SCNAT), der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW/ETHZ) und den Universitäten Fribourg und Zürich. Die finanzielle Unterstützung wird durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU), GCOS Schweiz und der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz gesichert ([www.glaciology.ethz.ch](http://www.glaciology.ethz.ch), 08.04.2017). Die Luftbilder der GLAMOS zeigen im Minimum eine Auflösung von 25cm. Es werden pro Gletscher eine bis fünf Fluglinien geflogen und Aufnahmen in den Kanälen Rot/Grün/Blau (RGB), Panchromatisch (PAN) und im Nahinfrarot-Kanal (NIR) gemacht. Für die untersuchten Gletscher wurden von der Swisstopo jeweils vier Luftbilder mit unterschiedlichem Aufnahmedatum verwendet (Tabelle 4.1).

*Tabelle 4.1 Liste der verwendeten Luftbilder und ihr Aufnahme Datum (Swisstopo).*

<b>Gletscher</b>	<b>Aufnahmedatum</b>
<b>Oberaargletscher</b>	27.08.2012
	21.08.2013
	27.09.2014
	26.08.2015
<b>Unteraargletscher</b>	27.08.2012
	21.08.2013
	27.09.2014
	05.08.2015
<b>Gornergletscher</b>	14.09.2012
	20.08.2013
	27.08.2014
	05.08.2015

In Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Landestopografie Swisstopo entstehen einmal jährlich die Luftbildaufnahmen der Gletscher. Die Planung und die Durchführung der definierten Gletscher sowie die Orientierung der Luftbildaufnahmen übernimmt dabei die Swisstopo, Auch die weitere Verarbeitung der Luftbilder zu den digitalen Höhenmodellen und den Orthophotos übernimmt die Swisstopo (Raetzo et al. 2016).

Die Luftbilder der Swisstopo sind Landschaftsaufnahmen, welche mit analogen Kameras aus Flugzeugen aufgenommen werden. Diese werden gescannt und in digitaler Form abgegeben. Sind die Luftbilder von ihren Verzerrungen befreit und weisen über die ganze Bildfläche einen einheitlichen Massstab auf, spricht man von Orthofotos. Die Bilder der Swisstopo werden seit 2005 mehrheitlich mit der Digitalkamera Leica ADS (airborne digital sensor) aufgenommen. Davor wurde eine analoge Kamera verwendet. Diese Erneuerung ermöglicht es, Produktionsprozesse und die Endqualität des Produkts zu verbessern (www.swisstopo.admin.ch, 08.04.2017).

## 4.2. swissALTI3D

Zu den vorher erwähnten Luftbilder wird zur genaueren Analyse ein digitales Terrainmodell (DTM) hinzugezogen. Das hier verwendete swissALTI3D ist ein hochaufgelöstes DTM, welches die Geländeform in einer räumlichen Auflösung von 2m in der Schweiz darstellt. Diese Abbildung zeigt das Gelände ohne Vegetation oder menschliche Überbauungen. Die Daten werden im Rasterformat zur Verfügung gestellt oder als xyz-Datei, wobei in einem regelmässigen Gitter jede Zelle einen Höhenwert erhält. Dieses Gitter basiert auf dem Schweizerischen Koordinatensystem CH1903+.

Die Nachführung der Daten geschieht in einem Zyklus von sechs Jahren. Die in dieser Arbeit verwendeten Kartensätzen wurden alle in den letzten drei Jahren nachgeführt. Die letzte Nachführung des Kartenblattes 1250 (Ober-, und Unteraargletscher) fand im Jahr 2014 statt. Der Kartensatz 1277 (Persgletscher) im Jahr 2016 und das Blatt 1348 (Gornergletscher) im Jahr 2017. Die Nachführungen werden meist mit fotogrammetrischen Methoden durchgeführt. Zusätzlich können alte Daten mit aktuelleren Laserdaten ersetzt werden.

Die Höhe des DTM wird je nach Höhenlage unterschiedlich ermittelt. Unterhalb von 2000m ü.M. wird die Höhe per Lasermesspunkte ermittelt. Bei Gebieten oberhalb von 2000m ü.M. gibt es

keine Daten durch Lasermesspunkte, die Höhe muss anhand von Stereokorellation automatisch berechnet oder manuell durch stereoskopische 3D-Messungen generiert werden.

Die Genauigkeit der Ergebnisse ist aufgrund unterschiedlicher Methoden nicht einheitlich. Die Auflösung von swissALTI3D liegt unterhalb von 2000m ü.M  $\pm 50\text{cm}$   $1\sigma$  und oberhalb 2000 m ü.M.  $\pm 1\text{m} - 3\text{m}$   $1\sigma$ . Die manuelle Nachführung (Messpunkte, Bruchkanten, Flächen) weist eine mittlere Abweichung von 25cm bis 1m auf (Bundesamt für Landestopografie Swisstopo, 14.08.2017).

### 4.3. Meteorologische Daten

Meteorologische Daten werden in der Schweiz systematisch gesammelt und ausgewertet. Das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz hat ein automatisches Messnetz mit 160 Messstationen in der Schweiz aufgebaut. SwissMetNet, wie diese Stationen als System genannt werden, liefern alle zehn Minuten aktuelle Daten zu Wetter und Klima an den gewählten Standorten. Die erhobenen Daten werden an die zentrale Datenbank der MeteoSchweiz vermittelt, wo sie auf Fehler geprüft werden. Eine Standardstation misst kontinuierlich Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Sonneneinstrahlung, Niederschlagsmenge, Windrichtung und –geschwindigkeit. Zusätzlich sind weitere automatische Niederschlagsstationen installiert. Diese Stationen bilden die Grundlage der Wetterprognosen, um Unwetter- sowie Hochwasserwarnungen zu erstellen. Das Netzwerk wurde in den letzten Jahren erneuert und vergrößert. Die verschiedenen Geräte und der operationelle Betrieb des SwissMetNet stellt aufgrund der komplexen Topografie und der rauen Witterung in den Alpen eine Herausforderung dar (Meteo Schweiz 2016).

Die verwendeten Daten in dieser Arbeit stammen von den Messstationen Grimsel Hospiz (GRH) auf 1980m ü.M. und Berninapass (BEH) auf 2260m ü.M. Die Station BEH ist an exponierter Lage aufgestellt, wodurch die Werte der Niederschlagsmessung bei Wind und Schneeeverwehung verzerrt werden können. Beide Stationen messen Lufttemperatur, Sonnenscheindauer, Globalstrahlung, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Luftdruck und relative Luftfeuchtigkeit ([www.meteoschweiz.admin.ch](http://www.meteoschweiz.admin.ch), 15.08.2017).





## 5. Methoden

Im folgenden Kapitel werden die Methoden etwas näher vorgestellt. Es wird mit der Beschreibung der Planung und Durchführung der Feldeinsätze begonnen. Darauf folgt die Dokumentation der Weiterverarbeitung der Felddaten. Anschliessend wird auf die Technik der Luftbildanalyse eingegangen. Zum Schluss wird das Schmelzmodell erklärt, welches für die Bestimmung der Schmelzrate der Untersuchungsgletscher verwendet wurde.

### 5.1. Konzept der Feldarbeit

Die Feldarbeit leistete einen essentiellen Beitrag zu dieser Forschungsarbeit. Beobachtungen und Messungen direkt vom Gletscher erlauben es uns, Theorien zu formulieren, prüfen und zu verbessern. Daten die im Feld gewonnen werden, können sowohl gemessen (quantitativ) als auch beschrieben (qualitativ) sein. Es ist von fundamentaler Bedeutung, sich einen genauen, immer wiederholenden Ablauf im Feld anzueignen. Der Sinn der Feldarbeit ist es, die Forschung mit Daten zu versorgen, welche dazu dienen, konzeptuelle, numerische oder physikalische Modelle auszuwerten oder zu generieren (Hubbard und Glasser 2005).

Der Zeitaufwand für die Feldarbeit war beträchtlich. Diese fand über ein bis zwei Arbeitstage auf dem jeweiligen Gletscher statt. Zusätzlich entstanden weitere Stunden Arbeit für die Vor- und Nachbearbeitung. Tage vor der Feldarbeit wurde das verwendete Material gerichtet und Details wie Wetterbedingungen vor Ort und Anpassungen an Aussergewöhnliches am Gletschertisch (Stangenabbruch, Verlust von Material) geklärt.

In der Pilotstudie, der Feldsaison 2016, wurden die Blöcke jeweils in einem Intervall von drei Wochen besucht. In der Saison 2017 wurden die Blöcke am Persgletscher mangels Luftbildaufnahmen nicht mehr weiter beobachtet, um den Fokus ganz auf die Forschung am Oberaargletscher zu setzen. Es fanden vier Messungen an drei Blöcken in einem Intervall von ca. zwei Wochen statt, jeweils abhängig von der Wetterlage.

Zusätzlich zu den einzeln vermessenen Gletschertischen wurde ein Feld mit mehreren Blöcken an einem Feldtag untersucht. Ziel war es herauszufinden, ab welcher Blockgrösse Gletschertische gebildet werden, wie hoch deren Sockel sind und welchen Einfluss die Blockform darauf hat. In Kapitel 6.1.3. wird genauer darauf eingegangen.

### 5.1.1. Modellversuch

Um die Sinnhaftigkeit des Messkonzeptes zu überprüfen, wurde im Vorfeld das Abrutschen des Gletschertisches modelliert. Damit konnte herausgefunden werden, welche Punkte bei der Feldarbeit unbedingt beachtet werden mussten.

Versuche im Modell können Aufschlüsse über das Verhalten des Blockes und über die beste Methode der Analyse geben. Im Modell werden gewisse natürliche Faktoren wie Unebenheiten am Boden oder schräge Ablationsstangen ausseracht gelassen, um das Konzept der Vermessung zu prüfen. Das Modell wurde der Situation im Feld an zwei unterschiedlichen Zeitpunkten nachempfunden: Es wurde ein Gletschertisch auf einem Sockel und einer Ablationsstange im fiktiven Süden nachgestellt. In Abbildung 5.1 steht der Block auf dem Sockel und bildet einen Gletschertisch. In Abbildung 5.2 ist der Sockel Richtung Süden abgeschmolzen und der Gletschertisch in dieselbe Richtung abgerutscht.

Ziel der Modellversuche war es im Vorfeld abzuklären,

- wie viele Fotos für ein gutes 3D Modell genügen.
- wie gross die Überlappung der Fotos sein muss.
- welche Distanzen im Feld gemessen werden müssen.
- wie gross der Zeitaufwand für die Nachbearbeitung eines Blockes ist.
- wie genau die Distanzen nachgemessen werden können.

Der Modellversuch zeigte eine Differenz der gemessenen zu den berechneten Distanzen von 0,004m. Diese Differenz war aufgrund der erwarteten Bewegungen im Feld im Meterbereich zu vernachlässigen. Genaue Ergebnisse konnten jedoch nur bei einer ausreichenden Anzahl an Fotografien und der richtigen Aufnahmetechnik erzielt werden (Kapitel 5.1.2. und 5.1.3.).

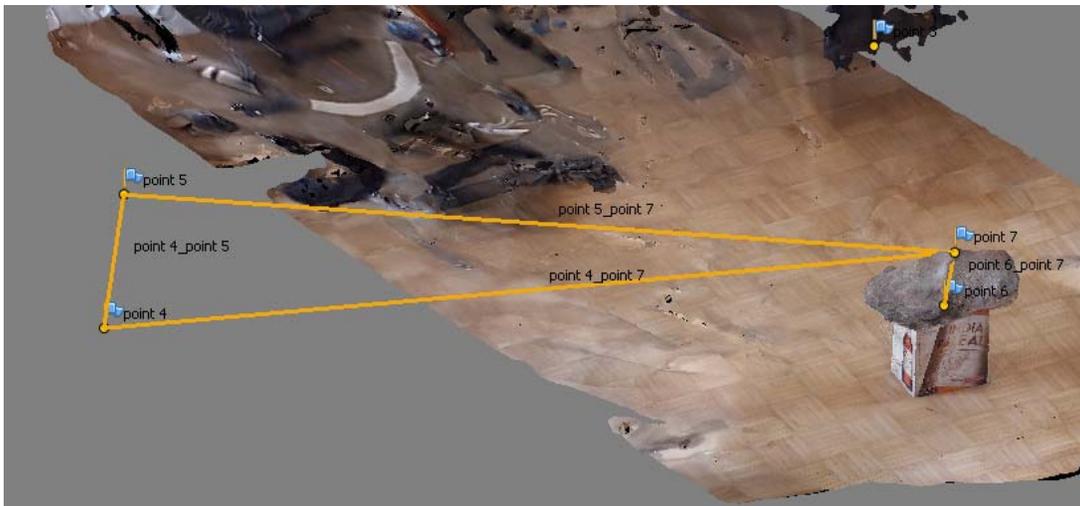


Abbildung 5.1 Ausschnitt des Modellversuches in Agisoft. Der Block steht auf dem Sockel. Point 4 ist der unterste Punkt der Ablationsstange, Point 5 ist das obere Ende der Ablationsstange. Die gelben Linien zeigen die gemessenen Distanzen.

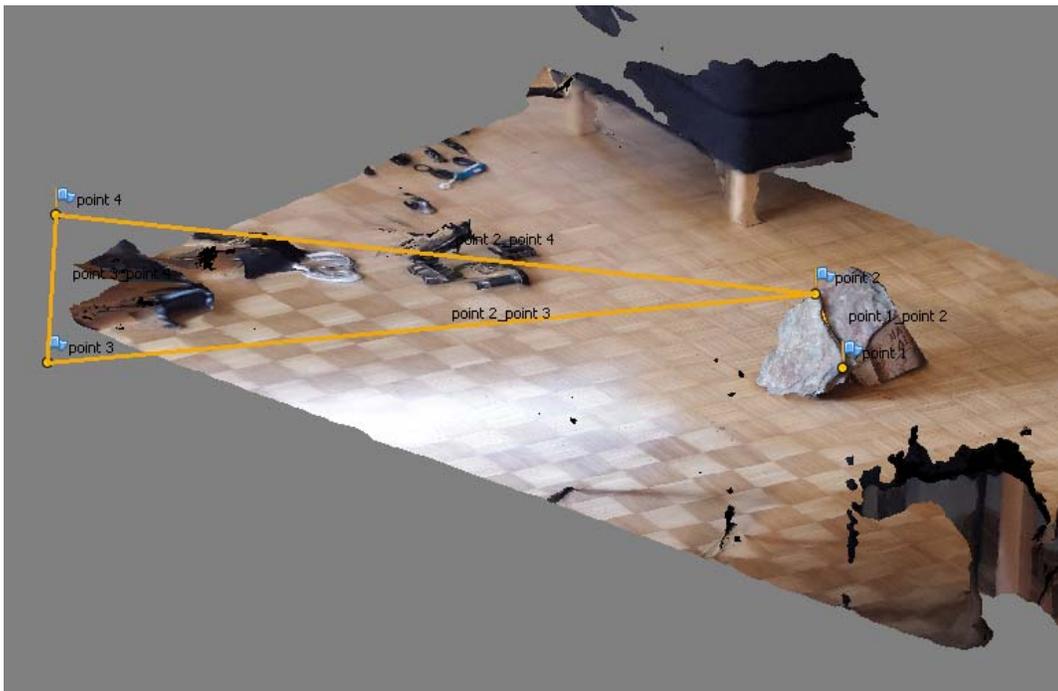


Abbildung 5.2 Ausschnitt des Modellversuches in Agisoft. Der Block ist vom Sockel abgerutscht. Point 4 ist der unterste Punkt der Ablationsstange, Point 5 ist das obere Ende der Ablationsstange. Die gelben Linien zeigen die gemessenen Distanzen.

### 5.1.2. Vermessung

Die Vermessung fand auf zwei Ebenen statt. Es wurden die Bewegung des Blockes im Koordinatensystem der Ablationsstangen und zusätzlich die Schmelze des Gletschereises am jeweiligen Standort gemessen. Die Messung der Schmelzrate fand im Feld statt, wurde aber für eine logische Struktur dieser Arbeit unter Kapitel 5.3. beschrieben.

Zuerst wurden im Feld die passenden Gletschertische gesucht. Im Vorhinein war es anhand der Luftbilder von 2015 möglich, einzelne Blöcke zu erkennen und ihre Bewegung der letzten vier Jahre zu analysieren. Dies erlaubte eine gezielte Auswahl der beobachteten Blöcke. Unter der Annahme, dass verschiedene Gletschertischgrößen und -formen sich unterschiedlich verhalten, wurden Blöcke mit einer physischen Diversität ausgewählt. Da die Gletschertische sich im Zehrgebiet der Gletscher befanden, war die Gefahr von Gletscherspalten zu vernachlässigen. Die Feldarbeit konnte ohne grössere Sicherheitsvorkehrungen durchgeführt werden.

#### **Einsetzen der Ablationsstangen**

Die Ablationsstangen wurden in den Boden eingebohrt und an ihren Enden mit Widerhaken aus Draht befestigt, damit sie im Schmelzwasser des Bohrlochs nicht auftrieben. Ablationsstangen sind häufig aus Holz oder Kunststoff und hatten in dieser Arbeit eine Länge von 2m. Um eine grössere Tiefe erreichen zu können, wurden jeweils zwei Ablationsstangen miteinander verbunden. Diese wurden mit Drahtstücken aneinander fixiert, damit nach zwei Meter Schmelze die obere Stange abknickt und die zweite weniger Gewicht hat, welches sie in eine Richtung ablenkt (Abbildung 5.3). Da der Gletscher kontinuierlich fliesst, wurde der Feldstandort gut sichtbar markiert und/oder mit GPS eingelesen werden, damit die Ablationsstangen später wiedergefunden wurden (Hubbard und Glasser 2005).



Abbildung 5.3 Verbindung zweier Ablationsstangen (Foto: Michael Zemp)

Die Löcher für die Ablationsstangen wurden in der Pilotstudie mit dem Kovacs Eisbohrer gemacht. Zwei Elemente à 1m dienten dabei als Arbeitswerkzeug. Für die Schmelzsaison 2017 wurde mit dem Heucke Dampfbohrer gearbeitet, welcher mit weniger Kraftaufwand zu betätigen und besser geeignet für tiefere Bohrungen ist. Im Unterschied zur Pilotstudie, bei welcher die Ablationsstangen nur 2m eingebohrt wurden, kamen in der folgenden Saison zwei miteinander verbundene Stangen zur Anwendung. Diese wurden vier Meter in das Eis eingebohrt. Somit musste nicht bei jedem Besuch nachgebohrt werden.

Der Heucke Dampfbohrer kann als Rucksack auf den Gletscher getragen werden. Um die Effizienz des Bohrers zu steigern, lohnt es sich, einen Windschutz zu bauen oder mit Rucksäcken und anderen Feldgegenständen zu improvisieren (Machguth 2003). Die Zusammensetzung des Gases trägt entscheidend zu der Leistung des Bohrers bei (Abbildung 5.4). Der Druck in der Gasflasche ist abhängig von der Aussentemperatur. Sinkt dieser unter den Mindestdruck von 1.1 bar, kann der Heucke Dampfbohrer keine Leistung mehr erzeugen. Die Gasflaschen können während dem Betrieb durch eine Heisswasserzufuhr temperiert werden. Zusätzlich kann Frischwasser oder Schnee an der Oberseite des Dampfbohrers vorgewärmt werden. (Heucke, 2007). Für zwölf Löcher, mit jeweils 4m Tiefe wurde knapp 2kg Gas benutzt, welches speziell für den Einsatz in kälteren Bedingungen entwickelt wurde.

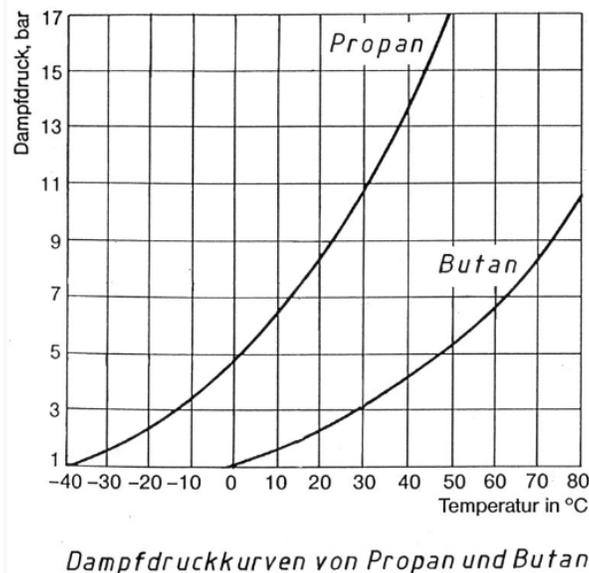


Abbildung 5.4 Die Dampfdruckkurven von Propan und Butan. Propan kann den Druck bei Minustemperaturen länger erhalten als Butan und ist somit als Brennstoff im Heucke Dampfbohrer besser geeignet als Butan ([www.kka-online.info](http://www.kka-online.info)).

## Vermessung anhand der Ablationsstangen

Die Markierung der gewählten Gletschertische erfolgte über vier gesetzte Marken am Block, angebracht in den vier Himmelsrichtungen. Diese bestanden aus Reflektoren und wurden mit einem Leim befestigt. Beim Fotografieren des Blockes wurden die Reflektoren mit einem Kreuz aus Klebeband verbunden, dies erleichterte die nachträgliche optische Analyse. Des Weiteren wurde der Block vermessen, um einen Überblick über die Dimensionen der Blöcke zu erlangen.

Für die Vermessung wurden Ablationsstangen gesetzt. Sie dienten zum einen zur Überwachung der Schmelze, worauf in Kapitel 5.3. weiter eingegangen wird, und zum anderen als Referenzpunkt zur Vermessung der Blockbewegung. Die Ablationsstangen bewegten sich mit dem Gletscher, in dessen Fliessrichtung, mit. Dadurch konnte die Abweichung des Blockes zur Gletscherfliessrichtung anhand der Distanz zwischen den Ablationsstangen und dem Block gemessen werden. Es wurden vier Stangen um den Block herum gebohrt, welche ein Koordinatensystem bildeten, worin sich der Block bewegte. Dabei galt es zu beachten, dass Stangen südlich des Gletschertisches, falls zu nahe am Gletschertisch gesetzt, leicht überfahren wurden und damit keine Daten mehr liefern konnten. In der Annahme, dass sich die Blöcke etwa um 2-3m nach Süden bewegen, wurde besonders bei der Südstange darauf geachtet, dass diese in entsprechender Entfernung eingebohrt wurde. Die Ablationsstangen und, wie zuvor erwähnt, die Markierungen am Block wurden zu Beginn der Messungen den Himmelsrichtungen entsprechend, gleichgesetzt. Im Laufe der Schmelzsaison veränderte sich die Lage der Markierungen auf dem Block relativ zu denen auf den Stangen. Durch das Koordinatensystem konnten die Distanzen von den Markierungen auf dem Block zu den Ablationsstangen messen und die Bewegung und Drehung des Blockes exakt erfassen (Abbildung 5.5). Dabei wurde im Feld immer die Distanz vom oberen und dem unteren Ende der Stange auf der Gletscheroberfläche zur Markierung auf dem Block gemessen. Die Markierungen auf dem Block dienten dazu, die Drehung in horizontaler Richtung zu erhalten. Um die direkte Bewegung des Blockes zu erfassen, kann auch die nächste Distanz des Blockes zu den Stangen gemessen werden. Dabei gilt es zu beachten, dass diese je nach Drehung des Blockes oder der Veränderung des Gletscherstandes eine zusätzliche Längenänderung erfährt.

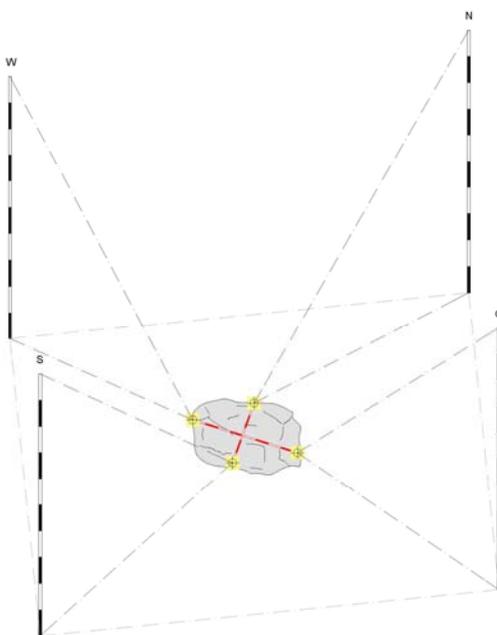


Abbildung 5.5 Situation im Feld, der Block wird anhand der vier Ablationsstangen eingemessen. Die gelben Punkte zeigen die Markierungen am Block, rot/weiss ist das Klebband welches die Nachbearbeitung der Fotos vereinfacht. Die Stangen sind entsprechend der Himmelsrichtung eingebohrt und erstellen das Koordinatensystem indem sich der Block bewegt (eigene Darstellung).

### 5.1.3. Nachbearbeitung zu 3D Modellen

Um die Lage der Gletschertische festzuhalten, wurden diese fotografiert. Dadurch konnte später ihre Bewegung genauer dokumentiert und verstanden werden. Entsprechend den Resultaten aus dem Modellversuch wurden mindestens 30 Fotos vom Gletschertisch aufgenommen, während der Fotograf sich um den Block herumbewegte. Es ist wichtig, dass die Einstellungen der Kamera gleichbleiben. Es darf nicht gezoomt werden. Die Schwierigkeit besteht darin, die Stangen und den Block in den Bildern zu erkennen. Mit farbigen Markierungen können die Ablationsstangen für die Nachbearbeitung sichtbar gemacht werden. Glänzende und unstrukturierte Oberflächen sind zu vermeiden. Es wird eine gute Qualität der Fotos benötigt, unscharfe Bilder können nicht verwendet werden.

Die im Feld gemessenen Distanzen lassen sich in Agisoft Photoscan einlesen, wodurch das Programm jegliche weiteren Distanzen errechnen kann. Diese Funktion ermöglicht es zum Beispiel, die nächste Distanz von Block zu einer beliebigen Stange zu errechnen. Dies ergibt eine Auswertung auf die Bewegungsrichtung des Blockes, ohne Werte über die Drehung und

Rutschbewegung nachzuvollziehen. Des Weiteren erlauben die Markierungen, Messungen von Markierung zu Markierung durchzuführen, welche im Feld nicht oder ungenau erfasst wurden.

Bei der Vermessung der Blöcke zur Bestimmung ihrer Bewegung wurde gezielt auf ein einfaches Verfahren gesetzt. Die Erfassung des Objektes hätte zwar mit professionellen Vermessungsgeräten durchgeführt werden können, es bot sich jedoch an, im Feld auf einfache Hilfsmittel wie das Messband zurückzugreifen. Die Genauigkeit war für die Arbeit ausreichend und die einfache Arbeit verbessert das Prozessverständnis (Schweisstal 1966). Einziger Nachteil ist der Anspruch an HelferInnen, welche das Messband halten und das Fortbewegen in manchmal unwegsamem Gelände (Gebhardt et al. 2007).

Das benutzte Programm Agisoft PhotoScan ist ein Software Produkt, welches digitale Fotos photogrammetrisch prozessiert und 3D räumliche Daten generiert. Es wird häufig für GIS, Dokumentation von kulturellem Erbe und der Produktion von visuellen Effekten sowie für indirekte Messungen an Objekten verwendet (Agisoft 2017). In dieser Arbeit wurde das Programm verwendet, um 3D Modelle optisch und schematisch auszuwerten. Durch Messungen im Programm, konnten zusätzlich zu den Messungen an den Feldstandorten die Gletschertischbewegungen numerisch analysiert werden. Durch die 3D Modelle war es möglich, die Blöcke aus der Vogelperspektive und im Profil zu betrachten. Es konnte so eine Serie von Bildern der Blöcke aus derselben Perspektive erstellt werden. Die schematische Darstellung verschafft den Zugang zu einem Prozessverständnis der Bewegung der Gletschertische.

## 5.2. Luftbildanalyse

Die Luftbildanalyse wurde über drei Gletscher (Ober- und Unteraargletscher, Gornergletscher) geführt und zeigt eine Zeitreihe vom Jahr 2012 bis 2015. In diesen vier Momentaufnahmen der Gletscher zur Schmelzsaison wurden Blöcke ausgewählt, welche für alle vier Jahre verfolgt wurden. Ziel war es, eine grossräumige Analyse zu erstellen, welche sich mit den Resultaten der Feldstudie vergleichen lässt.

Es wurde eine Abweichung der Bewegung der Gletschertische in südlicher Richtung erwartet, also eine Abweichung des Bewegungsvektors von der Gletscherfliessrichtung. Die Luftbilder lieferten Aufschlüsse über die Reichweite der zusätzlichen Gletschertischbewegungen und die räumlichen Muster dieses Phänomens in einem grösseren Massstab als die Feldarbeit.

Zuerst wurden die Luftbilder des Untersuchungsgebiet Oberaargletscher analysiert, die Blöcke der Feldstudie gesucht und ihre Bewegungen aufgenommen. Es wurde der aktuelle GPS Standort der Gletschertische auf den Luftbildern eingegeben und die Spur der Gletschertische auf den Luftbildern vorheriger Jahre zurückverfolgt. Schwierigkeiten bestanden in der räumlichen sowie in der zeitlichen Auflösung der Luftbilder. Ist die Auflösung zu gross, können Gletschertische auf den Bildern nicht wiedererkannt und nicht verarbeitet werden. Eine optimale räumliche Auflösung beträgt  $<1\text{m}$ , während die zeitliche Auflösung optimal ein Jahr beträgt. Leider war es nicht möglich, den Persgletscher, wie ursprünglich geplant, für die Luftbildanalyse zu berücksichtigen. Die zeitliche Auflösung für diesen Gletscher war zu gross, um die Spur der einzelnen Blöcke verfolgen zu können.

Das Vorgehen der Luftbildbearbeitung ist wie folgt: Nachdem die Bilder georeferenziert wurden, folgte die Darstellung der Lage der Mittelmoräne als vereinfachte Linie. Es wurden Blöcke zufällig ausgewählt und markiert. In einem weiteren Schritt wurden die Blöcke in den Luftbildern der folgenden Jahre gesucht und ihre neuen Positionen bestimmt. Blöcke, bei denen die Positionen in den folgenden Luftbildern nicht offensichtlich zu erkennen waren, wurden, um Verwechslungen zu vermeiden, nicht verwendet (Abbildung 5.7). Die Analyse mit den Luftbildern beinhaltet Unsicherheiten in der Vermessung der Distanzen. Der sich verändernde Gletscherstand, Verzerrungen im Bild und Veränderung der Lage der Mittelmoränen beeinflussen die Distanzen der zusätzlichen Bewegung des Gletscherblockes auf dem Gletscher. Deswegen wurde die Annahme getroffen, dass die jeweilige Mittelmoräne konstant sei und dabei von der Mitte der Moräne als Gerade ausgehe.

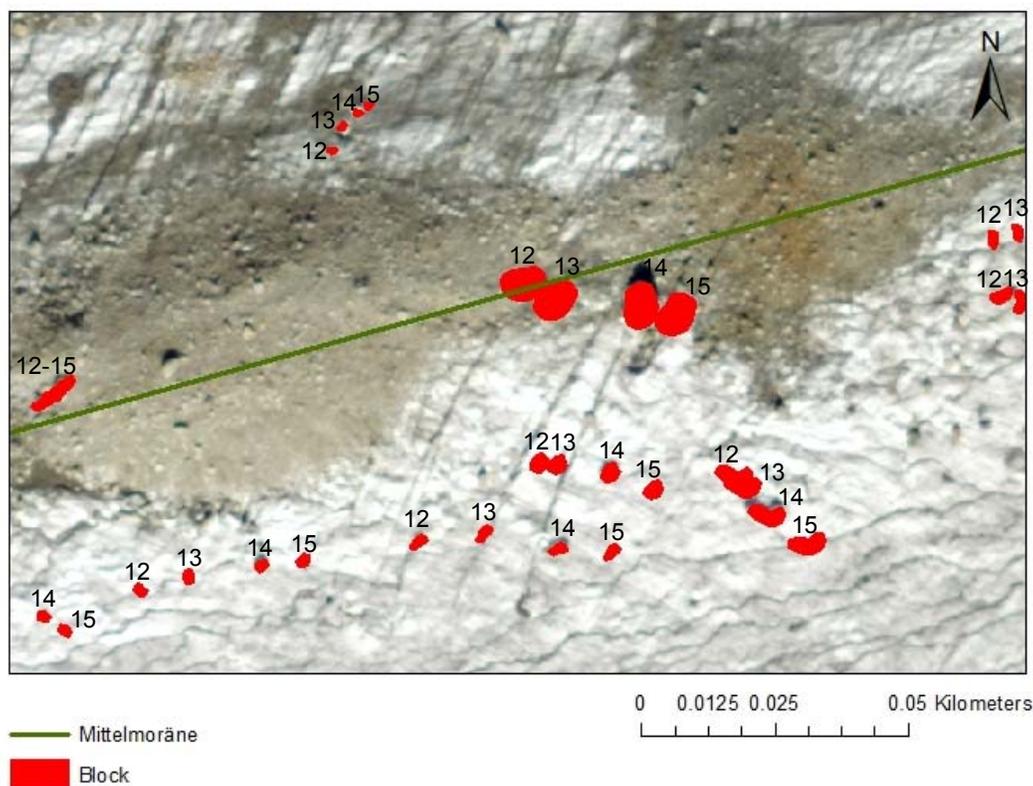


Abbildung 5.6 Ausschnitt aus dem Arbeitsprozess der Luftbildanalyse in ArcGIS. Grün dargestellt ist ein Mittelmoränenabschnitt, rot die ausgewerteten Blöcke in der Jahresabfolge beschriftet, in allen Fällen ist der Block im Westen aus dem Jahr 2012, der letzte Block der Abfolge, ganz im Osten von 2015.

Aus den Standortkoordinaten des Blockes, des Anfangspunktes und des Endpunktes des Mittelmoränenabschnittes wurde der Winkel zwischen Mittelmoränenabschnitt und Blockstandort ermittelt. Dadurch konnten die restlichen Teilstrecken des Blockes zur Mittelmoräne berechnet werden. Durch die Ermittlung der Querdistanz zwischen der Mittelmoräne und dem Block über die Zeitreihe hinweg, liessen sich, unter Miteinbeziehung der Richtung der Mittelmoräne, Aussagen über die Abweichung des Blockes von der Fließrichtung des Gletschers treffen (Abbildung 5.8). Die mittlere Himmelsrichtung der Mittelmoräne und der Blockbewegungen konnte anhand der Funktion *Compass A* im Programm ArcMap ermittelt werden.

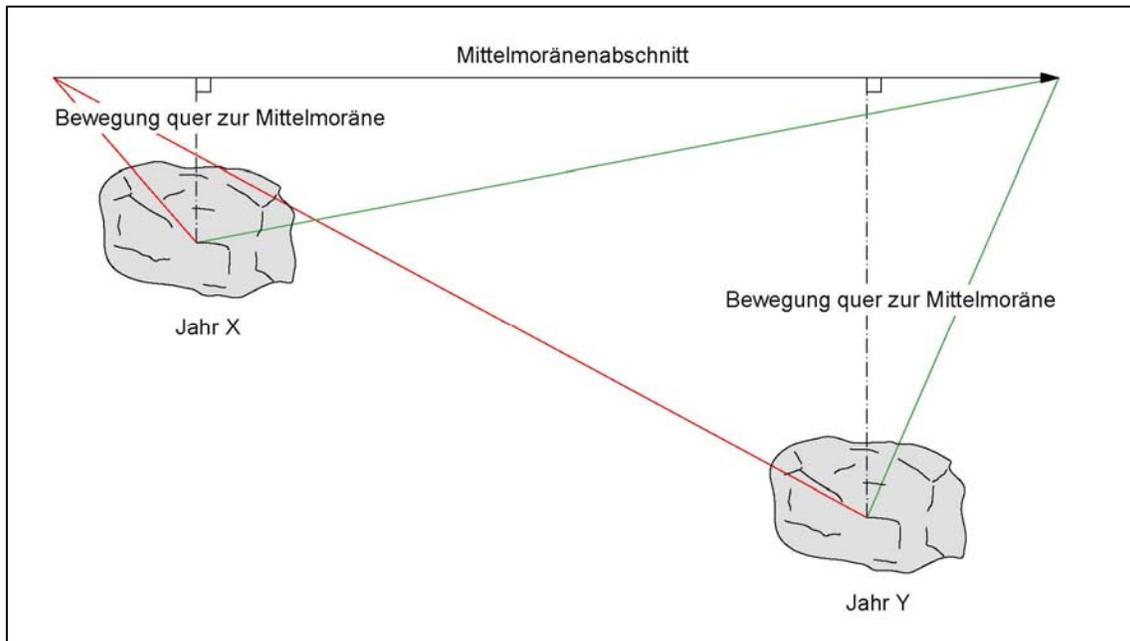


Abbildung 5.7 Berechnung der Gletschertischbewegung bei der Luftbildanalyse. Die Bewegung quer zur Mittelmoräne wird durch die Distanz vom Anfang (rot) und vom Ende (grün) des Mittelmoränenabschnittes berechnet. Die gesamte Bewegung quer zur Mittelmoräne wird durch die Differenz der Distanz aus dem ersten Luftbild (Jahr X) zum letzten Luftbild (Jahr Y) berechnet (eigene Darstellung).

Die errechneten Werte wurden untereinander verglichen und ausgewertet. Die Werte wurden folgendermassen unterteilt: in die Bewegung der Blöcke über die Zeit (Bewegung nach Süden, Bewegung in Gletscherfliessrichtung) und in die Eigenschaften und Standort des Blockes (Blockgrösse, Lage zur Mittelmoräne, Untergrund). Es wurden jeweils alle Eigenschaften mit den Bewegungen verglichen.

In einem erweiterten Versuch wurde die Fliessgeschwindigkeit der Gletschertische bestimmt. Ziel war es, herauszufinden, ob die Gletschertische neben ihrer erwarteten Abweichung in südlicher Richtung durch die Gletschertischbildung in ihrer Bewegung gebremst oder beschleunigt werden. Dies würde zeigen, ob zusätzlich zu der Distanz quer zur Mittelmoräne eine Abweichung in eine andere Himmelsrichtung stattfindet. Dabei dienten Blöcke auf der Mittelmoräne der Bestimmung der Fliessgeschwindigkeit des Gletschers. Es wurde in dieser Arbeit angenommen, dass Blöcke auf Schuttuntergrund keine Gletschertische bilden, da der Untergrund um den Block gleichermassen von der Strahlung geschützt wird. Somit bewegten sich diese Blöcke in derselben Geschwindigkeit und in dieselbe Richtung wie der Gletscher. In einem weiteren Schritt wurde untersucht, ob die Bewegung des Blockes schneller oder langsamer als die der Fliessgeschwindigkeit des Gletschers ist. So konnte berechnet werden, ob der Block in seiner Bewegung von der Strahlung gebremst oder in Gletscherfliessrichtung

sogar beschleunigt wird. Dabei gilt zu erwähnen, dass die Moränen am Ober- und Unteraargletscher sehr nahe an der Seite des Gletschers liegen und somit langsamer fließen als in der Mitte des Gletschers. Anhand der Referenzblöcke auf der Mittelmoräne wurde die mittlere Fließgeschwindigkeit pro Mittelmoränenabschnitt berechnet, welche mit der Bewegung der Blöcke in Gletscherfließrichtung verglichen wurde.

Bewegt sich ein Block auffallend stark nach Norden oder in unregelmässiger Geschwindigkeit, ist dies ein Anzeichen dafür, dass dieser entweder der Topografie wegen abgelenkt wurde oder in Gletscherspalten oder supraglazialen Abflüssen gerutscht ist. Anhand von digitalen Höhenmodellen oder den Luftbildern müssen diese Fälle nachkontrolliert werden. Die Bewegung dieser Blöcke ist nicht auf die Gletschertischbildung zurückzuführen.

### 5.3. Schmelzmodell

Um einen Vergleich zwischen den gemessenen und den modellierten Schmelzwerten zu erstellen, wurden jeweils vier Ablationsstangen, eine in jede Himmelsrichtung eingebohrt. Die Werte der Ablationsstangen gaben Aufschluss über die Temperaturverhältnisse direkt vor Ort, welche im Folgenden mit den Werten der Meteo Stationen der Umgebung abgeglichen wurden. Das Ziel dieser weiterführenden Arbeit ist es, zu untersuchen, ob die kalibrierten Gradtag-Modelle an den einzelnen Standorten im Feld zu den gleichen Ergebnissen führen, wie die Messungen. Ist dies der Fall, kann in zukünftigen Studien auf Ablationsstangen im Feld verzichtet und die Schmelzwerte mit dem Modell berechnet werden. Dies würde einen massiven Material- und Zeitaufwand ersparen.

In der Feldarbeit wurde wiederholte Male die Distanz vom oberen Ende der Stange zum Gletscherstand mit einem Messband gemessen. Die Differenz von der einen Messung zu der nachfolgenden beschreibt die Schmelze in der Zeit, die zwischen den Messungen vergangen ist (Abbildung 5.8).

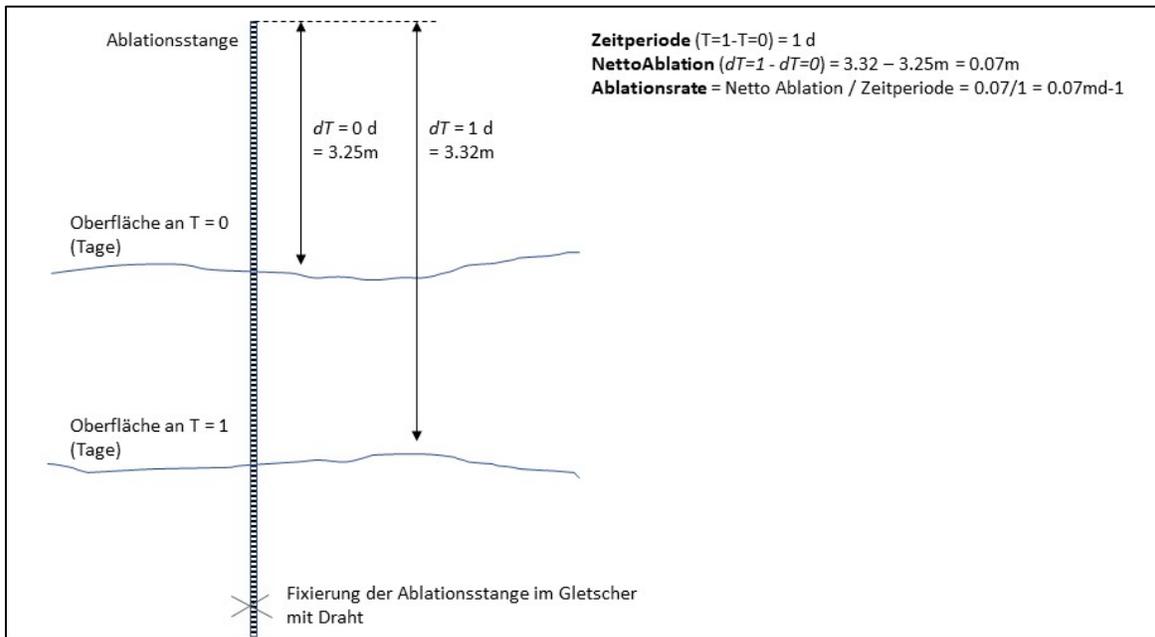


Abbildung 5.8 Darstellung einer Feldmessung mit Ablationsstangen nach Hubbard und Glasser (2005) von Schwendener (2017)

Gradtag-Modelle berechnen die Massenbilanz auf der Basis der Lufttemperaturen. Liegen die Temperaturen über Null Grad, tritt Schmelze auf, unter null Grad tritt keine auf. Der Vorteil von Gradtag-Modellen ist, dass sie sehr einfach zu berechnen und die Daten gut erhältlich sind. Wie Braithwaite und Oleson (1984) erkannten, gibt es eine hohe Korrelation zwischen den positiven Gradtagen und der Gletscherschmelze. Gradtag Modelle berechnen die Ablation basierend auf der Temperatur, dem konstanten Schmelzpunkt des Eises und dem positiven Grad des Schmelzfaktors. Für genauere Gradtag-Modelle wird zusätzlich die Solarstrahlung mitberechnet. Da die Schmelze nicht nur von der Temperatur bestimmt wird, hilft eine Weiterentwicklung der Gradtag-Modelle, welche die Globalstrahlung miteinbezieht, genauere Resultate zu erzielen (Johannesson et al. 1995, Schuler et al. 2002). Ungenauigkeiten dieser Modelle ergeben sich aus Durchschnittstemperaturen über längere Zeitabschnitte. Sind die Zeitabschnitte zu gross gewählt, zum Beispiel monatlich, kann die durchschnittliche Temperatur unter  $0^{\circ}\text{C}$  sein. Trotzdem könnte es dazwischen Tage mit Schmelze aufgrund der Temperaturschwankungen im Tagesgang geben. Parameter wie die Albedo oder der Schmelzfaktor beruhen auf Annahmen, welche für eine bestimmte Zeit und einen bestimmten Raum gewählt werden, jedoch lokal und zeitlich variieren können (Van de Wal 1996).

Ein einfaches Gradtag Modell für einen bestimmten Gletscher berechnet sich aus

$$M = K_I PDD + K_S PDD,$$

wobei  $M$  die Tiefe des geschmolzenen Schnees ist (gemessen in mm Wasser Äquivalent),  $PDD_I$  und  $PDD_S$  die Summe der jährlichen positiven Gradtage auf der spezifischen Höhe für Eis und Schnee darstellt und  $K_I$  und  $K_S$  die Gradtage der Faktoren für Eis und Schnee sind ([www.antarcticglaciers.org](http://www.antarcticglaciers.org), 26.08.2016).

Es gibt einen signifikanten Unterschied zwischen dem PDD und dem PDDSWR Modell. Das PDDSWR berücksichtigt genau wie das EBM die kurzwellige Strahlung in den Berechnungen. Die kurzwellige Strahlung hat einen Einfluss auf die tägliche Abweichung, welche am Nachmittag am höchsten und in der Nacht am tiefsten ist. Das PDD berücksichtigt diese Ungleichheit nicht. Des Weiteren hat die gewählte Höhe der Albedo einen Einfluss auf die Resultate. Eine hohe Albedo deutet auf einen Schnee/Eis Mix hin, während eine tiefe Albedo für altes Eis verwendet wird. Das einfache Gradtag-Modell wird beeinflusst von Temperatur, dem Schmelzfaktors des positiven Gradtages (PDDMF) und dem Schmelzpunkt des Eises. Das PDD\_SW Modell arbeitet zusätzlich mit weiteren Faktoren, dazu gehören die Albedo, der positive Gradtag Schmelzfaktor mit kurzwelliger Strahlung (PDDMF\_SW) und der Strahlungsfaktor der kurzwelligen Strahlung (SWRF).

Die Albedo beschreibt das Rückstrahlungsvermögen einer Oberfläche oder anders gesagt, den Teil, den die Erdoberfläche nicht absorbiert, sondern direkt wieder abgibt. Der Anteil der reflektierten kurzwelligen Strahlung wird berechnet durch die Albedo:

$$\alpha = SW_{out} / SW_{in}$$

wobei  $SW_{out}$  und  $SW_{in}$  die austretende und eintretende kurzwellige Strahlung darstellt.

In der Tabelle 5.1 sind die typischen Werte der Albedo für Schnee und Eis angegeben, welche in der Berechnung verwendet werden und die Resultate dabei stark beeinflussen können. Eine hohe Albedo ist typisch auf frischem Schnee und bedeutet, dass weniger Energie für die Schmelze vorhanden ist. Umgekehrt kann mehr Schmelzenergie bei einer tiefen Albedo wie bei leicht schuttbedeckten Gletschern entstehen (Benn und Evans 2014).

Tabelle 5.1 Charakteristische Werte für Schnee und Eis Albedo (Cuffey und Paterson 2010)

Surface type	Recommended	Minimum	Maximum
Fresh dry snow	0.85	0.75	0.98
Old clean dry snow	0.80	0.70	0.85
Old clean wet snow	0.60	0.46	0.70
Old debris-rich dry snow	0.50	0.30	0.60
Old debris-rich wet snow	0.40	0.30	0.50
Clean firn	0.55	0.50	0.65
Debris-rich firn	0.30	0.15	0.40
Superimposed ice	0.65	0.63	0.66
Blue ice	0.64	0.60	0.65
Clean ice	0.35	0.30	0.46
Debris-rich ice	0.20	0.06	0.30

Neben der Albedo übt die Bewölkung einen grossen Einfluss auf die Stärke der kurzwelligen Strahlung aus. Im Vergleich zu maritimen, häufig bewölkten Gebieten ist die kurzwellige Strahlung in alpinen Gebieten wichtiger, da der Himmel meist klar ist ([www.meteoschweiz.ch](http://www.meteoschweiz.ch), 11.04.2017; Benn und Evans 2014).

Die Parameter, welche bei einer Modellberechnung verwendet werden, können in den Werten variieren. Es müssen Annahmen und Schätzungen über die genauen Werte getroffen werden. Der Schmelzfaktor des positiven Gradtages (PDDMF) kann mit Beobachtungen abgeschätzt werden, er kann zwischen 0.3 und 0.9 cm/T/C schwanken. Er beschreibt den Schmelz Koeffizient in einem Tag pro °C in cm Wasseräquivalent. Der Schmelzfaktor SW (PDDMF\_SW) beschreibt den Schmelzkoeffizienten unter Berücksichtigung der kurzwelligen Strahlung. Die Anpassung der Temperatur der Messstationen auf die Höhe des Untersuchungsstandortes wird mit dem Faktor  $-0.6 \text{ °C}/100\text{m}$  berechnet (Vieli 2014).

Das einfache Gradtag-Modell reagiert nur auf Veränderungen am Schmelzkoeffizienten, also auf die Festigkeit des Untergrundes Eis/Schnee. Das erweiterte Modell, welches die Strahlung miteinbezieht, ist von weiteren Parametern abhängig. Erhöht man die Albedo, so wird die Schmelzrate kleiner. Erhöht man den Schmelzfaktor SW, steigt die Schmelzrate an. Das gleiche gilt, wenn der SWRF erhöht wird.

## 6. Resultate

In den folgenden Kapiteln werden die Resultate dieser Arbeit zusammengetragen. Der Abschnitt zur Feldstudie zeigt eine optische Auswertung der Bewegungen der Gletschertische zu den Ablationsstangen. Dazu werden die Resultate der Vermessungen im Feld dargelegt. In der Luftbildanalyse werden die Ergebnisse der Blockbewegungen des Ober-, Unter- und Gornergletschers im Zeitraum von 2012 - 2015 aufgeführt. Im Abschnitt des Schmelzmodells werden die Resultate des Vergleichs zwischen der Schmelzmessung und der modellierten Schmelze beschrieben.

### 6.1. Feldstudie

Die Feldstudie zeigt aufschlussreiche Bildserien und Bewegungsmessungen vom Oberaargletscher und dem Persgletscher aus der Pilotstudie 2016 und vom Oberaargletscher in der Feldsaison 2017. Die Blöcke zeigten sich während einer Feldsaison in verschiedenen Stadien eines Gletschertischzyklus: als Gletschertisch auf einem Sockel, seitlich abgerutscht oder flach auf dem Gletschereis ohne Sockel. Es handelt sich bei der Dokumentation um Momentaufnahmen mit Intervallen von zwei Wochen zwischen den Messungen. Die komplette optische Auswertung findet sich im Anhang.

In Tabelle 6.1. sind die Bewegungen der Gletschertische über eine Messperiode zusammengefasst. In der Feldsaison 2016 am Persgletscher bewegte sich der Gletschertisch PE1 33cm und der Gletschertisch PE2 56cm nach Süden mit einer leichten Abweichung nach Westen. Der Block am Oberaargletscher erreichte in der Saison 2016 eine ähnliche Distanz von 58cm nach Süden. Die Saison 2017 zeigte eine grosse Varianz der Bewegungen. Am Oberaargletscher erreichte der Gletschertisch OA1 eine Distanz von 82cm Richtung Osten, während der Gletschertisch OA2 508cm und der Gletschertisch OA3 174cm nach Südosten rutschten.

*Tabelle 6.1 Tabelle zur Auswertung der Distanzen und Bewegungsrichtung aller beobachteten Blöcke. Es wird die Bewegung in NS und WE Achse gemessen und die Drehung der Blöcke. X = fehlende Werte. Die Distanz während einer Feldsaison ist gegeben durch die Differenz des Abstandes von der Markierung am Block zur Ablationsstange unten beim Gletschereis am Anfang der Messperiode und am Ende. Der Bewegungsvektor wurde in Agisoft Photoscan nachgemessen und entspricht der Differenz der nächsten Distanz zwischen Nordstange und Block zu Beginn der Messperiode und am Ende.*

<b>Block Bezeichnung</b>	<b>Distanz während einer Feldsaison (Nordstange Nordmarkierung)</b>	<b>Distanz während einer Feldsaison (Weststange – Westmarkierung)</b>	<b>Bewegungsvektor</b>	<b>Drehung</b>
<b>PE1</b>	59cm	X	33cm / Südwesten	-10°
<b>PE2</b>	56cm	X	56cm / Südwesten	-90°
<b>OA1 (2016)</b>	49cm	29cm	58cm / Süden	0°
<b>OA1 (2017)</b>	78cm	189cm	82cm / Osten	30°
<b>OA2</b>	587cm	341cm	508cm / Südosten	45°
<b>OA3</b>	180cm	216cm	174cm / Südosten	20°
<b>Mittelwert</b>	168.166667cm	193.75cm	151.833333cm	-0.83333333
<b>Median</b>	68.5cm	202.5cm	70cm	10

Es lassen sich für die Resultate der Feldarbeit folgende Aussagen zusammenfassen: Die Messungen zeigten bei allen untersuchten Gletschertischen eine Bewegung zu den Ablationsstangen im Süden hin. Am Persgletscher, der von Südosten nach Nordwesten fließt, fand eine schwache Abweichung der Gletschertischbewegung in der Nord-Süd-Achse nach Westen statt. Der Oberaargletscher fließt entgegengesetzt von Westen nach Osten. Dort wurde die Südbewegung der Gletschertische zusätzlich sehr stark nach Osten abgelenkt. Der Bewegungsvektor der Blöcke wies in den Messperioden eine Distanz von maximal 508cm auf, im Mittelwert erreichten die Blöcke einen Bewegungsvektor von 151,83cm. Der Mittelwert wurde hier stark von dem Ausreißer OA2 beeinflusst und ergab im Vergleich zu der meistgemessenen Distanz ein verfälschtes Resultat. Der Median lag darum mit 68,5cm wesentlich tiefer (Tabelle 6.1).

### 6.1.1. Persgletscher

In der Messperiode vom 23.8 - 20.9.2016, in 29 Tagen, schmolz über beide Feldstandorte am Persgletscher gemittelt 114.25cm Höhe des Gletschereises. Dies ergab eine Schmelze von 3,9 cm/Tag.

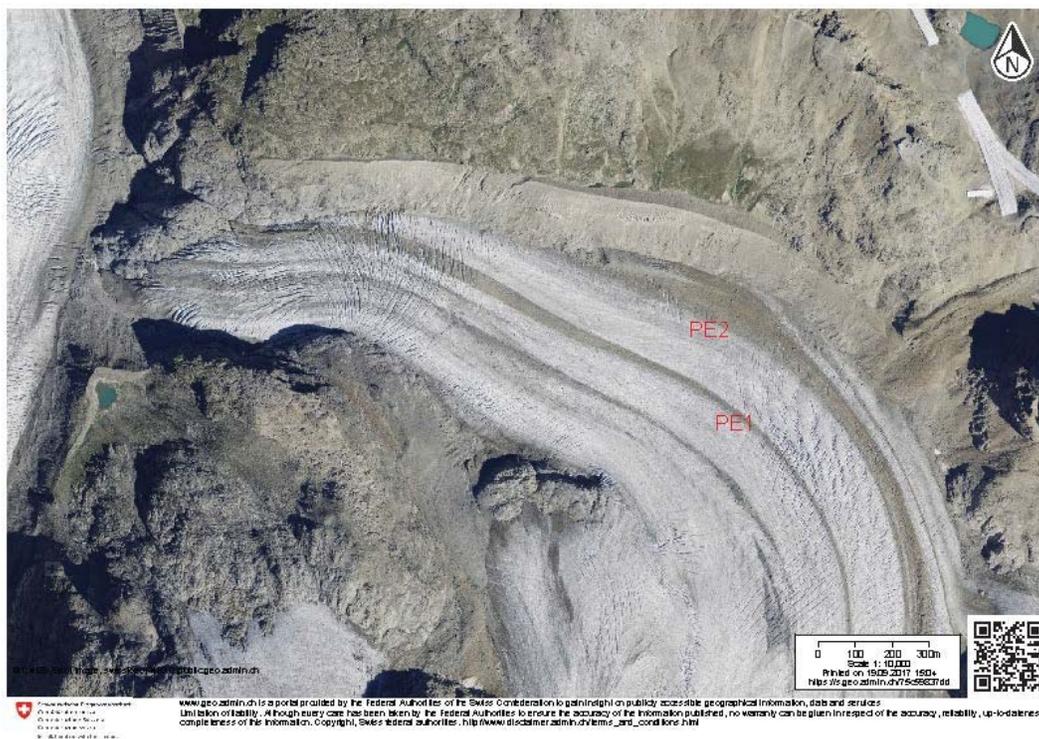


Abbildung 6.1 Lage der Gletschertische PE1 (793'756, 142'468) und PE2 (793'686, 142'721) am Persgletscher (Swisstopo).

#### PE1

Der Block PE1 hat eine Form die einer Platte ähnelt und ist 92x 167cm gross. Er wurde in einem Moment erfasst, als er vom Sockel schon abgerutscht war. Die Hauptbewegung, welcher der Block in der Messperiode machte war eine Rutschung seitlich am Sockel hinunter, bis der Block weiter südlich flach zu liegen kam. Die Bewegung weg von der Nordstange belief sich in dieser Zeit auf 50cm am untersten Punkt der Stange zur Nord-Markierung am Block. Vom oberen Ende der Ablationsstange zur selben Markierung auf dem Block waren es 150cm. Die Distanz zur Südstange liess sich nicht genau feststellen, da sie zur zweiten Feldmessung vom Block überfahren wurde. Obwohl der Block schon zum Zeitpunkt der ersten Messung schräg auf dem Sockel stand, hatte er an der Südmarkierung eine Höhe von 20cm zum restlichen

Gletscherstand. Beim zweiten Feldtag auf dem Persgletscher betrug die Sockelhöhe 0cm, der Block lag direkt auf dem Gletscher auf. Der Sockel war bei der nördlichen Markierung noch zu erkennen, erhob den Block aber kaum mehr über den restlichen Gletscherstand.

Um den Block PE1 lagen vereinzelte, runde Blöcke mit einem Durchmesser von etwa 50cm bis 70cm. Diese bildeten keine Tische. Die Distanz vom Block PE1 zu einem der kleineren Blöcke südwestlich davon verringerte sich. Die restlichen umliegenden Blöcke konnten nicht mehr erkannt werden, da ein früher Schneefall diese verdeckt hatte.

## **PE2**

Der Block PE2 hat eine zylindrische Form und misst 132x70 cm. Er wurde erfasst, als er einen ausgebildeten Gletschertisch zeigte. Bei der zweiten Messung rutschte er vom Sockel komplett ab. Der Block drehte sich um etwa 90° nach Westen ab und stand am Ende der Messung quer zu den Ablationsstangen Nord und Süd. Die Distanz von der Nordstange zur Nordmarkierung vergrösserte sich deutlich von der ersten zur zweiten Messung. Die Distanz von der Südmarkierung zur Südstange (oberes Ende) war am Ende der Messungen 94cm grösser als bei der ersten Messung, während die Distanz am Boden Südstange zur Markierung um 27cm verkleinerte. Die Distanz vergrösserte sich in Richtung Westen. Von der Nordstange oben zur Nordmarkierung vergrösserte sich die Distanz deutlich, von 80cm auf 240cm und am Boden von 114cm auf 150cm. Der Block PE2 bewegte sich in der Messperiode Richtung Südwesten.

Im weiteren Umfeld des PE2 befanden sich mehrere Blöcke ähnlicher Grösse oder noch grösser, welche alle einen Gletschertisch bildeten. Die genaue Abrutschrichtung lässt sich optisch nicht erkennen. Generell kann man aber sagen, dass alle Gletschertische in die Hauptrichtung Süden abrutschten. Blöcke die kleiner als PE2 waren, bildeten in dessen Umfeld keine Gletschertische.

## 6.1.2. Oberaargletscher

In der Feldsaison vom 2.7.- 16.8.2017 schmolz an den Feldstandorten auf dem Oberaargletscher eine gemittelte Höhe von 265.75cm. Verteilt auf 45 Tage waren das durchschnittlich 6cm/Tag.

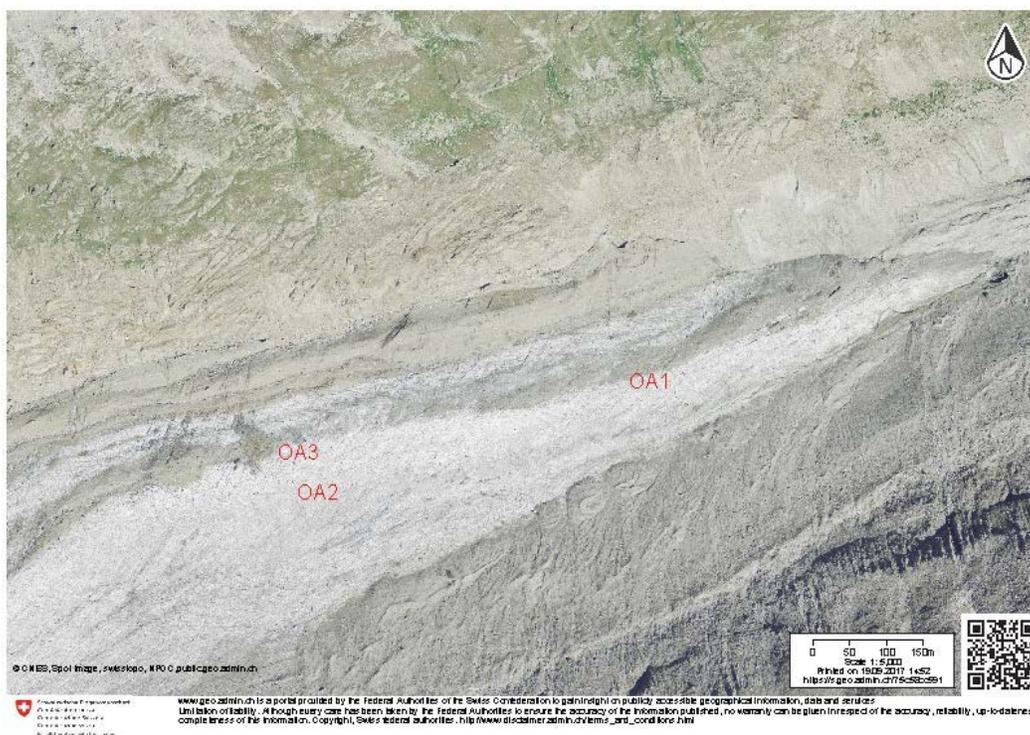


Abbildung 6.2 Lage der Gletschertische OA1(660'300, 154201), OA2 (659854, 154048)und OA3 (659841, 154129) auf dem Oberaargletscher (Swisstopo).

### OA1

Der OA1 wurde als einziger Block über zwei Schmelzsaisons über beobachtet. Der Block ist 247x198cm gross und besitzt eine plattige Form. In der Schmelzsaison 2016 wurde er von Mitte August bis Mitte Oktober observiert, in der Saison 2017 von Anfang Juli bis Mitte August. Zu Beginn der Messreihe 2016 war der Gletscherblock auf einem Sockel, einem typischen Gletschertisch. Die zweite Messung zeigt einen klaren Rutsch nach Süden. Wie es scheint, rutschte der Nachbarsblock schon zum Zeitpunkt der ersten Messung nach Süden hin ab. Auch die Vermessung der Stangen und Markierungen zeigen einen Rutsch von OA1 nach Süden. Die Norddistanz stieg in der Saison 2016 von 91cm bei der ersten Messung auf 139cm bei der

letzten Messung an. Die Distanz von der Südstange zur Südmarkierung betrug zu Beginn der Messung 56cm Abstand. Diese Distanz wurde im Lauf der Messung immer kleiner. Der Block fuhr bei Abschluss der Messung über die Südstange hinaus und knickte diese um. In der Schmelzsaison 2017 wurde der Block bei der ersten Messung wiederum als Gletschertisch erfasst. Der Block wanderte in den ersten zwei Wochen nach Osten, und drehte sich dabei im Uhrzeigersinn um etwa 70°. Es wurde in der Schmelzsaison 2017 keine Bewegung des Blockes nach Süden erkannt, sondern nach Osten. Trotzdem wurde die Distanz zwischen Nordmarkierung auf dem Block und Nordstange immer grösser, da sich die Markierung auf dem Block nach Osten von der Nordstange entfernte. Die Distanz betrug anfangs der Messungen 2017 357cm, wurde kurzfristig kleiner (324cm), um sich dann wieder auf 435cm zu vergrössern. Die Südmarkierungen hatten eine Distanz von 392cm und stiegen im Laufe der Messungen leicht an, auf 450cm. Die Messungen von der Nord- und Südstangen zum Mittelpunkt des Punktes zeigten am 18.07.2017 einen kleinen Nordrutsch, danach bewegte sich der Block nicht mehr stark bis Ende der Messungen. Die Ostbewegung wird anhand der Stangen Ost und West und der Markierung Zentrum gemessen. Während sich die Distanz nach Westen fortlaufend vergrösserte (582cm bis 718cm), verkleinerte sich die Distanz nach Osten hin (644cm nach 523cm). Der OA1 bewegte sich in Hauptrichtung nach Osten.

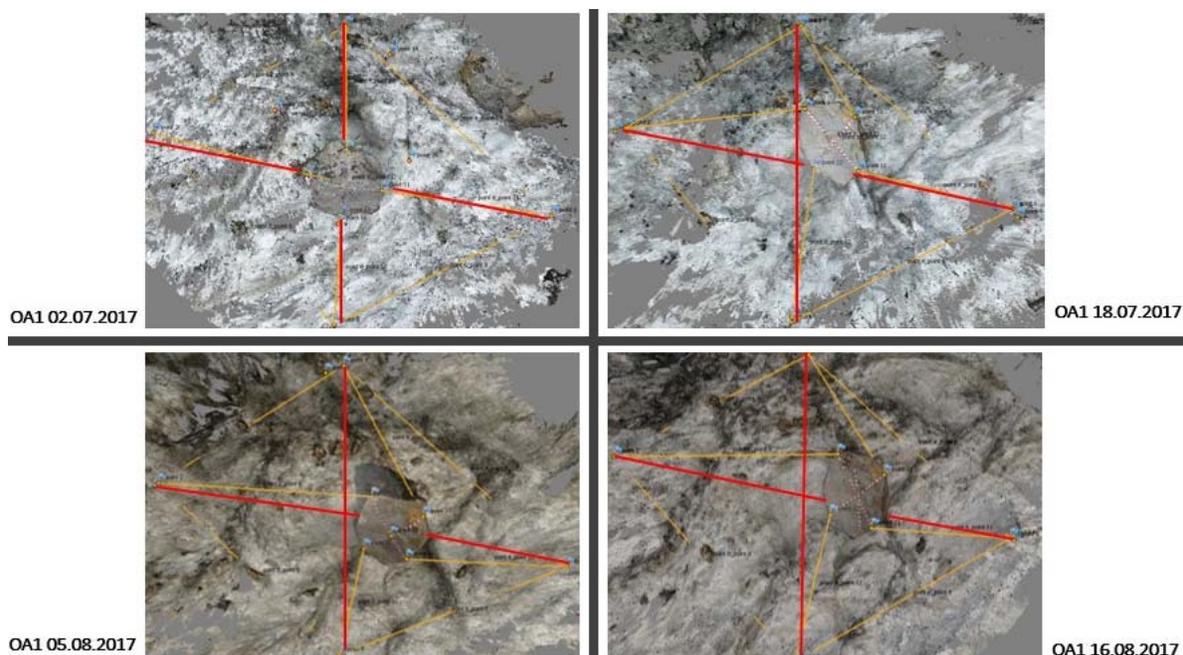


Abbildung 6.3 Bildserie des 3D Modells von dem Gletschertisch OA1 der Feldsaison 2017. Die roten Linien zeigen die Nord-Süd Achse und die West-Ost Achse. Oben links ist der Block mittig zwischen den Ablationsstangen. Bei der letzten Messung liegt der Block östlich der ursprünglichen Position.



Abbildung 6.4 Der Block OA1 in der Saison 2017 im Profil. Die Fotos sind von Norden mit Blick auf die südliche Seitenmoräne des Oberaargletschers aufgenommen worden. Im ersten Bild steht der Block auf dem Sockel. Im zweiten Bild ist der Block nach Osten abgerutscht. Er liegt im Westen noch auf dem Rest des ersten Sockels, während dem sich östlich unter dem Block schon ein neuer Sockel anfängt zu bilden.

Der Sockel von OA1 war zu Beginn der Messung 2017 sehr stark ausgebildet und gut 1m hoch. In den folgenden zwei Wochen rutschte der Block ab und blieb bis zum Ende der Messungen in einer Schräglage. Trotzdem scheint der schräge Gletschertisch an den letzten zwei Feldmessungen leicht gewachsen zu sein. Die Sockelhöhe wurde am Anfang auf eine Summe von 112,5cm berechnet. Danach verkleinerte sich der Sockel auf einen Wert von 51,5cm, um schliesslich wieder auf 81,5cm anzusteigen.

Der Block OA1 liegt in unmittelbarer Nähe eines noch grösseren, eher zylindrischen Blockes (250x390cm). Über die Zeit der Messungen wurde die direkteste Distanz zwischen diesen zwei Blöcken gemessen. Zu Beginn der Messungen 2017 betrug die Distanz 307cm und stieg dann auf 720cm an. Es ist auf den Bildern zu erkennen, dass dieser Nachbarsblock zuerst in Gletscherfliessrichtung, nach Osten also, abrutschte, und danach nördlich des Sockels kippte.

## OA2

Der Block OA2 ist 192x335cm gross. Er ist eine etwas abgerundete Platte. Über die Sommersaison 2017 konnte man eine Bewegung stark gegen Südosten erkennen. Der Block legte von der ersten Feldmessung bis zur letzten, bezogen auf die Nordstange zur der

Nordmarkierung, eine Distanz von 587cm zurück. Der Abstand zur Südstange war anfangs 300cm gross, verringerte sich zwischenzeitlich durch den Südrutsch (233cm). Er vergrösserte sich jedoch mit fortschreitender Schmelzsaison auf 414cm Distanz. Dies aufgrund der Osttendenz in der Rutschung. Anfangs der Messungen betrug diese Distanz 67cm. Auch der OA2 hat sich während der Rutschung gedreht. Er drehte sich in Richtung Uhrzeigersinn um etwa 45°. Da die Drehung nicht sehr stark ist, braucht es hier die Messung von den Stangen ins Zentrum nicht zwingend. Eine Interpretation der Bewegung ist in diesem Fall auch ohne diese Werte möglich.

Der OA2 zeigte einen beträchtlichen Sockel neben sich, lag jedoch zum Zeitpunkt der ersten Messung direkt auf dem Gletschereis ohne Sockel. Verglichen mit der Grösse des Blockes, liess sich am Schluss der Schmelzsaison nur ein sehr kleiner Sockel feststellen. Die Sockelhöhe von OA2 stieg kurzzeitig von 63,75cm auf 81cm an, um am Ende der Messungen wieder auf 72,25cm zu sinken. Es gab also maximal eine leichte Erhöhung des Sockels von 20cm. Die alten Sockelrelikte sind am OA2 speziell gut zu erkennen. Hier sieht man, dass der Block mehrere Gletschertische gebildet hatte und abgerutscht war (Abbildung 6.5).



Abbildung 6.5 Der Block OA2 fotografiert von Südwesten. Dieser liegt nach dem Abrutschen vom Sockel auf dem flachen Gletschereis. Dahinter, schwarz markiert, die Sockel, auf denen der Block früher in dieser Saison lag (05.08.2017).

### OA3

Der dritte und höchstgelegenste untersuchte Block OA3 misst 170x216cm und hat die Form einer Platte. Da der Gletschertisch zum Zeitpunkt einer Felduntersuchung rutschte, gab es hier eine Messung mehr. Die Distanz von der Nordstange zur Nordmarkierung stieg kontinuierlich an. Zu Beginn der Messung betrug der Abstand von der Nordmarkierung auf dem Block zur

Nordstange 428cm und vergrösserte sich bis zum Ende der Messungen um 180cm auf 608cm Distanz. Die südliche Distanz ist von 434cm, um 157cm, auf 277cm kleiner geworden. Der Block OA3 hat eine südöstliche Bewegung zurückgelegt. Wobei zu erwähnen ist, dass die erste Bewegung weg vom Sockel Süd gerichtet war, während die drei folgenden Messungen eher eine Bewegung gegen Osten zeigten.

Der OA3, der zu Beginn der Messungen einen ausgebildeten Sockel zeigte, wuchs nach dem Rutsch des Blockes nicht mehr richtig. Die Werte sanken beim Rutsch von 80cm auf 50cm und schwankten dann leicht um 10cm.

### 6.1.3. Zusatzstudie Oberaargletscher

In einer Zusatzstudie am Oberaargletscher wurden im Feld 36 Blöcke in der Grössenordnung 10x20cm bis 120x170cm auf einer Fläche von 90x35m untersucht. Diese Fläche befand sich nördlich der Mittelmoräne und ist nach Norden hin leicht abfallend.

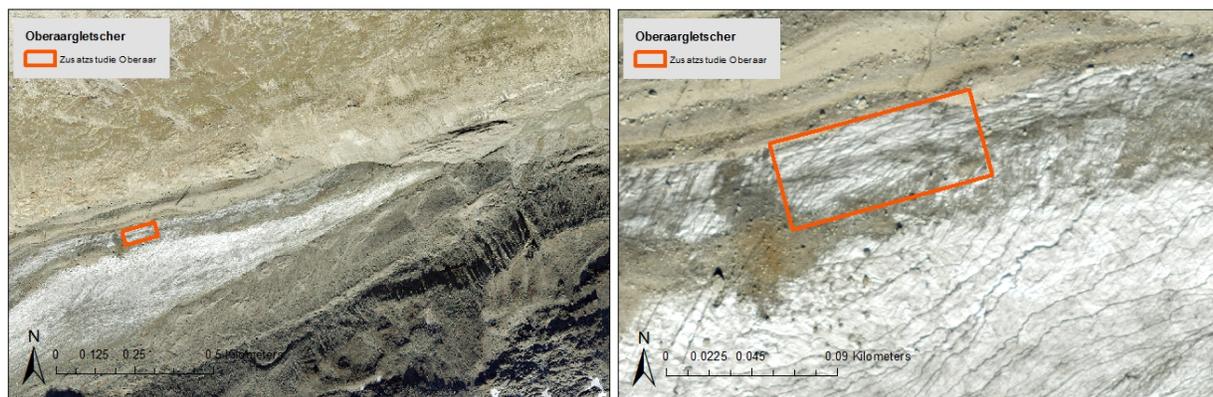


Abbildung 6.6 Lage des Feldversuches. Orange ist das Versuchsfeld am Standort Oberaargletscher markiert. Das Feld befindet sich nördlich der Mittelmoräne auf 2460m ü.M. (Swisstopo).

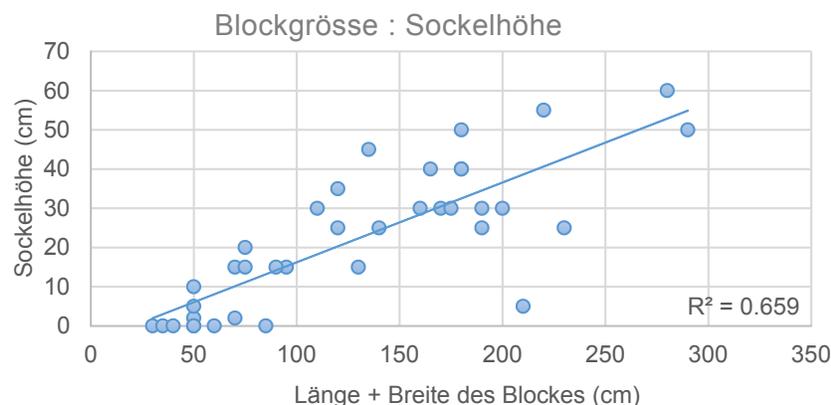


Abbildung 6.7 Vergleich zwischen Blockgrösse und Sockelhöhe der Zusatzstudie.

In diesem Feld wurde die Grösse aller Blöcke erfasst, ihre Sockelhöhe vermessen, die Form bestimmt und fotografisch festgehalten. Die kleinen Blöcke von mit einer Länge+Breite von 50cm bis 100cm bildeten einen bis zu 20cm hohen Sockel. Kleinste Blöcke bis 50cm Länge+Breite bildeten keine Gletschertische aus. Die Ausreisser ergeben sich aus den Fällen, wo nicht klar war, ob es sich um einen Sockel in geschmolzenen Zustand handelte oder eine Unebenheit in der Eisoberfläche. Die grössten Sockel wurden von den grössten Blöcken erreicht. Die Blöcke mit einer Grösse von 140cm bildeten einen Sockel von 50cm und 60cm Höhe.

Abbildung 6.7. zeigt, dass es einen Zusammenhang zwischen der Blockgrösse und der Sockelhöhe gibt. Ein Vergleich der Sockelhöhe mit der Blockgrösse zeigt eine positive Korrelation.

Weiter wurde in diesem Versuch der Einfluss der Form auf die Sockelgrösse untersucht. Die Blöcke wurden in drei Klassen unterteilt; runder Block (O), dicke Platte (D), Platte (-). Im untersuchten Feld war die Anzahl von Platten höher als die der beiden anderen Klassen. Der Mittelwert der Sockelhöhe der Klasse D = 23,33cm, bei Klasse O = 27,22cm und bei den Platten (-) wurden die Sockel im Schnitt 19,96cm hoch. Die Platten bildeten die grösste Gruppe und zeigten eine Streuung der Sockelhöhe von 16,98cm. Die Streuung der Blöcke betrug 19,22cm und diejenige der dicken Platten war mit 23,63cm am höchsten. Aus der Grafik lässt sich keine Abhängigkeit von Form und Sockelhöhe schliessen (Tabelle 6.2).

*Tabelle 6.2 Einteilung der untersuchten Blöcke der Zusatzstudie in Klassen der Form im Vergleich mit der Sockelhöhe der Gletschertische und der Blockgrösse.*

<b>Sockelhöhe</b>			
<b>Klasse</b>	<b>n=37</b>	<b>Mittelwert</b>	<b><math>\sigma</math></b>
<b>Platte</b>	25	19.96	16.98401209
<b>dicke Platte</b>	3	23.33333333	23.62907813
<b>Block</b>	9	27.22222222	19.22093766
<b>Länge+Breite</b>			
<b>Klasse</b>	<b>n=37</b>	<b>Mittelwert</b>	<b><math>\sigma</math>.</b>
<b>Platte</b>	25	109.4	57.88494335
<b>dicke Platte</b>	3	191.6666667	108.6661554
<b>Block</b>	9	160	76.36262175

## 6.2. Luftbildanalyse

Im folgenden Abschnitt werden die Resultate der Luftbildanalyse gemäss der vorher beschriebenen Methode erläutert. Auf den Luftbildern der Jahre 2012 - 2015 des Ober-, Unteraar- und Gornergletschers wurden insgesamt 77 Blöcke in ihrer Grösse, Bewegungsrichtung und -distanz untersucht.

Tabelle 6.3 Anzahl und Distanz quer zur Mittelmoräne der untersuchten Blöcke der Luftbildanalyse.

<b>Alle untersuchten Blöcke</b>	<b>Unteraar</b>	<b>Oberaar</b>	<b>Gorner</b>	<b>Total</b>	<b>Mittel</b>	<b><math>\sigma</math></b>
n	25	29	23	77		
n (Bewegung nördl. zur Mittelmoräne)	5	7	2	14		
Distanz quer zur Mittelmoräne in südlicher Richtung (m/Jahr)	2.67	1.97	3.74		2.79	0.89
Distanz quer zur Mittelmoräne in nördlicher Richtung (m/Jahr)	-1.74	-0.93	-1.61		-1.43	0.44
Mittelwert (m/Jahr)	0.47	0.52	1.06		0.68	
<b>Ausreisser bereinigt</b>						
n	21	25	21	67		
n (Bewegung nördl. zur Mittelmoräne)	4	5	1	10		
Distanz quer zur Mittelmoräne in südlicher Richtung (m/Jahr)	2.55	1.69	3.55		2.6	0.93
Distanz quer zur Mittelmoräne in nördlicher Richtung (m/Jahr)	-1.31	-0.74	-0.8		-0.95	0.31
Mittelwert (m/Jahr)	0.62	0.47	1.37		0.82	

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Blöcke dieser Untersuchung im Mittel eine positive Abweichung quer zur Gletscherfliessrichtung in südlicher Richtung aufzeigten. Von allen untersuchten Blöcken bewegten sich 14 in einer nördlichen Abweichung von der Gletscherfliessrichtung. Die restlichen 63 Blöcke bewegten sich in einer südlichen Ablenkung von der Mittelmoräne weg. 81,8% aller untersuchten Blöcke zeigten folglich eine Verschiebung in südlicher Richtung quer von der Mittelmoräne weg. Die mittlere Distanz quer zur Mittelmoräne in südlicher Richtung betrug 2,8 m/Jahr, während die mittlere Distanz quer zur Mittelmoräne in nördlicher Richtung mit -1,4 m/Jahr um die Hälfte tiefer war. In einem weiteren Schritt wurden Ausreisser von den Werten bereinigt. In der Luftbildanalyse wurden Blöcke, welche durch Fremdeinflüsse bewegt worden waren, weggelassen. Als Fremdeinflüsse wurden Gletscherphänomene wie oberflächige Abflusssysteme oder Mühlen gewertet. Ohne die Ausreisser betrug der Anteil der Blöcke, welche sich in südlicher Richtung quer von der

Mittelmoräne wegbewegten 10 von 67 (14,9%). Es bewegten sich 85,1% quer zur Mittelmoräne in südlicher Richtung weg. Die Distanz in nördlicher Richtung betrug im Mittel -1 m/Jahr, während die Distanz der Bewegung in südliche Richtung 2,6 m/Jahr betrug (Tabelle 6.3).

### 6.2.1. Oberaargletscher

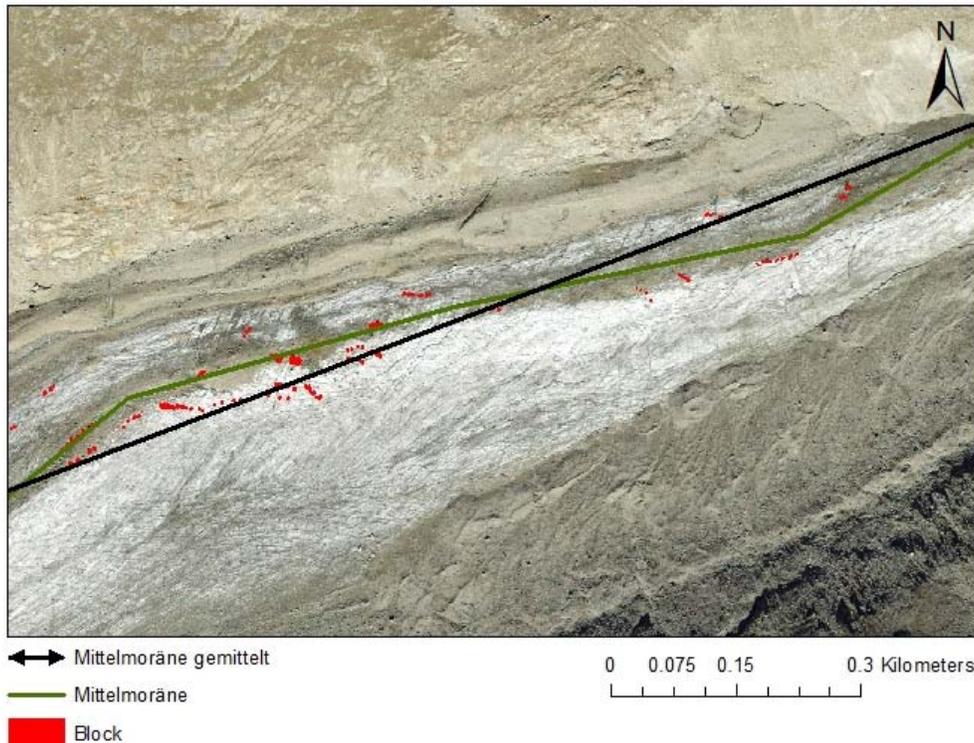


Abbildung 6.8 Kartenausschnitt bearbeitet aus dem Luftbild des Oberaargletschers 2014 (VAW).

Im Untersuchungsgebiet am Oberaargletscher wurden 29 Blöcke über die Jahre 2012 - 2015 mit einem mittleren Durchmesser von 8m bei einer Standardabweichung von 4,6m untersucht. Der Gletscher fliesst mit  $69,2^\circ$  nach Nordosten. Die Fliessgeschwindigkeit betrug nach Bauder und Rüegg (2009) 2,1 – 19,8m/Jahr, während die tieferen Werte ganz unten an der Gletscherzunge und die höheren Werte in der Nähe der Gleichgewichtslinie entnommen wurden (Bauder und Rüegg 2009). Die Fliessgeschwindigkeit des Gletschers, ermittelt an den Blöcken auf der Mittelmoräne mass 4,3 m/Jahr. Die mittlere Geschwindigkeit der vermessenen Blöcke betrug 5,3 m/Jahr. Die Blöcke bewegten sich somit durchschnittlich 1 m/Jahr schneller als der Gletscher in dieselbe Richtung. Die Bewegung quer zur Gletscherfliessrichtung betrug im Mittel 0,5 m/Jahr. Die mittlere Bewegungsrichtung der Gletschertische ergab  $81,6^\circ$  nach Nordosten. Die vermutete durchschnittliche Abweichung zur Fliessrichtung der Moräne war somit  $12^\circ$  nach Südosten.

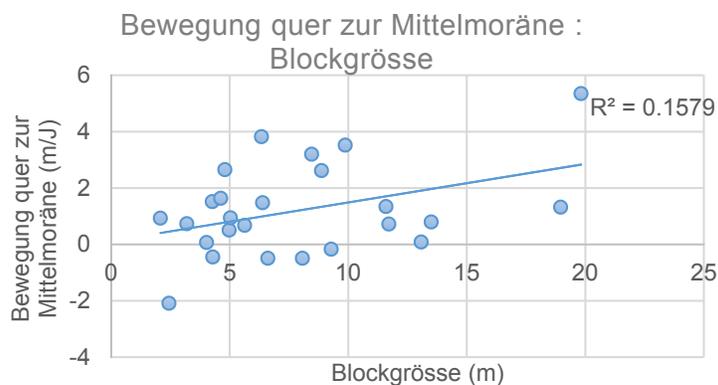


Abbildung 6.9 Vergleich der Bewegung quer zur Mittelmoräne und der Blockgrösse der Luftbildanalyse am Oberaargletscher 2012-2015.

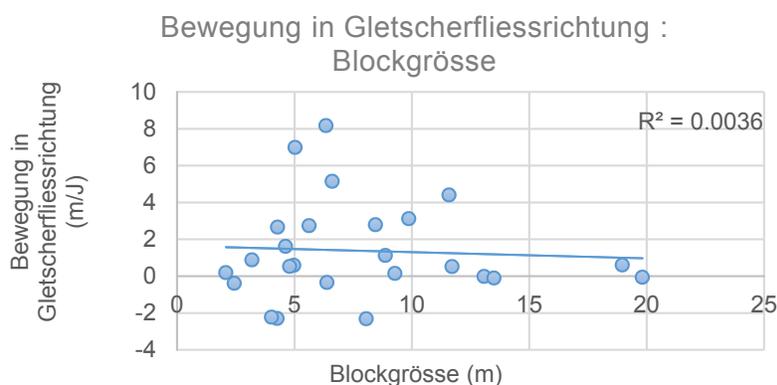


Abbildung 6.10 Vergleich der Bewegung in Gletscherfliessrichtung und der Blockgrösse der Luftbildanalyse am Oberaargletscher 2012-2015.

Tabelle 6.4 Mittelwert und Standardabweichung der Blockgrösse und der Blockbewegung der Luftbildanalyse am Oberaargletscher 2012-2015.

<b>Bewegung quer zur Mittelmoräne</b>				
<b>Blockgrösse</b>	<b>Mittelwert</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Median</b>	<b>n</b>
<b>0 - 5m</b>	0.605797627	1.364	0.727911943	9
<b>5 - 10m</b>	1.503768983	1.677	1.201777165	10
<b>&gt;10m</b>	1.870380272	1.874	1.050046932	6
<b>Mittelwert/Total</b>	1.326648961	x	x	25
<b>Bewegung in Gletscherfliessrichtung</b>				
<b>Blockgrösse</b>	<b>Mittelwert</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Median</b>	<b>n</b>
<b>0-5m</b>	0.169568287	1.63	0.527146116	9
<b>5-10m</b>	2.752336842	3.299	2.759499693	10
<b>&gt;10m</b>	0.886861074	1.75	0.244178161	6
<b>Mittelwert/Total</b>	1.269588735	x	x	25

Die Vergleiche der erworbenen Daten wiesen keinen statistischen Zusammenhang zwischen Blockgrösse und der Blockbewegung, weder in Gletscherfliessrichtung noch quer zur Mittelmoräne auf. Die Auswertung zeigte jedoch auch, dass Blöcke mit Durchmesser 5-10m die grösste Bewegung aufzeigten mit 2 m/Jahr quer zur Mittelmoräne und 2,75 m/Jahr in Gletscherfliessrichtung. Bei den Blöcken, die einen grösseren Durchmesser als 10m besitzen, nahm die Reichweite der Bewegung wieder ab.

*Tabelle 6.5 Mittelwert und Standardabweichung der Lage zur Mittelmoräne und der Blockbewegung der Luftbildanalyse am Oberaargletscher 2012-2015.*

<b>Bewegung quer zur Mittelmoräne</b>				
<b>Lage</b>	<b>Mittelwert</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Median</b>	<b>n</b>
<b>Nord</b>	0.498664965	1.409	0.398904891	10
<b>Süd</b>	1.671935434	1.626	1.31272287	15
<b>Mittel</b>	1.0853002	x	x	25
<b>Bewegung in Gletscherfliessrichtung</b>				
<b>Lage</b>	<b>Mittelwert</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Median</b>	<b>n</b>
<b>Nord</b>	-0.330030498	1.621	-0.185725142	10
<b>Süd</b>	2.511396962	2.618	1.612109414	15
<b>Mittel</b>	1.090683232	x	x	25

Die Auswertung der Lage der Blöcke, nördlich oder südlich der Mittelmoräne, zeigte, dass sich die Blöcke südlich der Moräne im Schnitt 2,5 m/Jahr schneller bewegten als der Gletscher, und nördlich davon 0,3 m/Jahr langsamer. Die Bewegung quer zur Mittelmoräne ergab nördlich der Moräne durchschnittlich 0,5 m/Jahr zur Moräne hin und südlich davon 1,7m/Jahr von der Moräne weg. Die Blöcke südseitig der Mittelmoräne machten also eine deutlich stärkere Abweichung zur Mittelmoräne in südlicher Richtung als jene nördlich der Mittelmoräne. Des Weiteren liess sich auch ein Trend in der Bewegung der Gletscherfliessrichtung erkennen. Auch hier war die Bewegung der Blöcke südlich der Mittelmoräne grösser als die nördlich davon. Ergo lässt sich daraus schliessen, dass Blöcke, die südseitig der Mittelmoräne lagen, eine grössere Abweichung zur Richtung der Mittelmoräne nach Süden vorwiesen sowie schneller als der Gletscher flossen.

Tabelle 6.6 Mittelwert und Standardabweichung des Untergrundes und der Blockbewegung der Luftbildanalyse am Oberaargletscher 2012-2015.

<b>Bewegung quer zur Mittelmoräne</b>				
<b>Untergrund</b>	<b>Mittelwert</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Median</b>	<b>n</b>
<b>Schutt</b>	0.210233204	0.599	0.080469102	5
<b>Eis</b>	1.450725757	1.71	1.323851279	20
<b>Mittelwert/Total</b>	0.830479481	x	x	25
<b>Bewegung in Gletscherfliessrichtung</b>				
<b>Untergrund</b>	<b>Mittelwert</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Median</b>	<b>n</b>
<b>Schutt</b>	-0.300200872	1.147	0.145446998	5
<b>Eis</b>	1.793582691	2.765	0.997641293	20
<b>Mittelwert/Total</b>	0.746690909	x	x	25

Die verschiedenen Untergründe der Blöcke, Schutt oder Eis, weisen komplett andere Eigenschaften auf. Wie in den theoretischen Grundlagen erwähnt, erwärmt sich ein Gesteinsblock mehr als das Eis und kann je nach Dicke und Dichte eine isolierende oder eine schmelzfördernde Wirkung haben. Die Blöcke, die auf dem Schutt der Mittelmoräne lagen, zeigten kaum eine Abweichung in ihrer Bewegung zur Mittelmoräne (Tabelle 6.6). Dies war zu erwarten, da sich auf Schuttbedeckung keine Gletschertische bilden, die eine Abweichung zur Gletscherfliessbewegung verursachen könnten. Die Blöcke auf dem Eis hingegen bewegten sich um 1,5 m/Jahr quer von der Mittelmoräne in südlicher Richtung weg und 1,8 m/Jahr schneller als der Gletscher fließt. Es muss weiter erwähnt werden, dass Ausreisser in dieser Kategorie darin zu erklären sind, dass die Mittelmoräne nicht überall gleich stark mit Schutt bedeckt war. Grundsätzlich lässt sich aber aus den Daten lesen, dass sich die Blöcke auf dem Eis stärker bewegten als die Blöcke auf dem Schutt, was sich mit der vorausgehenden Annahme deckt.

Es besteht kein statistischer Zusammenhang zwischen der Blockgrösse und der Blockbewegungen auf dem Oberaargletscher. Währendem zeigte sich hier, dass der Untergrund und die Lage der Blöcke zur Mittelmoräne einen Einfluss auf die Bewegung in die Gletscherfliessrichtung und auf die Abweichung quer zur Mittelmoräne in südlicher Richtung hatten. Die Bewegungen der Blöcke waren stärker, wenn diese auf Eis und südlich der Mittelmoräne lagen.

### 6.2.2. Persgletscher

Eine Auswertung der Luftbilder war nicht möglich, da keine Orthofotos im jährlichen Abstand erhältlich waren. Die Abstände von zwei, drei oder mehreren Jahren waren zu gross und verhinderten somit eine Verfolgung einzelner Blöcke.

### 6.2.3. Gornergletscher

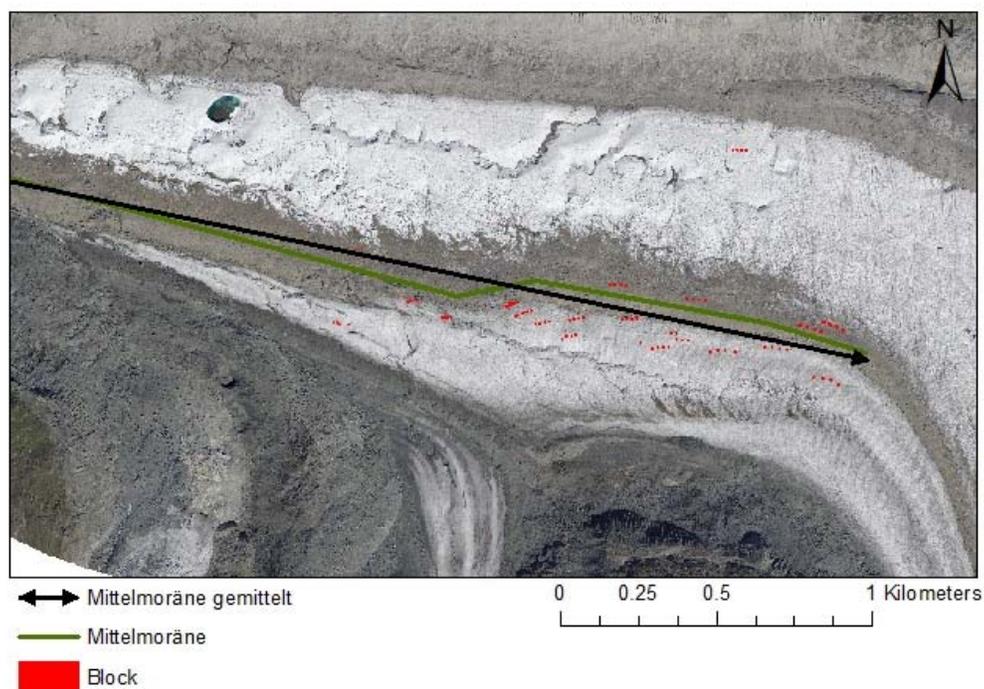


Abbildung 6.11 Kartenausschnitt bearbeitet aus dem Luftbild vom Gornergletscher 2014 (VAW).

Am Gornergletscher wurden 23 Blöcke über die Jahre 2012 - 2015 untersucht. Die Blöcke waren im Mittel 10,9 m gross mit einer Standardabweichung von 7m. Anhand der Luftbilder wurden Gletscherfliessgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet von 19 m/Jahr berechnet. Die beobachteten Blöcke bewegten sich in Fliessrichtung um 0,9 m/Jahr langsamer als der Gletscher. Die Bewegung quer zur Mittelmoräne betrug durchschnittlich 3,3 m/Jahr, bei einer Standardabweichung von 2 m/Jahr. Der Gornergletscher floss in  $281,76^\circ$  nach Westen, während die mittlere Richtung der Gletschertische  $267,21^\circ$  West betrug und somit eine Abweichung von  $14,55^\circ$  in südlicher Richtung aufwies.

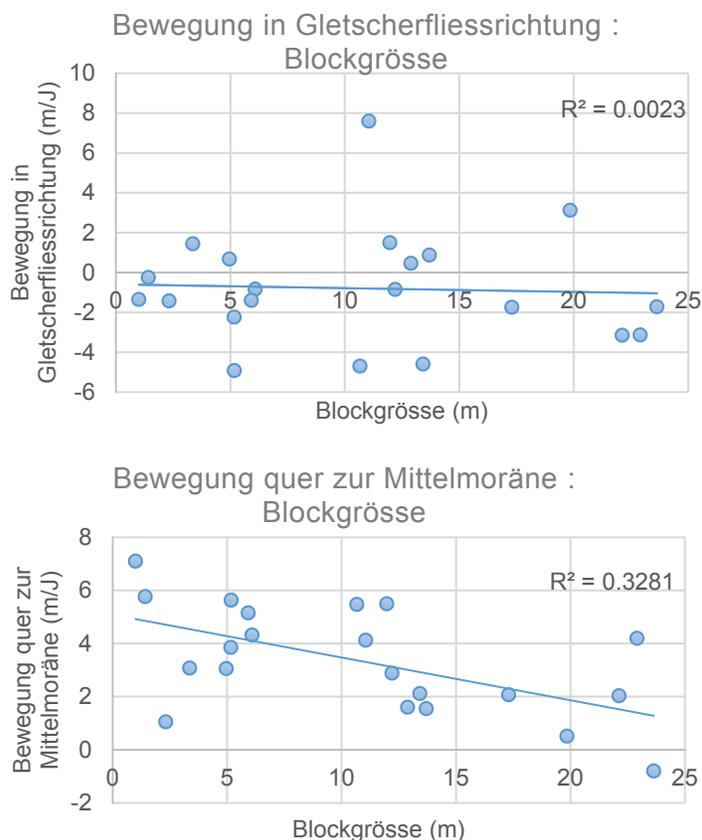


Abbildung 6.12 Vergleich der Blockgrösse mit der Blockbewegung der Luftbildanalyse am Gornergletscher 2012-2015.

Tabelle 6.7 Mittelwert und Standardabweichung der Blockgrösse und der Blockbewegung der Luftbildanalyse am Gornergletscher 2012-2015.

<b>Bewegung quer zur Mittelmoräne</b>				
Blockgrösse	Mittelwert	$\sigma$	Median	n
0 - 5m	4.004851817	2.40611	3.069971	5
5 - 10m	4.736995409	0.80252	4.733593	4
>10m	3.529498634	2.026	3.499057	12
<b>Mittelwert/Total</b>	4.09044862	x	x	21
<b>Bewegung in Gletscherfliessrichtung</b>				
Blockgrösse	Mittelwert	$\sigma$	Median	n
0-5m	-0.189138608	1.25664	-0.2553	5
5-10m	-2.356433986	1.80925	-1.82933	4
>10m	-0.896519875	3.72318	-1.30702	12
<b>Mittelwert/Total</b>	-1.147364157	x	x	21

Die Auswertung der Daten vom Gornergletscher zeigte keinen Zusammenhang der Blockgrösse und der Bewegung in Gletscherfliessrichtung. Die Bewegung der Blöcke in Gletscherfliessrichtung war bei allen Blockgrössen kleiner als der Gletscher fliesst. Es zeigte sich jedoch ein negativer Zusammenhang zwischen der Blockgrösse und der Bewegung des Blockes quer zur Mittelmoräne. Die grössten Blöcke auf dem Gornergletscher machten die kleinste Bewegung in südlicher Richtung (Mittelwert: 2,6 m/Jahr), nur ein Block bewegte sich leicht nördlich zur Mittelmoräne (-1m). Die grösste Bewegung quer zur Mittelmoräne erreichten die Blöcke mit einem Durchmesser von 5 – 10m. Diese Blöcke bewegten sich 4.7 m/Jahr quer zur Mittelmoräne in südlicher Abweichung. Es lässt sich schlussfolgernd ein statistischer Zusammenhang mit  $R^2=0,32$  feststellen, der nicht aussagekräftig ist (Abbildung 6.13). Trotzdem lässt sich aus den Daten lesen, dass die Distanzen der Blockbewegungen ab einer gewissen Grösse (>10m) wieder kleiner wurden.

*Tabelle 6.8 Mittelwert und Standardabweichung der Lage zur Mittelmoräne und der Blockbewegung der Luftbildanalyse am Gornergletscher 2012-2015.*

<b>Bewegung quer zur Mittelmoräne</b>				
<b>Lage zur Mittelmoräne</b>	<b>Mittelwert</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Median</b>	<b>n</b>
<b>Nord</b>	3.995470968	1.18621088	3.63017	6
<b>Süd</b>	3.079719251	2.260232887	2.112465	15
<b>Mittelwert/Total</b>	3.53759511	x	x	21
<b>Bewegung in Gletscherfliessrichtung</b>				
<b>Lage zur Mittelmoräne</b>	<b>Mittelwert</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Median</b>	<b>n</b>
<b>Nord</b>	-1.371076861	2.370121772	-1.13366	6
<b>Süd</b>	-0.571080056	3.102471216	-1.36158	15
<b>Mittelwert/Total</b>	-0.971078458	x	x	21

Die Lage der Blöcke zur Mittelmoräne zeigte nur einen leichten Einfluss auf die Blockbewegung. Die Blöcke nördlich der Mittelmoräne bewegten sich durchschnittlich 1,4 m/Jahr langsamer als der Gletscher floss, die Blöcke südlich der Mittelmoräne bewegten sich 0,6m/Jahr langsamer als die vermutete Gletscherfliessgeschwindigkeit. Der Einfluss der Lage zur Mittelmoräne auf die Bewegung quer zur Mittelmoräne zeigte sich deutlich. Die Blöcke nördlich der Mittelmoräne bewegten sich im Mittel 4m/Jahr quer zur Mittelmoräne in südlicher Abweichung. In dieselbe Richtung bewegten sich die Blöcke südlich der Mittelmoräne im Mittel 3,1 m/Jahr. Es zeigt sich

wieder, dass mehr untersuchte Blöcke südlich der Moräne zu finden waren und somit auch das Ergebnis beeinflussten.

*Tabelle 6.9 Mittelwert und Standardabweichung des Untergrundes und der Blockbewegung der Luftbildanalyse am Gornergletscher 2012-2015.*

<b>Bewegung quer zur Mittelmoräne</b>				
<b>Untergrund</b>	Mittelwert	$\sigma$	Median	n
<b>Schutt</b>	4.265066817	1.805955407	4.19037	9
<b>Eis</b>	2.648584436	1.968397144	2.089327	12
<b>Mittelwert/Total</b>	3.456825626	x	x	21
<b>Bewegung in Gletscherfliessrichtung</b>				
<b>Untergrund</b>	Blockgesch.keit	$\sigma$	Median	n
<b>Schutt</b>	-1.468682515	1.907176768	-1.40812	9
<b>Eis</b>	-0.297876614	3.430299001	-0.54753	12
<b>Mittelwert/Total</b>	-0.883279564	x	x	21

Die Grundbewegung der Blöcke auf dem Gletschereis war langsamer (-0,3m/Jahr) als die gemessene Fliessgeschwindigkeit des Gletschers. Auch die Blöcke auf dem Schutt als Untergrund bewegten sich langsamer als der Gletscher. Die Blöcke waren im Mittel 1,5 m/Jahr langsamer als der Gletscher. Die Bewegung quer zur Mittelmoräne war mit 4,3 m/Jahr aussergewöhnlich hoch für die Blöcke mit Schutt als Untergrund. Die Bewegung der Blöcke, die auf dem Eis und quer zur Mittelmoräne in südlicher Abweichung lagen, betrug 2,6 m/Jahr.

Der Gornergletscher verhielt sich anders als erwartet. Die Blöcke mit Schutt als Untergrund machten grössere Bewegungen als die Blöcke auf dem Gletschereis. Des Weiteren bewegten sich die Blöcke im Schnitt langsamer als der Gletscher floss. Besonders langsam bewegten sich Blöcke mit einem Durchmesser von 5-10m. Hier besteht also ein Widerspruch zu der Vermutung, dass die Mittelmoräne ein guter Referenzwert für das Gletscherfliessen ist.

#### 6.2.4. Unteraargletscher

Die untersuchten Blöcke auf dem Unteraargletscher wiesen eine durchschnittliche Grösse von 16,3m auf, bei einer Standardabweichung von 11,2m. Es wurden 25 Blöcke über vier Jahre von 2012 - 2015 untersucht. Der Unteraargletscher bewegte sich im Untersuchungsgebiet mit 41,6° nach Nordosten. Die mittlere Bewegungsrichtung der Blöcke betrug 44,2° und ist somit leicht nach Süden abgelenkt. Der Unteraargletscher floss auf dem untersuchten Gebiet nach

Messungen der Mittelmoränenbewegung anhand der Luftbilder 18,9 m/Jahr. Die Blöcke bewegten sich auf dem Gletscher in Fließrichtung um 1,8 m/Jahr schneller, mit einer mittleren Geschwindigkeit von 20,7 m/Jahr. Die vermutete Ablenkung der Gletschertische quer zur Richtung der Mittelmoräne ergab durchschnittlich 1,8 m/Jahr bei einer Standardabweichung von 2,2 m/Jahr.

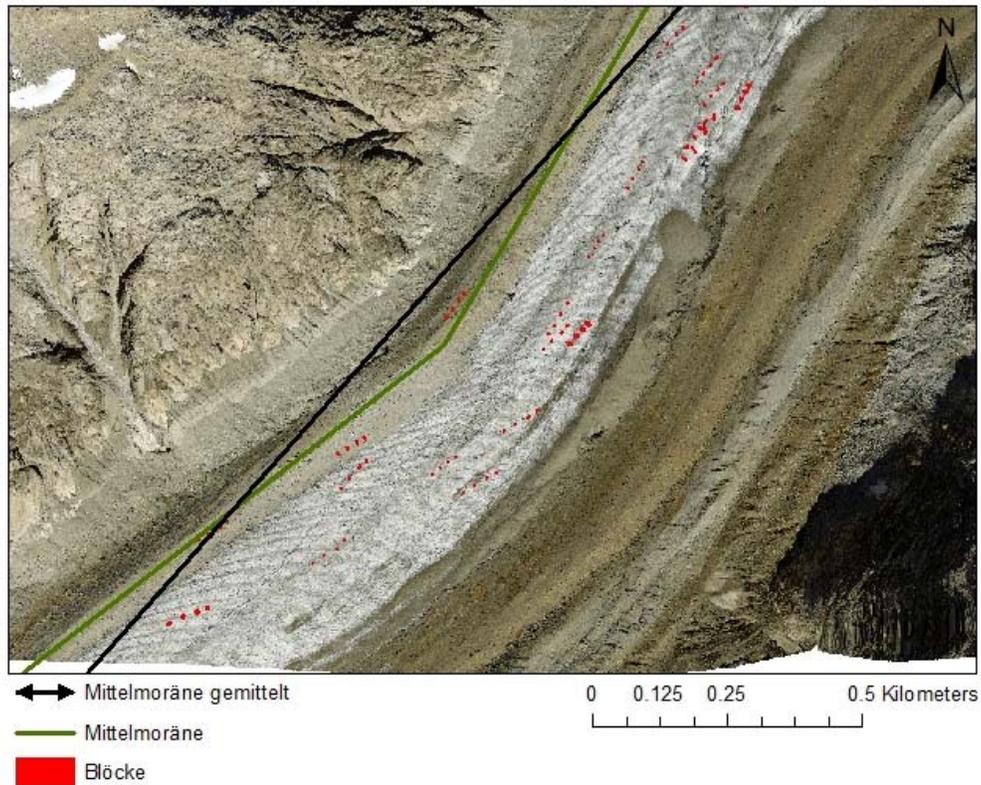


Abbildung 6.13 Kartenausschnitt bearbeitet aus dem Luftbild vom Unteraargletscher 2015 (VAW).

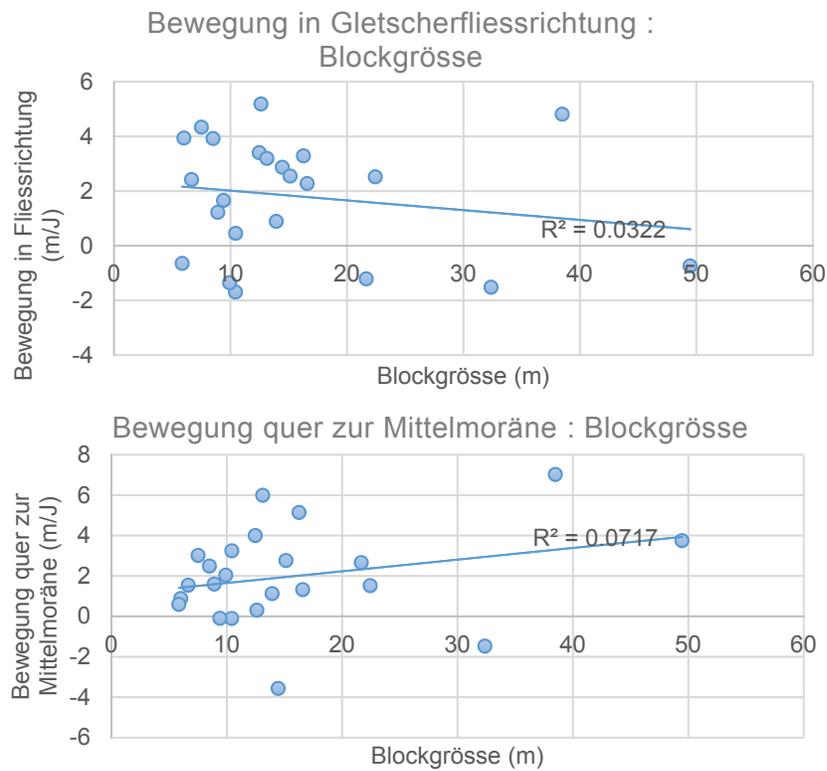


Abbildung 6.14 Vergleich der Blockgrösse und der Blockbewegung der Luftbildanalyse am Unteraargletscher 2012-2015.

Tabelle 6.10 Mittelwert und Standardabweichung der Blockgrösse und der Blockbewegung der Luftbildanalyse am Unteraargletscher 2012-2015.

<b>Bewegung quer zur Mittelmoräne</b>				
<b>Blockgrösse</b>	<b>Mittelwert</b>	$\sigma$	<b>Median</b>	<b>n</b>
<b>0 - 5m</b>	x	x	x	x
<b>5 - 10m</b>	1.500002714	1.10442	1.596078	7
<b>&gt;10m</b>	1.976365307	2.72361	2.086862	14
<b>Mittelwert/Total</b>	1.73818401	x	x	21
<b>Bewegung in Gletscherfliessrichtung</b>				
<b>Blockgrösse</b>	<b>Mittelwert</b>	$\sigma$	<b>Median</b>	<b>n</b>
<b>0-5m</b>	x	x	x	x
<b>5-10m</b>	1.860194619	2.29887	1.65048	7
<b>&gt;10m</b>	1.642626267	2.2993	2.388794	14
<b>Mittelwert/Total</b>	1.751410443	x	x	21

Die Blöcke bewegten sich im jährlichen Durchschnitt quer zur Mittelmoräne um 1,5 m/Jahr bei einer Blockgrösse von 5 – 10m und um 2 m/Jahr bei Blöcken, die grösser als 10m waren. Unabhängig von der Blockgrösse bewegten sich alle Blöcke in einer ähnlichen Geschwindigkeit in Gletscherfliessrichtung. Die Blöcke mit 5 – 10m Durchmesser bewegten sich 1,9 m/Jahr und die Blöcke >10m 1,6 m/Jahr schneller als die Gletscherfliessgeschwindigkeit. Nur ein Ausreisser (Blockgrösse:39m) erreichte eine auffällige Bewegung quer zur Mittelmoräne (7m/Jahr) und in Gletscherfliessrichtung (5m/Jahr).

*Tabelle 6.11 Mittelwert und Standardabweichung der Lage zur Mittelmoräne und der Blockbewegung der Luftbildanalyse am Unteraargletscher 2012-2015.*

<b>Bewegung quer zur Mittelmoräne</b>				
<b>Lage zur Mittelmoräne</b>	<b>Mittelwert</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Median</b>	<b>n</b>
<b>Nord</b>	1.124443856	x	1.124444	1
<b>Süd</b>	1.852234472	2.34304836	1.818206	20
<b>Mittelwert/Total</b>	1.488339164	x	x	21
<b>Bewegung in Gletscherfliessrichtung</b>				
<b>Lage zu Mittelmoräne</b>	<b>Mittelwert</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>Median</b>	<b>n</b>
<b>Nord</b>	0.885072559	x	x	1
<b>Süd</b>	1.756652876	2.293404286	2.388794	20
<b>Mittelwert/Total</b>	1.320862717	x	x	21

Aufgrund der Lage der Mittelmoräne auf dem Gletscher gab es nur einen Block, der auf der Nordseite der Moräne erfasst wurde. Die Bewegung quer zur Mittelmoräne unterschied sich nur schwach zwischen den Blöcken südseitig der Moräne und dem Block nördlich davon. Es wurde eine Abweichung südlich quer zur Mittelmoräne durchschnittlich von 1,9m/Jahr erreicht. Beim Block nördlich ergab dieser Wert 1,1m/Jahr. Die Bewegung in Gletscherfliessrichtung war nördlich der Moräne um 0,9m/Jahr schneller als die Gletscherfliessgeschwindigkeit, südlich davon 1,8m/Jahr schneller.

Tabelle 6.12 Mittelwert und Standardabweichung des Untergrundes und der Blockbewegung der Luftbildanalyse am Unteraargletscher 2012-2015.

<b>Bewegung quer zur Mittelmoräne</b>				
<b>Untergrund</b>	Mittelwert	$\sigma$	Median	n
<b>Schutt</b>	1.792456373	0.78485	1.596078	3
<b>Eis</b>	1.821764676	2.46836	1.778605	18
<b>Mittelwert/Total</b>	1.807110525	x	x	21
<b>Bewegung in Gletscherfliessrichtung</b>				
<b>Untergrund</b>	Mittelwert	$\sigma$	Median	n
<b>Schutt</b>	0.295024186	1.31631	0.885073	3
<b>Eis</b>	1.951836529	2.30261	2.526701	18
<b>Mittelwert/Total</b>	1.123430357	x	x	21

Von den 25 untersuchten Blöcken lagen nur drei auf der Moräne. Die Blöcke auf dem Eis bewegten sich um 1,8m/Jahr quer zur Mittelmoräne südlich davon weg, genauso wie die beobachteten Blöcke auf dem Schutt. In Gletscherfliessrichtung bewegten sich die Blöcke auf dem Eis um 2m/Jahr schneller. Die Blöcke auf dem Schutt zeigen wie erwartet nur eine kleine Abweichung zur Fliessgeschwindigkeit des Gletschers von 0,3m/Jahr. Im Durchschnitt bewegten sich alle Blöcke schneller in Gletscherfliessrichtung fort, als der Gletscher fliesst.

Alle Werte bestätigen, dass die Blöcke eine Ablenkung quer zur Mittelmoräne in südöstlicher Richtung erfuhren. Es lassen sich aus den Vergleichen keine Korrelation zwischen Blockgrösse, Lage, Untergrund zu der Bewegungsrichtung oder Distanz herstellen.

### 6.3. Schmelzmodell

Die folgenden Diagramme zeigen einen Vergleich zwischen den zwei verwendeten Schmelzmodellen (PDD, PDDSW) sowie den realen Messungen der Ablationsstangen. Entsprechend den modifizierten Werten, wie den räumlich extrapolierten Temperaturen, der Albedo, dem PDDMF, der SWRF oder dem PDDMF\_SW gleichen sich die Werte an oder distanzieren sich von den gemessenen Werte.

Da die Messstationen Passo del Bernina und Grimsel Hospiz eine räumliche Distanz zu den Untersuchungsgebieten aufweisen, muss die Temperatur der Stationen auf die Höhe der Untersuchungsstandorte angepasst werden. Die Berechnungen sehen folgendermassen aus:

Die Messstation Grimsel Hospiz liegt auf 1980m ü.M. 430m tiefer als der Untersuchungsstandort Oberaargletscher OA1 auf 2410m ü.M. Bei einer Temperaturdifferenz von  $-0,6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  ergibt das auf die Messwerte der Station  $-2,58^{\circ}\text{C}$ . Der Standort OA3 liegt auf 2470 m ü.M. und ist damit um  $2,94^{\circ}\text{C}$  kälter als die Messstation am Grimsel Hospiz. Die Messstation befindet sich in 10km Luftdistanz vom Untersuchungsstandort.

Die Passo del Bernina: befindet sich auf 2260m ü.M., während die Ablationsstangen am Persgletscher auf 2420m ü.M. eingebohrt wurden. Dies ergibt eine Differenz der Temperaturen von  $-0,96^{\circ}\text{C}$ . Die Messstation liegt in 5,5km Distanz Luftlinie von dem Untersuchungsstandort entfernt.

In der Tabelle 6.13. sind die Informationen der Schmelzmessungen zusammengetragen. Die kürzeste Messung wurde am Persgletscher mit 29 Tagen durchgeführt. Die Messung wurde nicht zur Beginn der Schmelzsaison begonnen, darum ist die kumulative Schmelze am geringsten. Trotz sieben Tage längerer Messperiode war die kumulative Schmelze am Oberaargletscher im Jahr 2016 kleiner als im 2017. In der ersten Feldsaison 2016 wurde eine kumulative Schmelze von 166,25cm erreicht, in der folgenden Saison 265,75cm. Der Vergleich der kumulativen Schmelze zeigte keine direkte Abhängigkeit zwischen der gemessenen Schmelze im Feld und den darauf kalibrierten Temperaturen. Die kumulative Schmelze bei Block OA1 war um 3,5cm tiefer, als bei Block OA3. Die Schmelzmodelle zeigten jedoch aufgrund höherer Temperaturen bei OA1 grössere Schmelzwerte.

Tabelle 6.13 Gemessene Schmelze der Pilotstudie 2016 am Persgletscher und am Oberaargletscher und der Feldstudie 2017 am Oberaargletscher. Die Daten der Temperatur und der Solarstrahlung wurden über die jeweilige Messperiode gemittelt und stammt von MeteoSchweiz.

	Lage der Blöcke	Datum des Messzeitraums	Dauer Messung (Tage)	Kumulative Schmelze (cm)	Mittlere Temp. (°C)	Mittlere Solar Strahlung (W/m <sup>2</sup> )
<b>PE 2016</b>	2700m ü.M.	23.8.-20.9.16	29	114.2	8,84	206,03
<b>OA 2016</b>	2410m ü.M.	16.8.-7.10.16	53	166,3	6,64	182,15
<b>OA1 2017</b>	2410m ü.M.	2.7.-16.8.2017	46	269	8,35	207,28
<b>OA3 2017</b>	2470m ü.M.	2.7.-16.8.2017	46	272,5	10,9	207,28

### 6.3.1. Persgletscher

Da die Blöcke PE1 und PE2 am Persgletscher räumlich naheliegen und in ihrer Höhenlage keine Differenz aufweisen, konnte hier kein Vergleich der Gradtag Modelle stattfinden. Die optimalen Werte der Kalibrierung werden in Tabelle 6.14 gezeigt. Der Schmelzfaktor (PDDMF) musste um 0,5cm/C/d angepasst werden. Die Albedo ist im optimalen Fall der Kalibrierung auf 0,4 gesetzt. Dieser Wert könnte für alten, schuttbedeckten und nassen Schnee oder für klares Eis sprechen (Kapitel 2.5).

Tabelle 6.14 Kalibrierte Werte für die kumulativen Schmelzwerte am Persgletscher 2016.

Parameter	Persgletscher 2016	
PDDMF	<b>0,45</b>	(cm/C/d)
alpha	<b>0,4</b>	Albedo [0-1]
PDDMF_SW	<b>0,12</b>	(cm/C/d)
SWRF	<b>0,023</b>	(cm/(W/m2))

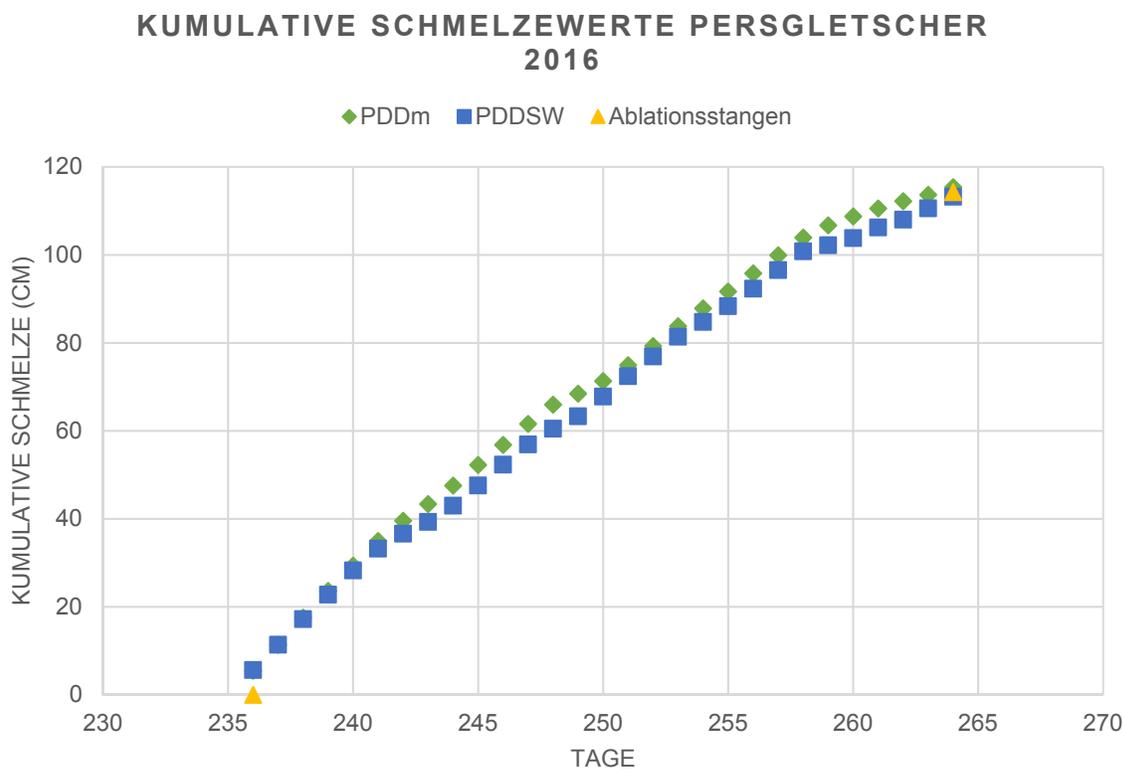


Abbildung 6.15 Kumulative Schmelzwerte am Persgletscher 2016.

### 6.3.2. Oberaargletscher

In der Feldsaison vom 16.8. - 7.10.2016 (53Tage) wurde am Oberaargletscher eine durchschnittliche Schmelze von 166,25cm gemessen. Mit den Parametern aus Tabelle 6.4. wurde im PDD\_SW Modell die gleiche Schmelze erreicht, wie die Messungen 2016 zeigen. Das vereinfachte Modell PDD zeigte eine Schmelze von 156,92cm. Die Albedo wurde dafür auf 0,44 erhöht, was gemäss Tabelle 5.1. einer alten trockenen oder nassen Eisschicht mit Schuttbedeckung am ehesten entspricht (Cuffey und Paterson 2010).

Tabelle 6.15 Kalibrierte Werte für die kumulativen Schmelzwerte am Oberaargletscher 2016.

Parameter	Oberaargletscher 2016	
PDDMF	<b>0,49</b>	(cm/C/d)
alpha	<b>0,44</b>	Albedo [0-1]
PDDMF_SW	<b>0,12</b>	(cm/C/d)
SWRF	<b>0,023</b>	(cm/(W/m <sup>2</sup> ))

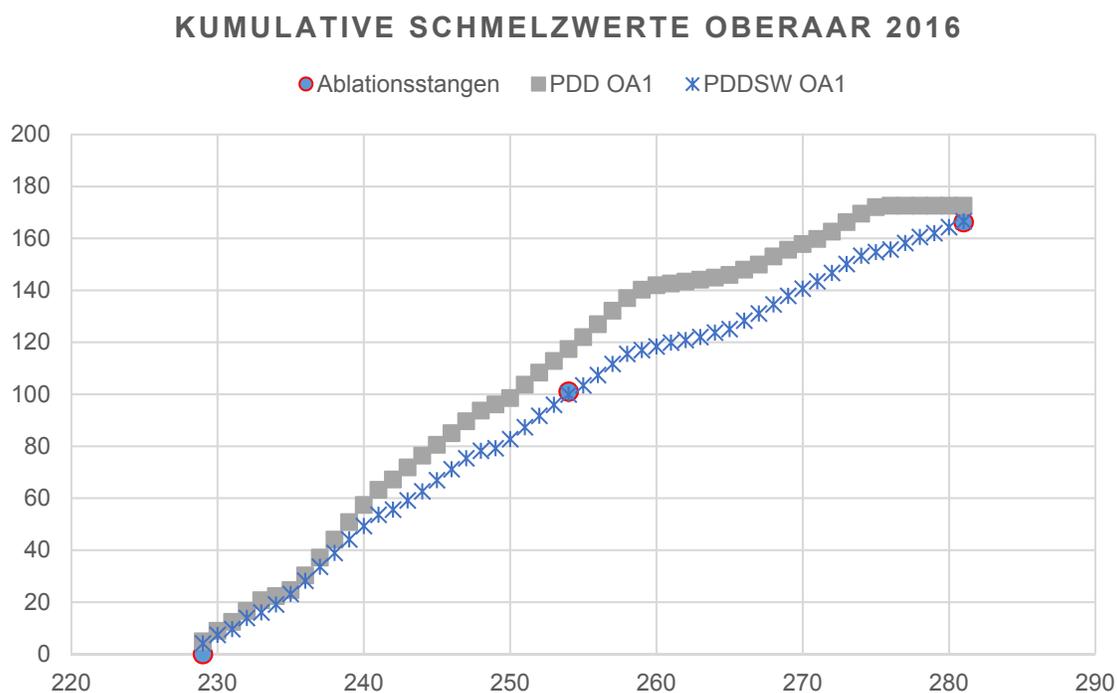


Abbildung 6.16 Kumulative Schmelzwerte Oberaargletscher 2016.

In der Feldsaison 2017 weisten die berechneten Modelle einen grossen Unterschied zu dem gemessenen Werten auf. Durch starkes Anpassen der Parameter gelang es die gemessenen Werte mit den modellierten Werten zu eichen. Die Albedo wurde auf 0,2 vermindert, was nach Cuffey und Paterson (2010) in die Klasse von schuttreicher Eisoberfläche gehört. Der Schmelzfaktor (PDDMF) wurde von 0,5 auf 0,74 erhöht. Die Bedingungen auf dem Gletscher scheinen folglich die Schmelze zu begünstigen.

Die Ablationsstangen am OA1 erreichten während der Schmelzperiode von 2017 eine kumulative Schmelze von 269cm. Die Werte von OA3 waren mit 272,5cm um wenige Zentimeter höher. Das PDD Modell erreichte eine Differenz von OA1 zu OA3 von 12cm Schmelze während der Schmelzperiode. Der Unterschied vom PDDSW Modell OA1 zum PDDSW Modell OA3 betrug in der Schmelzperiode 4cm Schmelze.

Tabelle 6.16 Kalibrierte Werte für die kumulative Schmelzwerte am Oberaargletscher 2017

Parameter	Oberaargletscher 2017	
PDDMF	<b>0,74</b>	(cm/C/d)
alpha	<b>0,2</b>	Albedo [0-1]
PDDMF_SW	<b>0,28</b>	(cm/C/d)
SWRF	<b>0,023</b>	(cm/(W/m2))

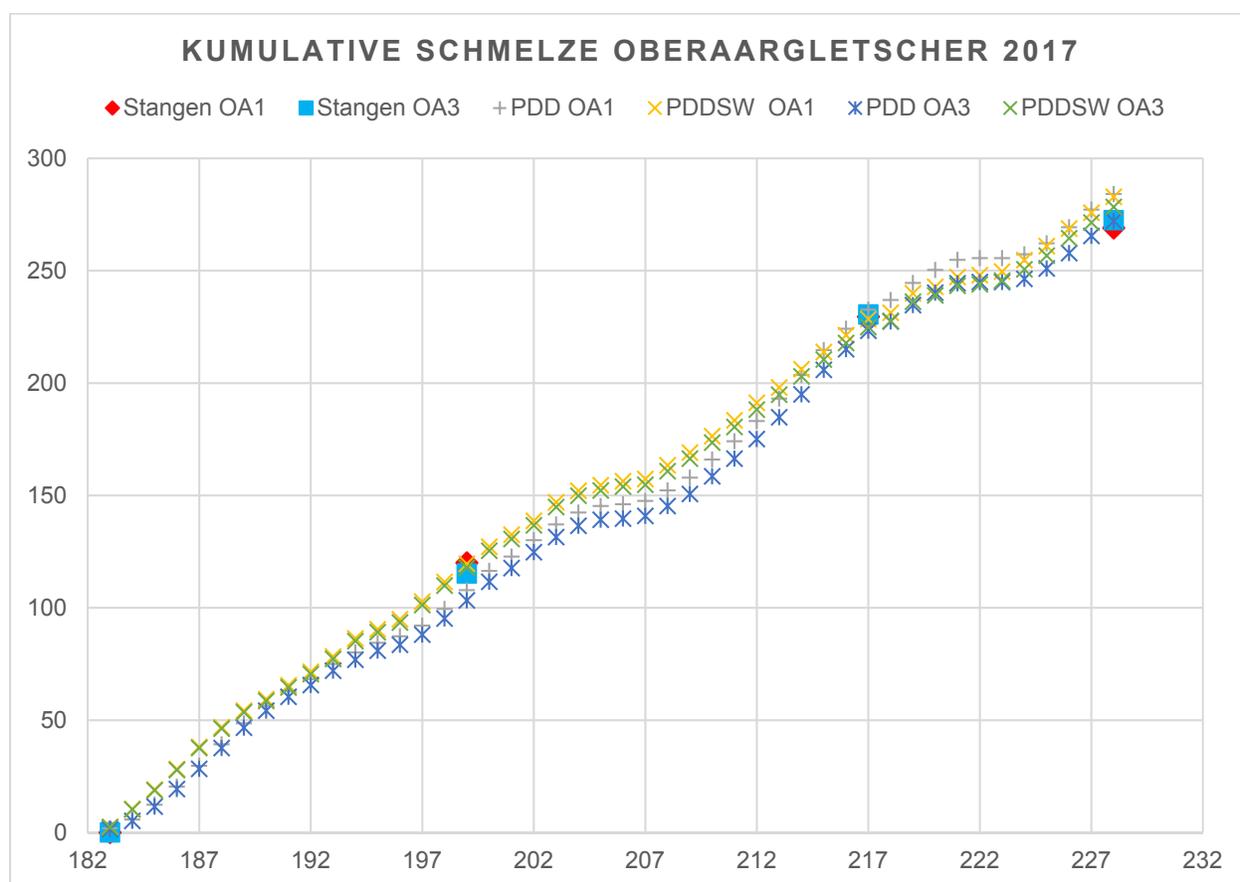


Abbildung 6.17 Kumulative Schmelzwerte Oberaargletscher 2017.

### 6.3.3. Zusammenhang Schmelze – Blockbewegung

Bei den Blöcken OA2 und OA3 liessen sich mehrere Zyklen eines Gletschertischaufbaus (OA2 = 3 Zyklen, OA3 = 2 Zyklen) feststellen. Diese Blöcke erreichten mit 508cm und 174cm auch die grössten direkten Distanzen von der Nordstange zum Block. Die Blöcke der Messperiode von 2016 zeigten mit einer Schmelze von 114,25cm auf dem Persgletscher und 166,25cm auf dem Oberaargletscher kleinere Distanzen der Blockbewegung. Diese beliefen sich auf 33cm und 50cm am Persgletscher und 58cm am Oberaargletscher (Tabelle 6.17).

*Tabelle 6.17 Vergleich der kumulativen Schmelze mit der zurückgelegten Distanz im Vergleich zu den Ablationsstangen und der Anzahl beobachteter Zyklen.*

<b>Feldstandort</b>	<b>Messperiode</b>	<b>Distanz Block in Messperiode</b>	<b>Anzahl Zyklen in Messperiode</b>	<b>Max. Sockelhöhe gemessen</b>	<b>Kumulative Schmelze in Schmelzperiode</b>
<b>Persgletscher 2016</b>	23.8.-20.9.16	33cm / 50cm	1	93cm / 60cm	114,25cm,
<b>Oberaargletscher 2016</b>	16.8.-7.10.17	58cm	1	100cm	166,25cm
<b>Oberaargletscher 2017</b>	2.7.-16.8.17	82cm / 508cm / 174cm	1 / 3 / 2	112cm / 81cm / 88cm	265,75cm



## 7. Diskussion

In folgendem Abschnitt werden die Resultate aus den drei angewendeten Methoden interpretiert. Die Fragestellungen dieser Arbeit dienen dabei als Leitfaden.

### 7.1. Feldstudie

Die Resultate der Feldstudie helfen dabei, die Prozesse besser zu verstehen. Es ergibt sich aus den Fotoabfolgen folgendes Schema: Abbildung 7.1. zeigt einen Zyklus, wie er im Idealfall abläuft. Der Block steht auf dem Sockel und rutscht infolge Gravitationsprozesse in Richtung der maximalen Sonnenstrahlung (als Pfeil dargestellt) ab. Zum Zeitpunkt 2 steht der Block schon leicht schräg, weshalb er in Phase 3 durch die Schwerkraft abgerutscht ist. In Zeitpunkt 3 erkennt man hinter dem Block den Resten des Sockels. Je nach Mächtigkeit des Sockels sowie Fläche und Rutschung des Blockes bleibt dieser mehr oder weniger lang erhalten. In Zeitpunkt 4 ist der Stand des Gletschers weiter gesunken und der Block kann einen neuen Sockel bilden. Dieses Schema zeigt eine Vereinfachung dieses Prozesses und dient der Erklärung.

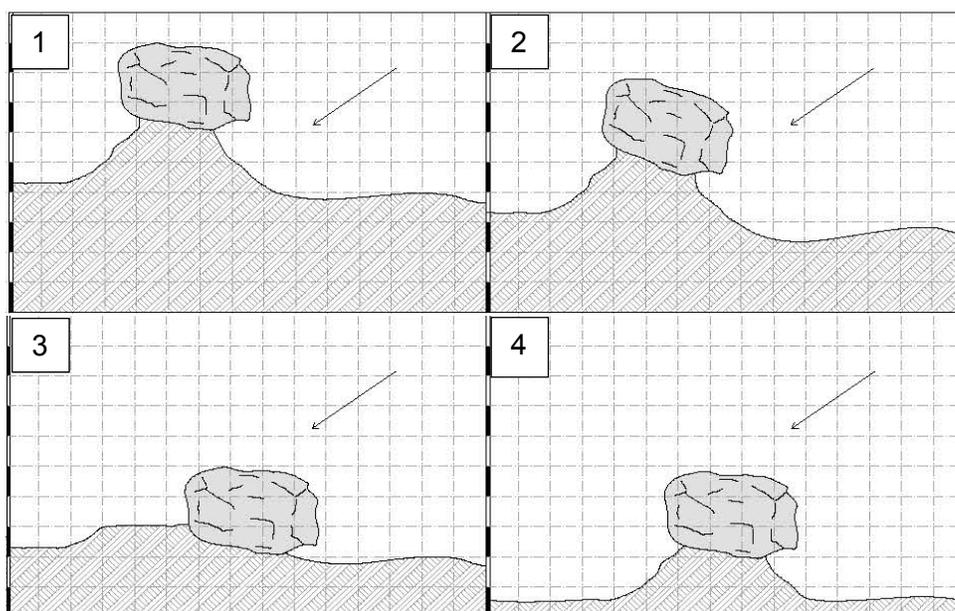


Abbildung 7.1 Schema eines Gletschertischzyklus. Der Gletschertisch steht auf einem Sockel bis die Strahlung (als Pfeil dargestellt) den Sockel abschmilzt und der Block in diese Richtung abrutscht. Der Sockel baut sich vollständig ab, da er von der Strahlung nicht mehr geschützt ist. Die letzte Darstellung zeigt den erneuten Aufbau eines Sockels. Bildabfolge von oben links nach unten rechts (eigene Darstellung).

Die Feldstudie hat bei allen fünf untersuchten Blöcken gezeigt, dass die Blöcke zur gletscherabhängigen Fliessbewegung eine Abweichung aufweisen. Wie in der Fragestellung vermutet, bedeutet diese Bewegung eine südliche Abweichung zur Gletscherfliessrichtung. Aufgrund dieser Untersuchung lässt sich eine starke Tendenz einer Bewegung der Blöcke nach Südosten aufzeigen, während am Persgletscher der erste Block direkt nach Süden rutschte, der andere hingegen nach Westen kippte. Die Bewegung der Blöcke im Feld, zusätzlich zum Gletscherfliessen, betrug im Mittel 152cm mit einer Abweichung zur Gletscherfliessrichtung nach Südwesten bis Osten.

### **Strahlung**

Die mehrheitlich östliche Abweichung der Blockbewegung könnte mit der Sonnenstrahlung zusammenhängen. So hängt die Sonnenstrahlung vom Sonnenstand, der Bewölkung und der Bodenbedo ab. Eine dünnere Atmosphäre in höhergelegenen Regionen verstärkt die Strahlung zusätzlich. Da die Wolken die Intensität der kurzwelligen Einstrahlung reduzieren, aber gleichzeitig die langwellige Strahlung erhöhen, kann die Temperatur bei Bewölkung hoch bleiben ([www.meteoschweiz.admin.ch](http://www.meteoschweiz.admin.ch), 18.08.2017). Es findet also bei Bewölkung und bei positiver Lufttemperatur unabhängig der Sonneneinstrahlung eine Schmelze statt. Eine räumlich ungleichmässige Schmelze kann aber nur durch kurzwellige Strahlung, also direkte Sonneneinstrahlung, erreicht werden.

Die Bewölkung verdichtet sich in den Alpen für gewöhnlich am Nachmittag. Aus diesem Grund ist die kurzwellige Strahlung am Vormittag stärker. Am grössten ist die Strahlung in den Monaten Juni und Juli ([www.meteoschweiz.admin.ch](http://www.meteoschweiz.admin.ch), 18.08.2017). Folglich zeigt die Solarstrahlung von Osten den stärksten Einfluss. Dies führt zu mehr Ablation an der Seite des Sockels, was einen Ostrutsch der Blöcke erklären würde.

Auf den 3D Modellen sind die Schatten der Blöcke zu erkennen. Da die Fotoaufnahmen immer um die Mittagszeit entstanden, lässt sich sehr gut erkennen, welcher Teil der Sockel zur Zeit der maximalen Strahlung geschützt ist. Der Schatten zeigt in den Fotoaufnahmen nach Nordwesten. Es lässt sich feststellen, dass der Bereich des Sockels, der im Schatten liegt, auch an den folgenden Messtagen noch leicht erhöht als Sockelrelikt zu erkennen ist, weil die Ablation dort durch die Abschattung vermindert ist.

## Physische Eigenschaften

Wie in der Einleitung erwähnt, gehen alle gängigen Definitionen von Gletschertischen mit grösseren und flachen Steinen aus (Florin und Bauder 2005). Die Feldstudie zeigt ein identisches Ergebnis. Die Blöcke am Oberaargletscher sind eher als Platten einzuordnen, während der Block PE2 eine stark zylindrische Form aufweist. Dieser Block ist nicht vom Sockel gerutscht, sondern hat eine starke Kippbewegung vollzogen. Eine theoretische Überlegung hierzu ist, dass ein flacher Stein eine grössere Fläche abdecken kann. Unter einem grossen, aber runden Gesteinsblock, vermag die Strahlung bereits bei einem steileren Einfallswinkel darunter zu scheitern. Einem flachen Stein ist es also möglich, die Fläche des Sockels bis an den Rand vor Strahlung zu schützen. Der Sockel wird dadurch einer verminderten Strahlung ausgesetzt.

Am Beispiel des Blockes PE2 sieht man klar, dass Blöcke mit einer runderen Form (zylindrisch) eher rotieren, während flache Gletschertische wie der OA3 gar nicht und PE1 nur in geringem Ausmass ihre Ausrichtung verändern. Die stärkere Rotation von PE2 und die schwächere von PE1 ist im Gegenuhrzeigersinn, als Luftbild betrachtet. Die Rotation von PE2 kann mit der starken Kippung als einer Rutschung im Zusammenhang stehen. Während Platten eher rutschen, könnte es sein, dass der Zylinder in der Rutschung eine Unebenheit erfuhr und dadurch seitlich abkippte.

Der Block OA1 bewegt sich in die Hauptrichtung Osten. Auch der grosse Nachbarsblock, welcher auf den Fotoaufnahmen ersichtlich ist, rutschte während der Feldsaison 2017 nach Osten ab. Den Monat Juli hindurch bleibt der Block eher südlich geneigt, während bei der letzten Messung im Feld der Block komplett nördlich des Sockels abrutschte. Dieses Resultat könnte wiederum vom vorher beschriebenen Strahlungsmaximum und dem Sonnenstand abhängen oder von der eher zylindrischen Form, wie PE2.

Die Zusatzstudie nördlich der Mittelmoräne am Oberaargletscher zeigte in ihren Resultaten, dass Blöcke, die kleiner als 10x20cm sind, ganz flach auf dem Eis oder sogar eingeschmolzen sind. Diese Blöcke absorbieren zu viel Strahlung, wärmen zu stark auf und schmelzen so das Eis um sie herum (Benn und Evans 2015; Mattson 1993). Die runden Blöcke in der Versuchsfläche waren alle grösser als 25x25cm, wobei der kleinste davon keinen Sockel bildete. Die grösseren Blöcke (ab 40x40cm) bilden wahrscheinlich einen Sockel, da die Grundfläche über eine ausreichende Grösse verfügt. Platten können aber schon früher einen Sockel bilden. Die Höhe des Sockels und somit die Bildung eines Gletschertisches ist mindestens ein Ergebnis aus Blockgrösse und Form.

Die grossen Blöcke am Oberaargletscher, welche mehr als 350x350cm an Grösse vorwiesen, bildeten bei einer Stichproben Messung zwischen OA2 und OA3 Sockel von knapp 2m. Diese Sockelhöhen wurden bei den kleineren Gletschertischen nicht gemessen. Bei den vermessenen und beobachteten Blöcken am Oberaargletscher trifft es zu, dass ganz kleine Blöcke bis 10x20cm einschmelzen und mit steigender Grösse höhere Sockel ausbilden.

Die Literatur deckt sich mit den Daten der Feldanalyse: Blöcke müssen über eine gewisse Grösse verfügen und genügend flach sein, damit sich ein Gletschertisch bilden kann.

### Topografie, kleinräumige Phänomene

Die Topografie auf Gletschern weist bezüglich ihrer Dynamik und Kleinräumlichkeit deutliche Unterschiede auf. Die langfristig untersuchten Blöcke befinden sich südlich der Moränen und das Gelände war abgesehen von OA2 bei allen Blöcken leicht nach Süden geneigt. Der Feldversuch *kleine Blöcke* wurde nördlich der Mittelmoräne durchgeführt, wo das Eis nach Norden geneigt ist. Trotz der Lage, abgewandt zur einfallenden Strahlung, bildeten die untersuchten Steine Sockel oder Podeste, ähnlich einer Treppe von Norden nach Süden zur Mittelmoräne hoch. Dieser Theorie nach müssten auch grössere Blöcke, welche ausgebildete Gletschertische bilden, nach Südosten abrutschen. In der Abbildung 7.2 vom Oberaargletscher ist dies zu erkennen.



Abbildung 7.2 Block nördlich der Mittelmoräne am Oberaargletscher mit Blick in Richtung Westen. Der Untergrund ist nach Norden abfallend. Der Block, südlich geneigt, schützt durch den Schatten den Sockel vor der Strahlung der Mittagssonne (Eigene Fotoaufnahme, 05.08.2017).

Gletscherphänomene wie supraglaziale Schmelzwasserkanäle, Abflussrinnen, Mühlen oder die Unebenheiten der Ausaperung können kleinräumig das Verhalten und die Bewegungsrichtung der Gletschertische verändern.

### **Zeitliche Aspekte**

Mit abnehmender Strahlung werden gegen Ende der Schmelzsaison aufgrund kleinerer Schmelzraten die Sockel langsamer ausgebildet. Daten von Meteoschweiz zeigen, dass in den Jahren 2016 und 2017 das Maximum der Strahlung im Juli erreicht wurde, danach nahm die Strahlung mit fortschreitendem Datum ab.

Der zweite Block OA2 weiter westlich den Gletscher hoch bewegte sich stark südöstlich aus dem Netz der Stangen hinaus. Klar zu erkennen sind die erhöhten Sockel von einem früheren Zyklus, die meist heller als das umliegende Eis erscheinen. Aufgrund der Ablation sind die ehemaligen Sockel meist schon ein wenig abgeflacht, die Kanten sind nicht mehr klar zu erkennen. Bis Ende der Messungen im August 2017 hat der Block zwei Gletschertisch-Zyklen durchlaufen und nochmals leicht begonnen einen Sockel zu bilden. Da die Schmelzsaison weiter anhält, könnte sich noch ein dritter Tisch bilden.

Den genauen zeitlichen Ablauf zu bestimmen, ist durch die Momentaufnahmen nicht möglich. Eine kontinuierliche Überwachung mit TimeLapse Kameras könnte detailliertere Aufschlüsse über die Dauer eines Zyklus geben. Mit der Methode von Feldbesuchen in einem Intervall von zwei Wochen muss anhand der Relikte der Sockel darauf geschlossen werden, wie oft sich ein Gletschertisch aufbaute und wieder abrutschte.

Die Sockel der Gletschertische erreichten bei allen Blöcken am Oberaargletscher eine maximale Höhe von einem Meter. Dies unterstützt die Aussage in der Definition der ZUM ([www.satgeo.zum.de](http://www.satgeo.zum.de), letzter Zugriff: 21.08.2017) und widerspricht der These von Reclus (1874).

### **Fehler / Schwierigkeiten**

Messungen im Feld mit einfachen Messmittel sind ungenauer als Messungen mit professionellen Vermessungsgeräten (Schweissthal 1966, Goudie 1994). Die Ungenauigkeiten bewegten sich an den Feldtagen im eistelligen Zentimeterbereich. Die Bewegung der Blöcke über eine Saison liegt im einstelligen Meterbereich. Somit sind einige Zentimeter als Differenz zu vernachlässigen.

---

Eine weitere Fehlerkontrolle ergibt sich aus der Vermessung im Feld und der Nachbearbeitung in Agisoft. Ob neu eingemessene Distanzen realistisch sind, lässt sich anhand der im Feld gemessenen Distanzen leicht nachkontrollieren. Unrealistische Werte sind bei einer Nachkontrolle leicht zu erkennen. Die erhaltenen Fehlerwerte in Agisoft bewegen sich von 0,1m bis 0,01m. Schlechte Werte erhält man, wenn es sich um unpräzise Fotoaufnahmen handelte und dadurch das Programm die Pixel nicht exakt zuordnen konnte.

Die Resultate von PE2 zeigen, dass die Ausaperung und die Schmelze einen äusserst starken Einfluss auf die Distanzmessung haben. Die Werte oben und unten der Ablationsstangen können sich sehr stark unterscheiden, besonders dann, wenn der Block in eine seitliche Lage kippt. Dadurch verändert sich die Distanz zur Markierung des Blockes deutlich, obwohl der Block sich weniger stark bewegte, sondern sich drehte. In diesem Fall lohnt es sich, Messungen in die Mitte des Blockes vorzunehmen oder von der Stange den direktesten Weg zu messen.

## 7.2. Luftbildanalyse

Durch die Markierung der Blöcke 2012 - 2015 auf einer Ebene liessen sich die Bewegungen über die Jahre hinweg vergleichen. Die Auswertung aller untersuchten Blöcke, welche eine Abweichung quer zur Mittelmoräne in südlicher Richtung aufwiesen, zeigte eine Querdistanz von 2,8m/Jahr im Mittel. Zudem ergab sich eine Abweichung der Gletschertischbewegung zur Gletscherfliessbewegung. Die Gletscherfliessgeschwindigkeit unterscheidet sich zu der Bewegung der Gletschertische in Fliessrichtung um 0,63m/Jahr, die Blöcke bewegen sich im Mittel schneller als der Gletscher fliesst. Dieser Wert muss jedoch einzeln betrachtet werden. Der Ober- und Unteraargletscher ergeben Werte die grösser sind als die Gletscherfliessgeschwindigkeit, während die Blöcke am Gornergletscher um 0.9m/Jahr langsamer fliessen.

Die Blöcke wurden auf verschiedenem Untergrund und unterschiedlicher Lage untersucht und in Bezug zur Blockgrösse und ihrer Abweichung von der Gletscherfliessrichtung gesetzt. Es wurde herausgefunden, dass Blöcke, die auf dem Gletschereis liegen, im Mittel mobiler sind als Blöcke, die auf Schutt liegen. Einen Zusammenhang zwischen der Blockgrösse und der zurückgelegten Distanz durch Gletschertischbildung konnte nicht gefunden werden. Es zeigte sich jedoch, dass das Maximum der zurückgelegten Distanz quer zur Mittelmoräne südseitig bei einer Blockgrösse von 10m erreicht wird. Die untersuchten Blöcke sind in dieser Arbeit 1-49m gross. Diejenigen, die kleiner als 1m sind, konnten in der Luftbildanalyse aufgrund unzureichender Auflösung nicht untersucht werden (Raetzo et al. 2016, [www.swisstopo.admin.ch](http://www.swisstopo.admin.ch), 22.08.2017). In der Feldstudie zeigte sich jedoch, dass eine bestimmte Grösse erreicht werden muss, damit die Blöcke einen Tisch bilden (Benn und Evans 2014).

### **Sockel**

Ein erster Blick auf die Luftbildaufnahmen am Gornergletscher zeigen auffallend viele weisse Flächen nordwestlich der Blöcke. Diese könnten auf einen alten Sockel hindeuten, der offenliegt, nachdem der Block abrutschte. Auch am Unteraargletscher sind diese weissen Flecken hinter den Blöcken zu entdecken. Diese liegen nördlich oder nordwestlich der Blöcke. Die Blöcke am Unteraargletscher rutschen also eher nach Süd und Südost ab.

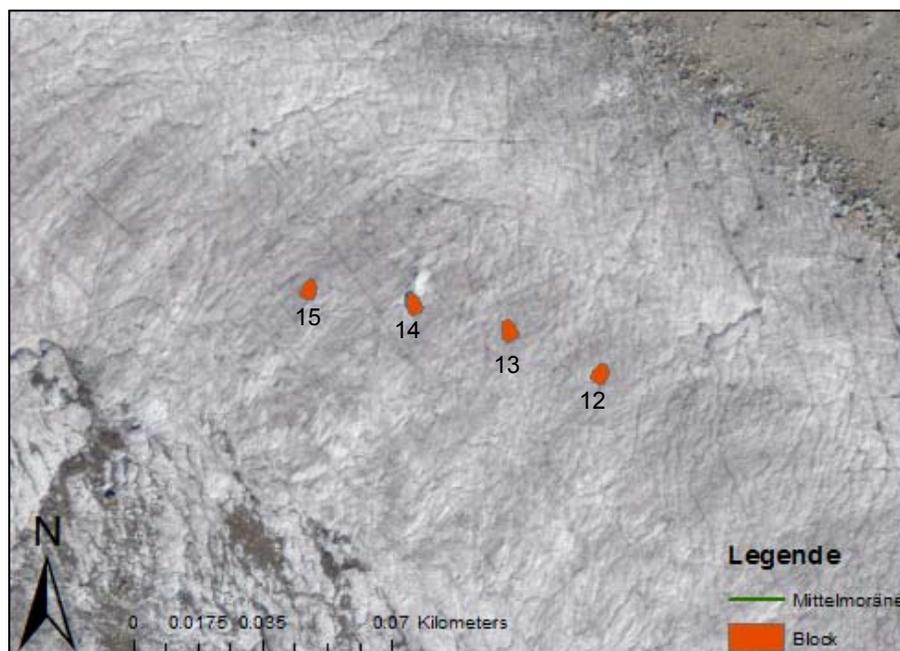


Abbildung 7.3 Ausschnitt aus dem Luftbild vom Gornergletscher 2015. Die weisse Spur nordöstlich des Blockes deutet auf einen alten Sockel hin. Der Block hat sich nach Südwesten bewegt (VAW).

### Spezialfall Gornergletscher

Während auf dem Unter- und Oberaargletscher eine Tendenz zu erkennen war, dass mit steigender Blockgrösse die Bewegungen auf dem Gletscher grösser werden, um dann wieder zu sinken, kann auf dem Gornergletscher kein Trend erkannt werden. Weiter sind die Blöcke im Mittel langsamer in Richtung Gletscherfließen unterwegs als der Gletscher selbst, während die Blöcke auf den anderen untersuchten Gletschern sich schneller in Gletscherfließrichtung bewegen als der Gletscher.

Es ist anzunehmen, dass der Gornergletscher durch die polythermalen Verhältnisse die Bewegungsmuster der Blöcke verändert. Auf den Luftbildern sind viele kleinere Gletscherseen und oberflächliche Schmelzwassersysteme zu erkennen.

Des Weiteren könnte die Strahlung eine «bremsende» Wirkung in der Bewegung der Gletscherfließrichtung haben. Die Strahlung, welche in der vorherigen Diskussion ausgeführt wurde, erreicht ihr Strahlungsmaximum aufgrund der Bewölkung am Nachmittag, kurz vor Mittag ([www.meteoschweiz.admin.ch](http://www.meteoschweiz.admin.ch), 22.08.2017). Zu diesem Zeitpunkt scheint die Sonne noch von Osten her und bringt die Sockel der Gletschertische von Osten her zum Schmelzen.

Dadurch würden die Gletschertische nicht in Richtung der Gletscherfliessrichtung abrutschen, sondern in Richtung Südost, wie dies auch in der Feldarbeit beobachtet wurde.

Eine weitere beeinflussende Wirkung könnte die Lage der Mittelmoräne haben. Im Gegensatz zum Ober- und Unteraargletscher ist die Mittelmoräne des Gornergletschers zentriert und erreicht so eine höhere Fliessgeschwindigkeit als das Eis am Rande des Gletschers (Cuffey und Patterson 2010). Deshalb könnten die Blöcke auf dem Schutt sich schneller bewegen als die umliegenden Blöcke.

### **Blöcke auf der Mittelmoräne zur Berechnung der Fliessgeschwindigkeit des Gletschers**

Die Fliessgeschwindigkeit beruht auf der Annahme, dass Blöcke auf der Moräne, ohne direkt auf Eis zu liegen, keine Gletschertische bilden können. Blöcke, welche für die Luftbildanalyse auf Schutt beobachtet wurden, sind Blöcke, welche trotz der Schuttbedeckung eine auffällige Bewegungsrichtung zeigten. Die Fliessgeschwindigkeit kann jedoch auf dem Gletscher selbst stark variieren. Mittig ist die Fliessgeschwindigkeit schneller als am Rand eines Gletschers (Cuffey und Patterson 2010; Hooke 2005). Am Ober- und Unteraargletscher ist die anhand der Luftbilder gemessene Fliessgeschwindigkeit des Gletschers bei 0,3m/J gleich hoch wie die zusätzliche Blockbewegung auf der Moräne. Es können also die Blöcke auf der Mittelmoräne als Schätzung der Fliessgeschwindigkeit des Gletschers benutzt werden. Am Gornergletscher bewegen sich die Blöcke um -1,5m/Jahr langsamer als die angenommene Fliessgeschwindigkeit (siehe Abschnitt *Spezialfall Gornergletscher*). Anhand der Luftbilder konnte keine Erklärung dafür gefunden werden. Um genauere Resultate der Fliessgeschwindigkeiten zu erreichen, müssten Messungen am Gletscher durchgeführt werden, was den Rahmen dieser Arbeit überschritten hätte. Schlussfolgernd lässt sich sagen, dass Blöcke auf der Mittelmoräne in zwei von drei Fällen zur Messung der Fliessgeschwindigkeit des Gletschers verwendet werden konnten.

### **Gletscherphänomene / kleinräumige Topografie**

Auf den Luftbildaufnahmen wurden möglichst viele Blöcke miteinander verglichen. Die meisten Blöcke erhielten ähnliche Resultate, doch einige Blöcke stachen mit enormen Werten heraus. Sie bewegten sich besonders schnell auf dem Gletscher. Es besteht keine plausible Erklärung, um diese Bewegung mit der Gletschertischbildung zu begründen. Vielmehr muss in diesen

Fällen die Topografie oder eben die Form der Blöcke genauer beobachtet werden. Eine grobe Tendenz lässt sich mit dem Digitalen Terrain Modell von SwissAlti abschätzen. Da die Mittelmoräne durch den Schutt isoliert wird, ist diese höher als das umliegende Eis und fällt zu beiden Seiten ab. Der Gesteinsschutt wird aber vor allem von den Strukturen am Gletscher wie Schmelzwassersystemen, Toteislöcher oder Stauseen abgelenkt (Matzka und Fiebig 2006). Die Eigenschaften des Blockes wie die Grösse, Form und die Beschaffenheit beeinflusst die Bewegung zusätzlich (Benn und Evans 2014).

Diese kleinräumigen Unebenheiten sind in den Luftbildern nicht lückenlos zu erklären. Auffällige Blöcke, welche z. B. in einem der Jahre in einem Abflusskanal lagen, wurden nicht in die Statistik miteinbezogen. Weitere Fälle wie ein Block am Oberaargletscher, welcher sich über drei Luftbilder kontinuierlich um 9m nach Südosten bewegte, machte im letzten Jahr eine Abweichung um 6m nach Nordosten. Auf dem Luftbild lassen sich keine kleinräumigen Phänomene entdecken, ausser eine Rinne. Der Block ist ausserdem 3x7m gross. Wie von Matzka und Fiebig (2006) und Benn und Evans (2014) beschrieben ist der Block durch äussere Einflüsse oder seinen Eigenschaften in diese Richtung abgelenkt worden.

### **Fehler / Schwierigkeiten**

Die Luftbildanalyse ist relativ anfällig auf Fehler, da sehr viele Zwischenschritte im Forschungsprozess enthalten sind. Die Auswahl der Blöcke auf den Luftbildern begrenzt sich durch die Auflösung der Bilder auf 25cm. Trotzdem ist es schwierig, bei dieser Auflösung Blöcke, die kleiner als einen Meter sind, auf den Luftbildern zu erkennen und ihre Bewegung zu verfolgen. Sehr einfach sind dagegen markante, freistehende Blöcke. Die freie Lage verhindert die Verwechslung mit anderen Blöcken ähnlicher Grösse. Bei Blöcken nahe der Mittelmoräne oder auf Schutt lässt sich kaum einer bis zum nächsten Jahr verfolgen, da die Verwechslungsgefahr mit ähnlichen, nahegelegenen Blöcken zu gross ist.

Die zeitliche Auflösung darf maximal ein Jahr betragen. Gletschertische sowie Anordnungen mehrerer Blöcke sind über einen grösseren Zeitraum nicht konkret auszumachen, da weder die Form der Blöcke noch die Formation der Anordnung nach einigen Jahren wieder zu erkennen sind. Mit einer Gletscherfliessgeschwindigkeit von etwa 20m pro Jahr liegen die Abstände in der zeitlich nächsten Luftbildaufnahme bei 40m, dies mit einer zusätzlich erwarteten Abweichung oder Tendenz in Richtung Süden. Die Blöcke nachzuverfolgen, ist nicht mehr möglich, wie es am Fall der Luftbilder vom Persgletscher zu sehen ist. Die Gletschertischbewegung war nicht

jedes Jahr gleich stark. Es zeigte sich, dass sich die Distanzen der Blockbewegungen von Jahr zu Jahr und von Block zu Block unterscheiden. Da die verwendeten Luftbilder nicht zum gleichen Zeitpunkt aufgenommen wurden, ist bei den Bildern die Periode 2013 bis 2014 am Unter- und Oberaargletscher länger und somit die Distanzen der Blöcke grösser.

Die Lage der Mittelmoräne ist von Unsicherheiten geprägt. Die Mittelmoräne variiert in der Breite und nimmt gegen Ende der Gletscherzunge zu (Anderson 2009). Der Rand einer Gletschermoräne ist nicht gerade und verändert sich permanent. Es mussten bei der Mittelung der Mittelmoräne Annahmen getroffen werden, welche Auswirkungen auf die Resultate haben. Wählt man einen Mittelmoränenabschnitt in einem anderen Winkel, verändert dies die Werte, wie stark der Block nach Süden abweicht. Diese Arbeit zeigt, dass die Blöcke mehrheitlich Richtung Süden abweichen, die genaue Distanz ist jedoch aufgrund der vorhin erwähnten Ungenauigkeiten mit Vorsicht zu betrachten. Hier wäre es spannend in einer weiter anschliessenden Arbeit numerisch zu untersuchen, wie gross der Einfluss der Veränderung der Mittelmoräne auf die horizontalen Bewegungen der Blöcke ist.

Die Auswahl der Blöcke beeinflusst die Resultate. Zum einen konnten aufgrund der räumlichen Auflösung der Luftbilder keine kleinen Blöcke bewertet werden. Diesen Blöcken ist daher in der Feldstudie ein eigenes Kapitel gewidmet. Zum anderen sind die unterschiedlichen Lagen der Blöcke nicht gleich bewertet. Es wurden weniger Blöcke nördlich und auf der Moräne analysiert. Dies liegt an der Lage der Moräne selbst, welche in den Fällen von Unter- und Oberaargletscher sehr nahe am Gletscherrand liegt. Zudem können Blöcke auf der Mittelmoräne weniger gut verfolgt werden als freistehende Blöcke auf dem Eis. Grundsätzlich wurde in dieser Studie eine durchschnittliche Grösse von Blöcken mit 9m Grösse gefunden und ausgewertet, dies beeinflusst die Resultate.

Weitere Fehler können in der Berechnung der Distanzen entstehen. Einerseits gründen diese auf menschlichen Rechnungsfehlern, andererseits können aber auch systematische Fehler auftreten. Im ArcGIS wurde die Distanz vom Block zur Mittelmoräne vom äussersten Punkt des Polygons zur Linie gezogen, während die Berechnungen mit Punktkoordinaten vom Mittelpunkt des Polygons ausgingen ([www.desktop.arcgis.com](http://www.desktop.arcgis.com), 17.05.2017). Dies kann bei grossen Blöcken zu einer Differenz der berechneten Distanz von bis zu 20m führen.

### 7.3. Schmelzmodell

Die tiefste kumulative Schmelze erreichten die Messungen am Persgletscher. Die kurze Messperiode im August und September und die höhere Lage erklären die kleine Ablation. Die Messung am Oberaargletscher zeigt eine grössere Schmelze. Der Oberaargletscher liegt tiefer als der Persgletscher und erreicht darum höhere Temperaturen. Auch die Messperiode dauert länger, jedoch liegt diese bis Mitte Oktober auch spät in der Schmelzseason. Dies erklärt die hohen Werte (265,75cm vom 02.07. - 16.08.) am Oberaargletscher in 2017. Die hohen Schmelzwerte wurden dank durchschnittlich wärmeren Temperaturen in der Messperiode erreicht.

Der Vergleich der Gradtag Modelle mit der gemessenen kumulativen Schmelze zeigt, dass die Modelle für eine genaue Vorhersage der Ablation im Feld nicht geeignet sind. Das PDD Modell springt im Vergleich zum PDDSW Modell stärker auf die Höhenveränderung an, da dieses Modell nur von der abnehmenden Temperatur beeinflusst wird.

Auf dem Gletscher beeinflussen andere Faktoren die Schmelze als nur die höhenabhängige Temperatur: Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Albedo, Schneetemperatur und kleinräumige Höhenänderungen um einige zu nennen (Oerlemann und Klok (2002)). Die hier verglichenen Gradtag Modelle funktionieren gut um grossräumige Abschätzungen zu treffen. Zur Modellierung kleinräumiger Schmelzwerte müssen jedoch noch weitere Faktoren bekannt sein.

#### **Zusammenhang Schmelze - Blockbewegung**

Die Vermessungen zeigen, dass gegen Ende der Schmelzseason weniger neue Tische gebildet werden. Falls noch ein weiterer Zyklus stattfinden sollte, ist der Sockel nicht mehr so gross wie der vorhergehende (OA3). Abgesehen von OA2 und OA3 wurden alle Blöcke nur über einen Zyklus begleitet. Eine Beobachtung wie zum Beispiel bei OA1 in der Feldseason 2017 zeigt, dass nach dem ersten Rutsch, trotz hoher Schmelze, der Block keinen zweiten Sockel mehr bildete. Es lässt vermuten, dass wenn die Steinplatten nach einem Rutsch schräg stehen, sie den Sockel dahinter weiterhin schützen. Liegt die Steinplatte zu steil schräg, rutscht diese durch die Schwerkraft immer wieder ab, bevor sich ein neuer Tisch bilden kann. Die Messungen lassen nicht darauf schliessen, warum dies der Fall bei OA1, bei OA2 ist und bei OA3 nicht zutrifft.

## Schwierigkeiten

Um die Werte der zwei Schmelzmodelle auf die realen Schmelzwerte anzupassen, werden die variablen Parameter angepasst. Auffallend ist die Veränderung der Werte von Oberaargletscher 2017. Die Albedo wurde auf 0,2 herabgesetzt, was nach Cuffey und Patterson (2010) schuttreichem Firn oder Eis entspricht. Der positive Grad Schmelz Faktor wurde um  $0,35\text{cm/C/T}$  erhöht, um passende Werte für das Gradtag-Modell zu erhalten. Es wird also angenommen, dass eine erhöhte Schmelze aufgrund von klimatischen Bedingungen wie Windgeschwindigkeit, turbulente Wärmeflüsse stattfindet.

Die Solarstrahlung ist im Gebirge besonders variabel, da Bergkämme und Berggipfel Schatten auf den Gletscher werfen. Eine Berechnung der exakten Solarstrahlung am Feldstandort muss, um genauere Ergebnisse zu erhalten, unbedingt vorgenommen werden.



## 8. Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wurde überprüft, ob Schuttblöcke auf ausgewählten Gletschern in den Schweizer Alpen in ihrer Bewegungsrichtung eine Ablenkung zur Gletscherfliessrichtung aufweisen.

Durch die Feldanalyse wurde an fünf Blöcken auf zwei Gletschern untersucht, in welche Richtung und wie weit diese sich in einer Saison bewegen. Die Beobachtung der Blöcke im Feld zeigt in den Resultaten Bewegungen von 33cm bis 508cm nach Süden und Südosten auf. Diese verschoben sich im Mittel um 1,51m/Jahr zusätzlich zur Gletscherbewegung. Somit lässt sich abschliessend sagen, dass Gletschertische in den untersuchten Gebieten in südlicher Richtung von der Gletscherfliessrichtung abweichen. Anhand der Luftbilder von drei Gletschern wurde die Bewegung mehrerer Blöcke über vier Jahre nachvollzogen und vermessen. Daraus lässt sich die Erkenntnis schliessen, dass die Mehrheit der Blöcke eine Abweichung zur Gletscherfliessrichtung aufzeigen. 81,8% aller untersuchten Blöcke bewegten sich in einer Ablenkung zur Gletscherfliessrichtung mit einer reinen Querbewegung zur Mittelmoräne in südlicher Richtung. Diese erreichten eine Distanz von durchschnittlich 2,2m/Jahr. Der mittlere Wert aller untersuchten Gletschertische auf den Luftbildern in einer Saison in Fliessrichtung und quer zur Mittelmoräne beträgt 0.68m/J. Alle untersuchten Blöcke weisen eine Abweichung der Bewegung zur Gletscherfliessrichtung auf. Die stärkste Abweichung der Blöcke geht dabei von Südwesten bis nach Osten von der Gletscherfliessrichtung ab. Es gibt eine südliche Abweichung der Richtungswerte der Blöcke zur Mittelmoräne von  $10^\circ$  im Mittel.

Für unerwartete Abweichungen der Blöcke zur Gletscherfliessrichtung werden zwei Ursachen vermutet. Die Luftbildanalyse sowie die Feldarbeit zeigten auf, dass kleinräumige Gletscherphänomene wie Mühlen, oberflächliche Schmelzwasserabflüsse oder Gletscherspalten die Bewegungsrichtung der Gletschertische plötzlich ändern können. Als zweite Ursache wird das Strahlungsmaximum erwähnt. Die auffallend östliche Bewegung bei allen Blöcken am Oberaargletscher lässt sich nicht durch kleinräumige Gletscherphänomene erklären. Vielmehr deckt sich die Bewegung mit der Theorie des Strahlungsmaximums. Weil die Strahlung am Vormittag am höchsten ist, und am Nachmittag die Bewölkung einsetzt, ist die Strahlung am höchsten von Osten her und schmilzt dementsprechend den Sockel am stärksten

von Osten her. Diese Theorie wurde in Rahmen der Arbeit nicht nachgewiesen und stellt eine weiterführende theoretische Überlegung dar.

In dieser Arbeit wurde herausgefunden, dass sich Gletschertische erst ab einer Blockgrösse von 50cm Länge+Breite bilden. Die Resultate dieser Arbeit zeigen jedoch keinen statistischen Zusammenhang von Blockgrösse und der Reichweite ihrer zusätzlichen Bewegungen. Blöcke die auf der Mittelmoräne liegen, bewegen sich mit der Moräne mit, währendem die Blöcke auf Gletschereis Tische bilden und eine zusätzliche Bewegung durchlaufen. Die zurückgelegte Distanz der Gletschertische steht nicht in Relation zur Sockelhöhe, welche ein Block aufbaut, sondern hängt damit zusammen, wie viele Zyklen er durchmacht. Diese bauen sich nicht zwingend ganz ab, bevor sie wieder einen neuen Sockel aufzubauen. Die Überreste des alten Sockels bleiben bestehen und zeigen die Bewegung der Gletschertische an.

Die Gradtag Modelle können für kleinräumige Messungen an mehreren Standorten auf einem Gletscher nicht verwendet werden. Die Resultate sind zu ungenau. Weitere Faktoren beeinflussen das Mikroklima auf dem Gletscher, welche für Ablationsmessungen miteinbezogen werden müssen.

Es können folgende Aussagen getroffen werden:

- Alle untersuchten Gletschertische auf Gletschern in den Schweizer Alpen zeigen eine Abweichung zur Hauptfliessrichtung des Gletschers.
- Interessanterweise ist die Hauptabweichung generell gegen Südosten, unabhängig von der vorgegebenen Fliessrichtung des Gletschers. Bewegt sich der Gletscher in westlicher Richtung, verlangsamt sich der Block. Liegt der Gletscher in östlicher Ausrichtung, so beschleunigt sich die Bewegung des Blockes gegenüber der Gletscherfliessgeschwindigkeit.
- Die Gletschertischbewegung wird von der Strahlung, der Temperatur und den kleinräumigen Gletscherphänomenen beeinflusst.
- Die untersuchten Gletschertische bewegten sich zusätzlich zu der Gletscherfliessgeschwindigkeit im einstelligen Meterbereich pro Jahr fort.
- Die untersuchten Schmelzmodelle sind zu ungenau für präzise Angaben der Ablation bei Feldstandorten auf demselben Gletscher.

## 9. Ausblick

Diese Arbeit zeigt, dass die Bewegungen der Gletschertische nicht mit der Bewegung des Gletscherfließens gleichgesetzt werden dürfen. Würden Gletschertische als Referenzpunkte auf dem Gletscher oder zur Gletscherfließgeschwindigkeit verwendet werden, könnte dies zu verzerrten Resultaten führen. Es zeigt sich weiter, dass viele der obengenannten Definitionen die Gletschertische und ihre Bewegung vereinfacht darstellen. Um ein verbessertes Verständnis über die Bewegung der Gletschertische zu erhalten, sollte man die Studie räumlich ausweiten. Gletscher, welche eine andere Exposition haben, könnte man auf dieselben Merkmale untersuchen. Dies würde detailliertere Resultate über die räumlichen Bedingungen liefern. Um ein besseres Verständnis über die Richtung des Rutsches zu erhalten, wäre es möglich, Strahlungsmessungen auf dem Gletscher zu machen und diese mit dem Gletschertisch Zyklus zu vergleichen. Zur Verfolgung des vollständigen Zyklus müssten die Bilder häufiger aufgenommen werden. Es wäre möglich, TimeLapse Kameras zu installieren und so die Bewegung des Blockes jederzeit nachvollziehen zu können.

Die hier verwendeten Messmethoden sind bewusst sehr einfach in der Anwendung. Aus diesem Grund sind sie ungenauer als spezifische Messmethoden. Es wurde in dieser Arbeit bewiesen, dass auch sehr einfache, günstige und leichte Messgeräte genügend aussagekräftige Resultate liefern können und sich zusätzlich das Prozessverständnis verbessern lässt.

Im Ganzen konnte aus dieser Arbeit ein erweitertes Verständnis zur Gletschertischbewegung und dessen Zyklus gewonnen werden. Diese soll zur Weiterentwicklung sowie der Optimierung der Messmethoden der Grundlagenforschung von Schuttbedeckung auf Gletschern und Gletscherphänomenen dienen.



## 10. Literatur

- Agisoft: Tutorial (Beginner level): 3D Model Reconstruction with Agisoft PhotoScan 1.1.  
<http://www.agisoft.com/support/tutorials/beginner-level/>. Letzter Zugriff:02.09.2017.
- Anderson, R. S. (2000). A model of ablation-dominated medial moraines and the generation of debris-mantled glacier snouts. *Journal of Glaciology*, 46(154), 459-469.
- Arnold, N. S., Willis, I. C., Sharp, M. J., Richards, K. S., & Lawson, W. J. (1996). A distributed surface energy-balance model for a small valley glacier. I. Development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Valais, Switzerland. *Journal of Glaciology*, 42(140), 77-89.
- Bauder, A. und Rüegg, R. (2009): The Swiss Glaciers: 2003/04 and 2004/05, Glaciological Report.
- Benn, D.I., Bolch, T., Hands, K., Gulley, J., Luckman, A., Nicholson, L.I., Quincey, D., Thompson, S., Toumi, R., Wiseman, S. (2012). Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards. *Earth-Science Reviews* 114, 156–174.
- Benn, D. und Evans, D. J. (2014). *Glaciers and glaciation*. Routledge.
- Boulton, G. S. (1978). Boulder shapes and grain-size distributions of debris as indicators of transport paths through a glacier and till genesis. *Sedimentology*, 25(6), 773-799.
- Braithwaite, R. J., und Olesen, O. B. (1984). Ice ablation in West Greenland in relation to air temperature and global radiation. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 20, 155-168.
- Braithwaite, R. J. und Olesen, O. B. (1989). Calculation of glacier ablation from air temperature, West Greenland. *Glacier fluctuations and climatic change*. 219-233. Springer Netherlands.
- Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie Meteo Schweiz. (2016). *SwissMetNet: Das Referenzmessnetz der MeteoSchweiz*
- Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie Meteo Schweiz, [www.meteoschweiz.admin.ch](http://www.meteoschweiz.admin.ch).  
Letzter Zugriff: 26.8.2016.

- Bundesamt für Landestopografie. (2017). swissALTI3D Das hoch aufgelöste Terrainmodell der Schweiz.
- Bundesamt für Landestopografie: swissALTI3D Ausgabebericht 2013.
- Bundesamt für Landestopografie: swissALTI3D Ausgabebericht 2014.
- Bundesamt für Landestopografie: swissALTI3D Ausgabebericht 2015.
- Bundesamt für Landestopografie: swissALTI3D Ausgabebericht 2016.
- Bundesamt für Landestopografie: swissALTI3D Ausgabebericht 2017.
- Clark, D.H., Clark, M.M., Gillespie, A.R. (1994). Debris covered glaciers in the Sierra Nevada, California, and Their Implications for Snowline Reconstructions. *Quaternary Research* 41, 139 – 153.
- Cogley, J.G., Hock, R., Rasmussen, L.A., Arendt, A.A, Bauder, A., Braithwaite, R.J., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L. und Zemp, M. (2011). Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms. IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, UNESCO-IHP, Paris.
- Cuffey, K.M. und Paterson, W.S.B. (2010). *The Physics of glaciers*. 285–289.
- Darms, G.A. (2009). Firntemperaturen auf dem Colle Gnifetti Zusammenstellung und Analyse bestehender und neuer Temperaturprofile. Masterarbeit. Geographisches Institut Universität Zürich. Abteilung Physische Geographie. Zürich.
- Davies, B., Institute of Geography and Earth Sciences, Aberystwyth Univeristy, <http://www.antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/numerical-ice-sheet-models/modelling-glacier-melt/>. Letzter Zugriff: 26.8.2016.
- Gebhardt, H., Glaser, R., Radtke, U., & Reuber, P. (Eds.). (2007). *Geographie: Physische Geographie und Humangeographie*. Elsevier.
- GEOVLEX. MLU Halle-Wittenberg. [www.mars.geographie.uni-halle.de/mlucampus/geoglossar/](http://www.mars.geographie.uni-halle.de/mlucampus/geoglossar/). Letzter Zugriff: 22.08.2017.
- Gischig, V. (2005) Tiefenabhängigkeit der seismischen Geschwindigkeit auf dem Gornergletscher.
- Glaser, R., Radtke, U., & Reuber, P. (2007). *Geographie: Physische Geographie und Humangeographie*. H. Gebhardt (Ed.). Elsevier.

- Gletscherberichte (1881-2016). "Die Gletscher der Schweizer Alpen", Jahrbücher der Expertenkommission für Kryosphärenmessnetze der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) herausgegeben seit 1964 durch die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich. No. 1-134,
- GLIMS: [www.glims.org](http://www.glims.org). Letzter Zugriff: 2.3.2017.
- Gomez, B., und Small, J. (1985). Medial moraines of the Haut Glacier d' Arolla, Valais, Switzerland: Debris supply and implications for moraine formation. *Journal of Glaciology*, 31(109), 303–307.
- Graf, H. R., Burkhalter, R., Gubler, T., Keller, O., Maisch, M., Schindler, C., Schlüchter, C. und Wyssling, G. (2003). Das «Mittelmoränen-Modell» – aus wissenschaftlicher Sicht. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 148(3), 79–87.
- Güller, A. (1950). Ueber "Sandkegel" auf Innerschweizer-und Walliser-Gletschern. *Bulletin de la Murithienne*, (67), 78-89.
- Haeberli, W., und Beniston, M. (1998). Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio*, 258-265.
- Holzhauser, H. (2008) Dendrochronologische Auswertung fossiler Hölzer zur Rekonstruktion der nacheiszeitlichen Gletschergeschichte. In: *Bulletin für angewandte Geologie*. 13/2: 23–41.
- Hooke, R. L. (2005). *Principles of glacier mechanics*. Cambridge university press.
- Hubbard, B. und Glasser, N. F. (2005). *Field techniques in glaciology and glacial geomorphology*. John Wiley & Sons.
- Hugi, F. J. (1842). Über das Wesen der Gletscher und Winterreise in das Eismeer. Gotta.
- Iken, A., Röthlisberger, H., Flotron, A., und Haeberli, W. (1983). The uplift of Unteraargletscher at the beginning of the melt season—a consequence of water storage at the bed? *Journal of Glaciology*, 29(101), 28-47.
- Institut für Schnee- und Lawinenforschung WSL:  
[http://www.slf.ch/forschung\\_entwicklung/schnee/atmosphaere/index\\_DE](http://www.slf.ch/forschung_entwicklung/schnee/atmosphaere/index_DE). Letzter Zugriff: 22.08.2017.

- Jennings, S. J., Hambrey, M. J. und Glasser, N. F. (2014). Ice flow-unit influence on glacier structure, debris entrainment and transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10), 1279-1292.
- Johannesson T., Sigurdsson O., Laumann T. und Kennett M. (1995): Degree-day glacier mass-balance modelling with applications to glaciers in Iceland, Norway and Greenland. *Journal of Glaciology* 41 (138) 345 - 358
- Kayastha, R. B., Takeuchi, Y., Nakawo, M., und Ageta, Y. (2000). Practical prediction of ice melting beneath various thickness of debris cover on Khumbu Glacier, Nepal, using a positive degree-day factor. *IAHS PUBLICATION*, 71-82.
- Kellerer-Pirklbauer, A. (2008). The supraglacial debris system at the Pasterze Glacier, Austria: spatial distribution, characteristics and transport of debris. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 52(1), 3-25.
- Knoll, G. M. (2014). *Landschaften geographisch verstehen und touristisch erschließen*. Springer Berlin Heidelberg.
- Kraftwerke Oberhasli AG. KWO. <http://www.grimselwelt.ch/>. Letzter Zugriff: 15.08.2017.
- Ludwig, R. (1853). *Das Wachsen der Steine; oder, Die Kräfte welche die Bildung und Entwicklung der Gebirgsarten vermitteln*. Jonghaus.
- Machguth, H. (2003). *Messung und dreidimensionale Modellierung der Massenbilanzverteilung auf Gletschern der Schweizer Alpen*. Masterarbeit. Geographisches Institut Universität Zürich. Abteilung Physische Geographie. Zürich.
- Maisch, M., Wipf, A., Dennler, B., Battagila, J., und Benz, C. (2000). *Die Gletscher der Schweizer Alpen - Gletscherhochstand 1850, aktuelle Vergletscherung, gletscherschwund-Szenarien, Projektschlussbericht im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes "Klimaänderungen und Naturkatastrophen"*, NFP 311.
- Martin, C., Bischof, N. und Eiblmaier, M. Landscape GmbH.  
<http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/gletschertisch/6077> Letzter Zugriff: 21.08.2017.
- Mattson, L. E. (1993). Ablation on debris covered glaciers: an example from the Rakhiot Glacier, Punjab, Himalaya. *Intern. Assoc. Hydrol. Sci.*, 218, 289-296.

- Matzka, V. und Fiebig, M. (2016). Gibt es Mittelmoränenablagerungen? Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern.
- Nakawo, M., Yabuki, H., und Sakai, A. (1999). Characteristics of Khumbu Glacier, Nepal Himalaya: recent change in the debris-covered area. *Annals of Glaciology*, 28(1), 118-122.
- Nicholson, L., und Benn, D. I. (2013). Properties of natural supraglacial debris in relation to modelling sub-debris ice ablation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(5), 490-501.
- Oerlemans, J., & Klok, E. J. (2002). Energy balance of a glacier surface: analysis of automatic weather station data from the Morteratschgletscher, Switzerland. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 477-485.
- Östrem, G. (1959). Ice melting under a thin layer of moraine, and the existence of ice cores in moraine ridges. *Geografiska Annaler*, 41(4), 228-230.
- Raetzo, H., Huss, M. und Artuso, R. (2006). Nationales Monitoring von Gletscher und Permafrost (Kryosphäre). Swisstopo Kolloquium. Bundesamt für Landestopografie swisstopo. Wabern.
- Ramp, A. (2016). Volumenänderung am Oberaargletscher seit 1851 basierend auf historischen und modernen geodätischen Überwachungsmethoden. Masterarbeit. Geographisches Institut Universität Zürich. Abteilung Physische Geographie. Zürich.
- Reclus, E. (1874). Die Erde und die Erscheinungen ihrer Oberfläche in ihrer Beziehung zur Geschichte derselben und zum Leben ihrer Bewohner: Eine physische Erdbeschreibung nach E. Reclus (Vol. 1). P. Froberg.
- Schuler, T., Fischer, U. H., Sterr, R., Hock, R. und Gudmundsson, H. (2002): Comparison of modeled water input and measured discharge prior to a release event: Unteraargletscher, Bernese Alps, Switzerland. *Nordic Hydrology* 33 (1) 27 – 46
- Schweissthal, R. (1966). Geländeaufnahme mit einfachen Hilfsmitteln. Eisenschmidt.
- Schweizerische Eidgenossenschaft, Geoportal. [www.map.geo.admin.ch](http://www.map.geo.admin.ch). Letzter Zugriff: 26.8.2016.
- Schweizer Radio und Fernsehen. [www.srf.ch/meteo/meteo-news/gletschertische](http://www.srf.ch/meteo/meteo-news/gletschertische); Letzter Zugriff: 22.08.2017

- Schwendener, L. (2013) Schuttbedeckte Gletscher im Kontext der Klimaerwärmung: Veränderungen in der Gletscherdynamik. Bachelorarbeit. Physische Geographie. Geographisches Institut, Universität Zürich.
- Shroder, J. F., Bishop, M. P., Copland, L., und Sloan, V. F. (2000). Debris-covered glaciers and rock glaciers in the Nanga Parbat Himalaya, Pakistan. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 82(1), 17-31.
- Steiner, D., Zumbühl, H. J., und Bauder, A. (2008). Two Alpine Glaciers over the Past Two Centuries. *Darkening Peaks: Glacier Retreat, Science, and Society*, 83.
- Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW): <http://www.vaw.ethz.ch/forschung/glaziologie.html>. Letzter Zugriff: 14.09.2017.
- Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich (2010) The Polythermal Structure of Gornergletscher (Valais). In: *High Altitude Research Stations Jungfrauoch and Gornergrat (HFSJG): Activity Report 2010*.
- Verein SwissEduc, <http://swisseduc.ch/glaciers/>. Letzter Zugriff: 26.8.2016.
- Vieli, A. (2016). GEO 411 field course: high mountain processes. Universität Zürich. Zürich.
- Van de Wal, R. S. W. (1996). Mass-balance modelling of the Greenland ice sheet: a comparison of an energy-balance and a degree-day model. *Annals of glaciology*, 23(1), 36-45.
- Wagner, G. (2001). Mittelmoränen eiszeitlicher Alpengletscher in der Schweiz. Eine morphologische Studie. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 94, 221–235
- Wagner, G. (2004). Das Mittelmoränen-Modell–aus wissenschaftlicher Sicht. Duplik von Wagner auf die Replik von Graf et al. in der «Vierteljahrsschrift, 148(3), 2-3.
- Zekollari, H., Fürst, J. J. und Huybrechts, P. (2014). Modelling the evolution of Vadret da Morteratsch, Switzerland, since the Little Ice Age and into the future. *Journal of Glaciology*, 60(224), 1155-1168.
- Zekollari, H., Fürst, J. J., Rybak, O. und Huybrechts, P. (2012). 3-D Higher-Order modelling of Vadret da Morteratsch (Switzerland): past extent, present-day dynamics and future evolution. In *EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 14, p. 12175)*.
- ZUM: Zentrale für Unterrichtsmedien im Internet E.V. [http://satgeo.zum.de/satgeo/beispiele/glossar/gl\\_glti.htm](http://satgeo.zum.de/satgeo/beispiele/glossar/gl_glti.htm), Letzter Zugriff: 21.08.2017.

# 11. Anhang

## 11.1. Feldstudie

PE1 23.08.2016



PE1 18.09.2016



Abbildung 11.1 Serie der 3D Modelle des Blockes PE1 in der Schmelzseason 2016 aus der Vogelperspektive. Die rote Linie zeigt die Nord-Süd Achse.

PE1 23.08.2016



PE1 18.09.2016



Abbildung 11.2 Serie der 3D Modelle des Blockes PE1 in der Schmelzseason 2016 mit Blick in Richtung Osten.

PE2 23.08.2016



PE2 18.09.2016

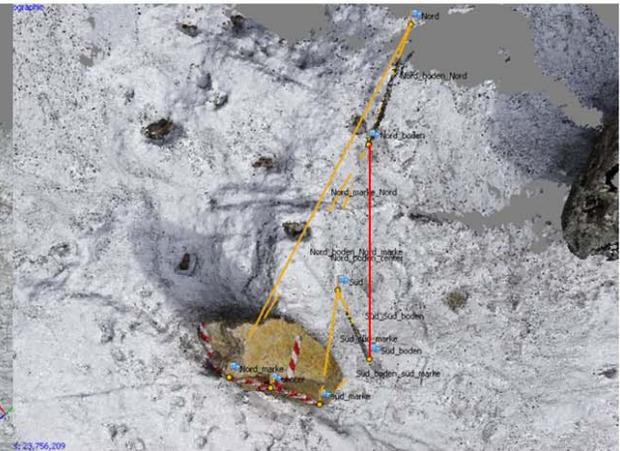
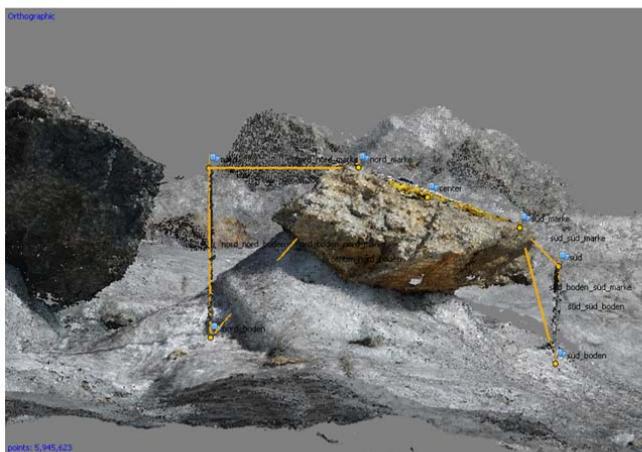


Abbildung 11.3 Serie der 3D Modelle des Blockes PE2 in der Schmelzsaison 2016 aus der Vogelperspektive. Die rote Linie zeigt die Nord-Süd Achse.

PE2 23.08.2016



PE2 18.09.2016

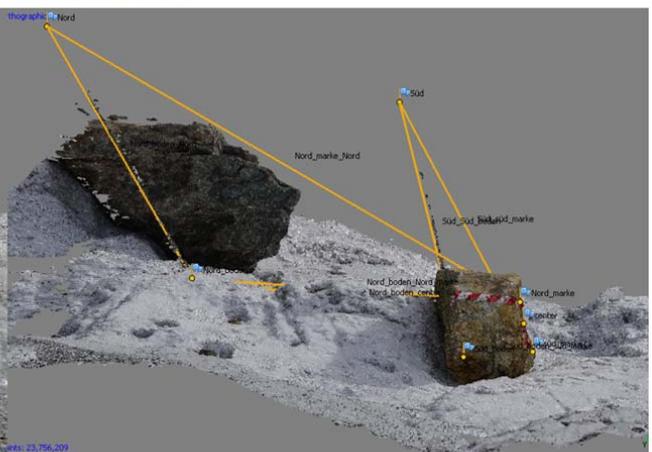


Abbildung 11.4 Serie der 3D Modelle des Blockes PE2 in der Schmelzsaison 2016 mit Blick in Richtung Osten.

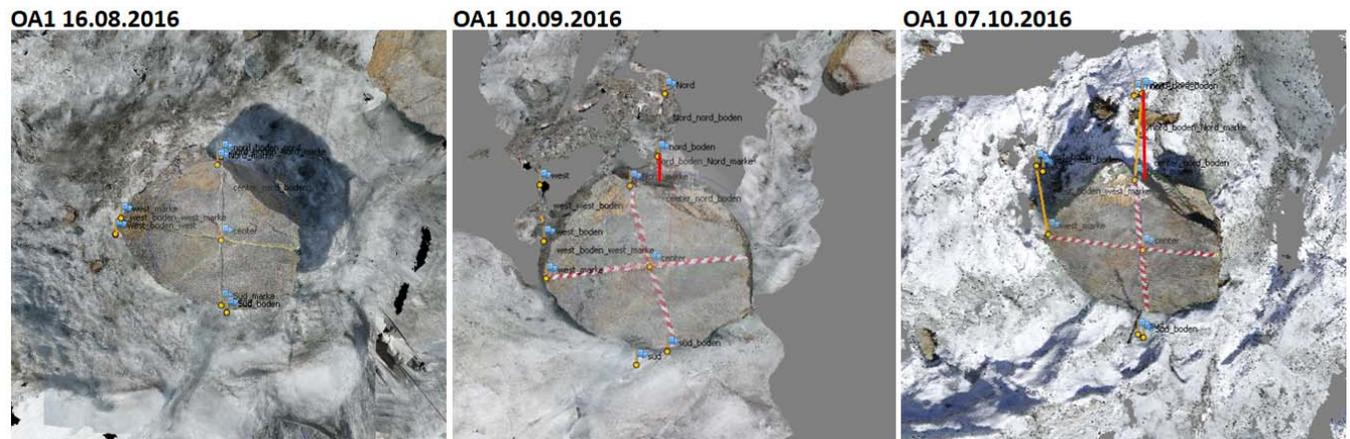


Abbildung 11.5 Serie der 3D Modelle des Blockes OA1 in der Schmelzsaison 2016 aus der Vogelperspektive. Die rote Linie zeigt die Nord-Süd Achse.

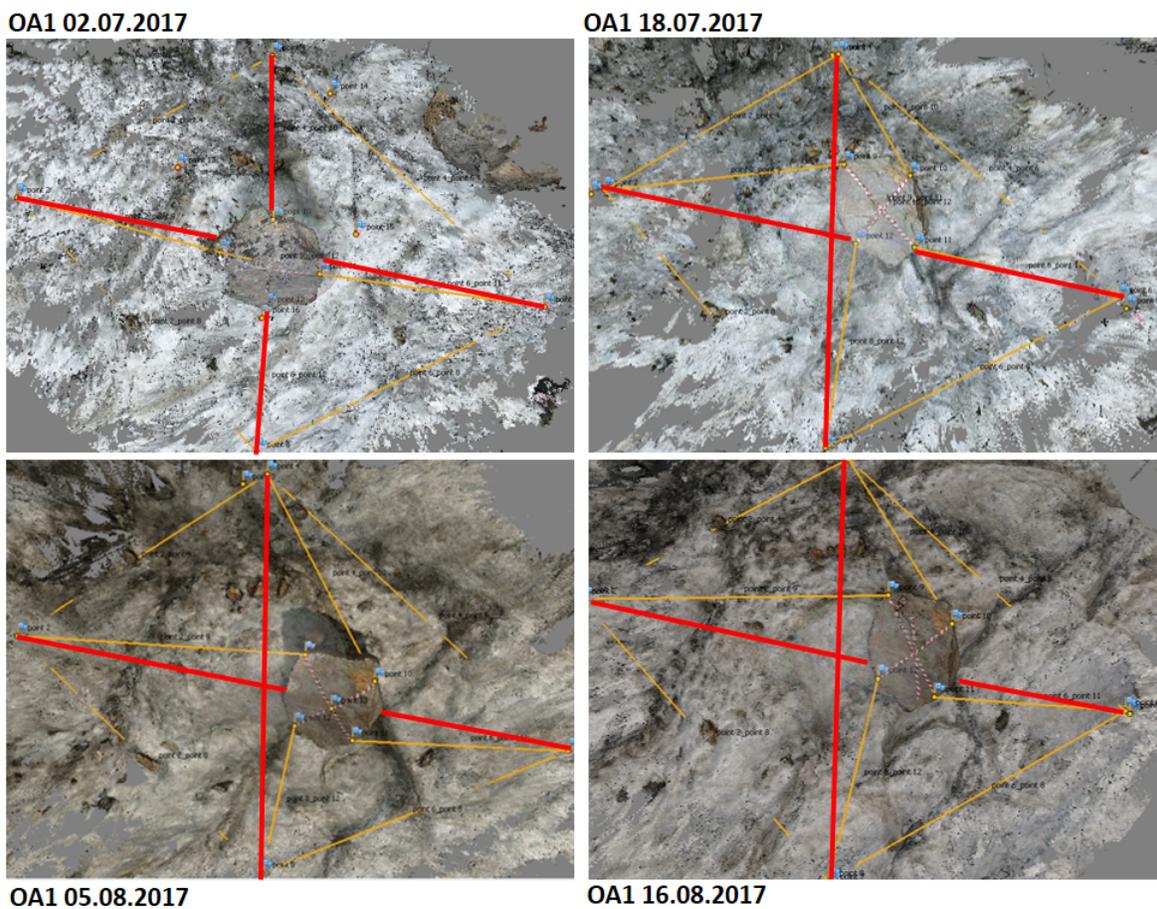


Abbildung 11.6 Serie der 3D Modelle des Blockes OA1 in der Schmelzsaison 2017 aus der Vogelperspektive. Die rote Linie zeigt die Nord-Süd Achse.

OA1 02.07.2017



OA1 18.07.2017



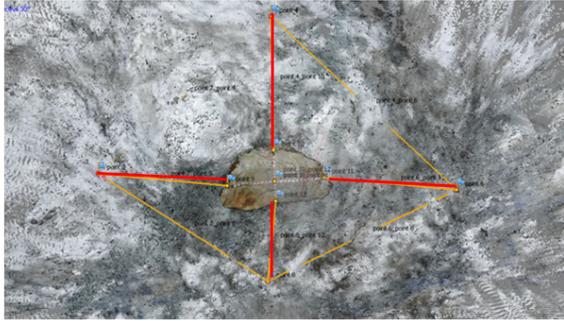
OA1 05.08.2017



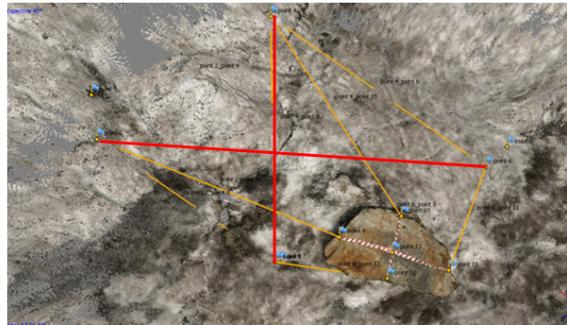
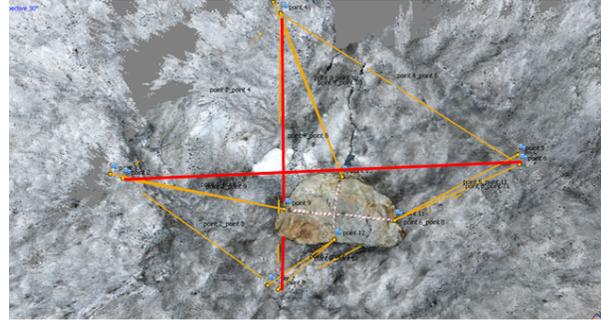
OA1 16.08.2017

*Abbildung 11.7 Serie aus den Fotoaufnahmen des Blockes OA1 in der Schmelzsaison 2017 mit dem Blick in Richtung Süden.*

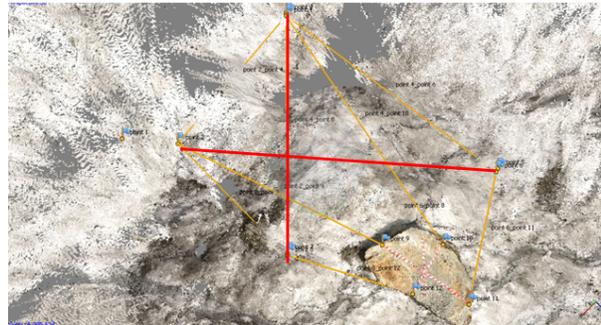
OA2 02.07.2017



OA2 18.07.2017



OA2 05.08.2017



OA2 16.08.2017

Abbildung 11.8 Serie der 3D Modelle des Blockes OA2 in der Schmelzsaison 2017 aus der Vogelperspektive. Die rote Linie zeigt die Nord-Süd Achse.

OA2 02.07.2017



OA2 18.07.2017



OA2 05.08.2017



OA2 16.08.2017

Abbildung 11.9 Serie aus den Fotoaufnahmen des Blockes OA2 in der Schmelzsaison 2017 mit dem Blick in Richtung Nordosten.

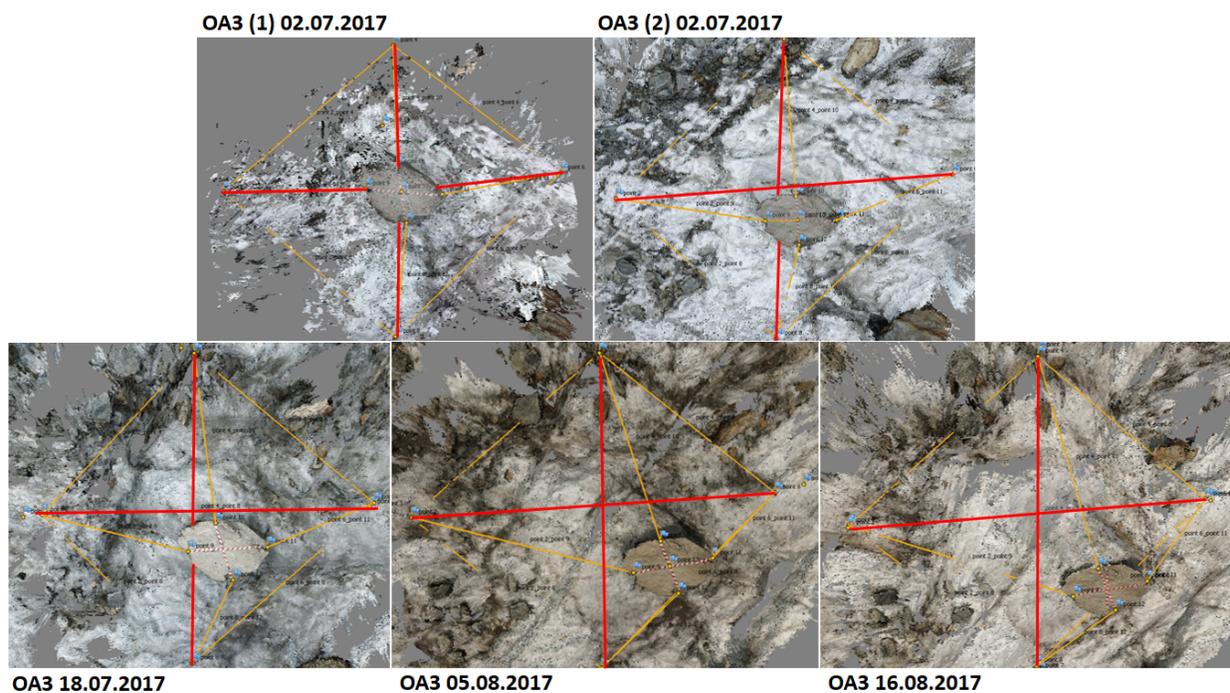


Abbildung 11.10 Serie der 3D Modelle des Blockes OA3 in der Schmelzsaison 2017 aus der Vogelperspektive. Die rote Linie zeigt die Nord-Süd Achse.



Abbildung 11.11 Serie aus den Fotoaufnahmen des Blockes OA3 in der Schmelzsaison 2017 mit dem Blick in Richtung Westen.

## 11.2. Luftbildanalyse

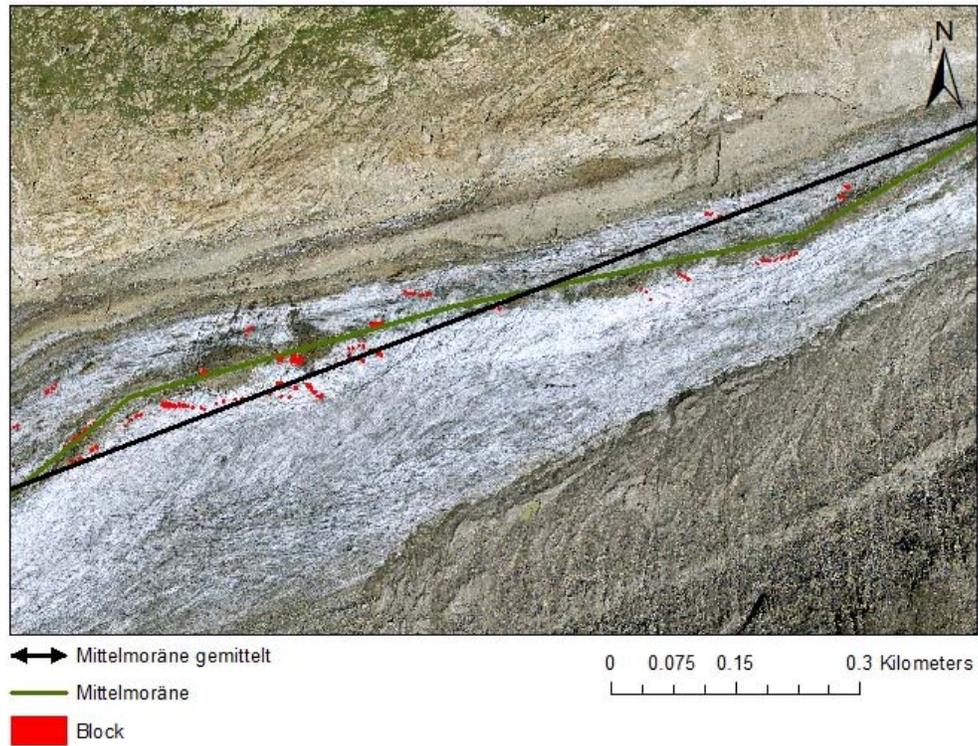


Abbildung 11.12 Kartenausschnitt des Oberaargletschers 2012.

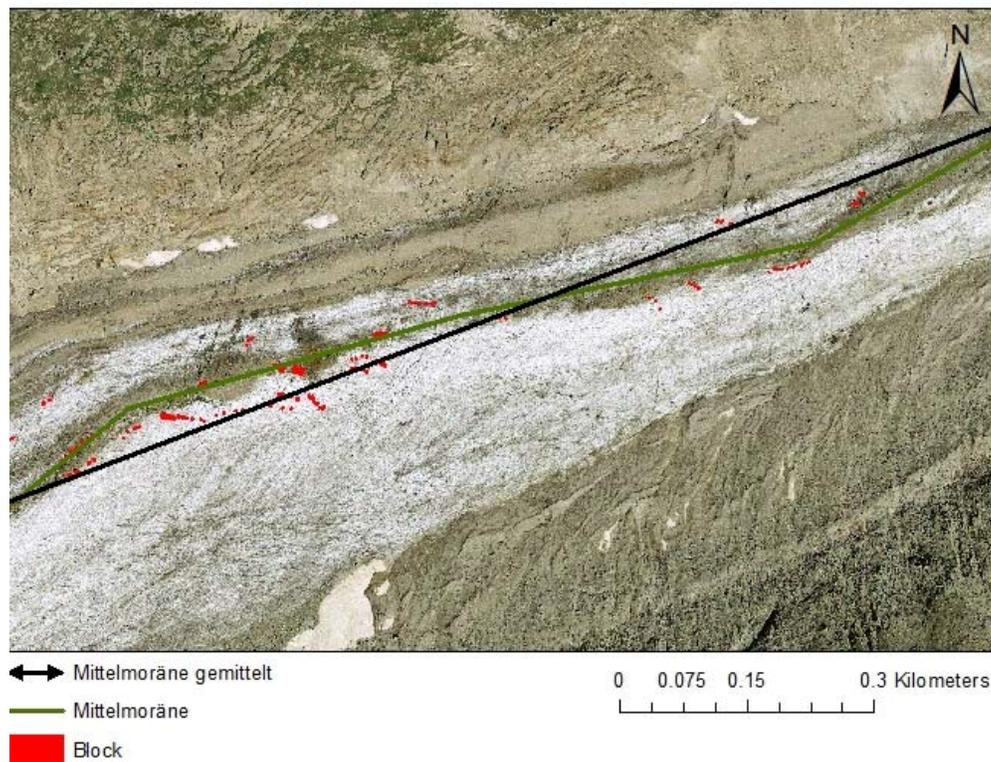


Abbildung 11.13 Kartenausschnitt des Oberaargletschers 2013.

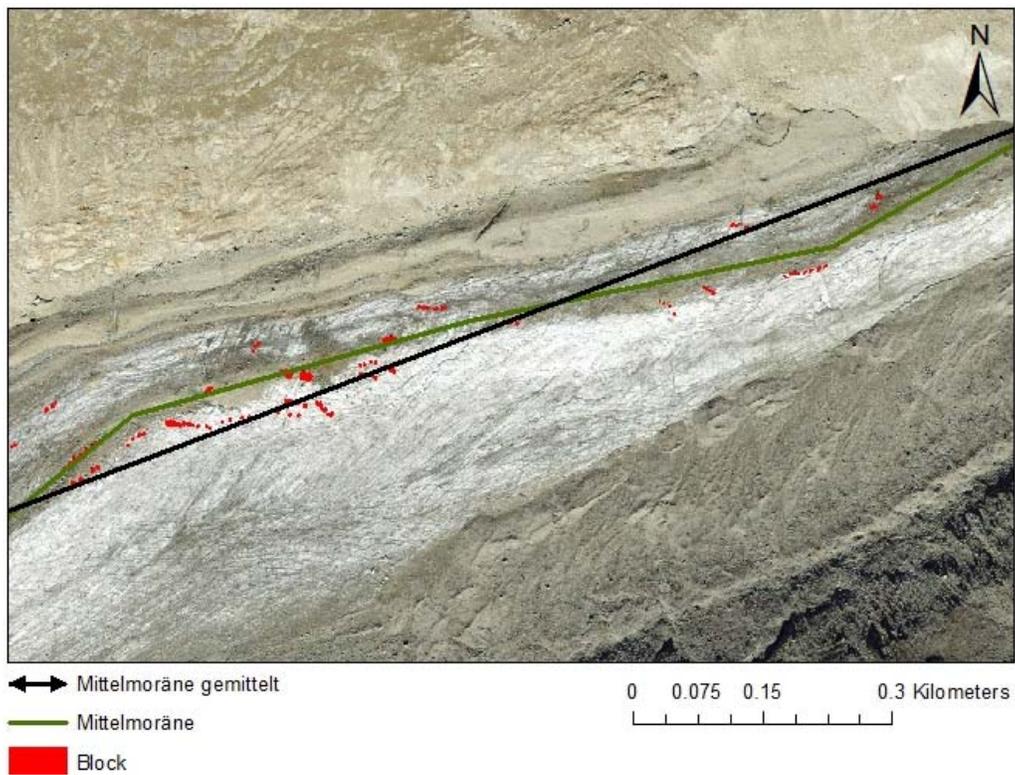


Abbildung 11.14 Kartenausschnitt des Oberaargletschers 2014.

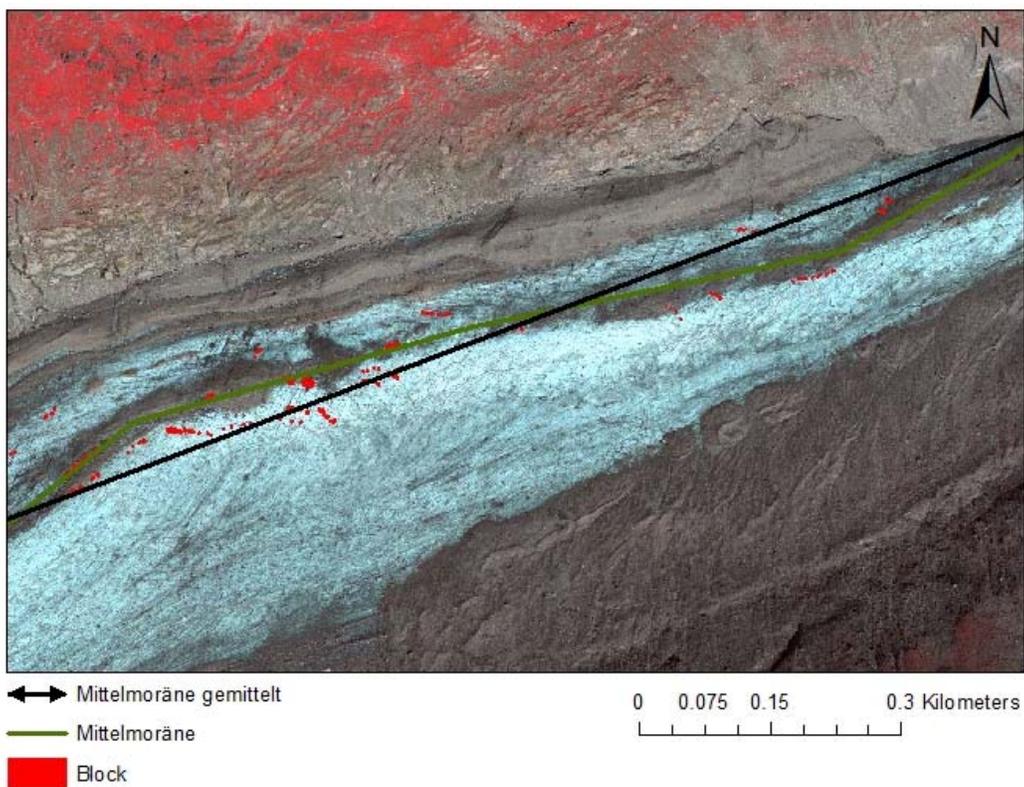


Abbildung 11.15 Kartenausschnitt des Oberaargletschers 2015.

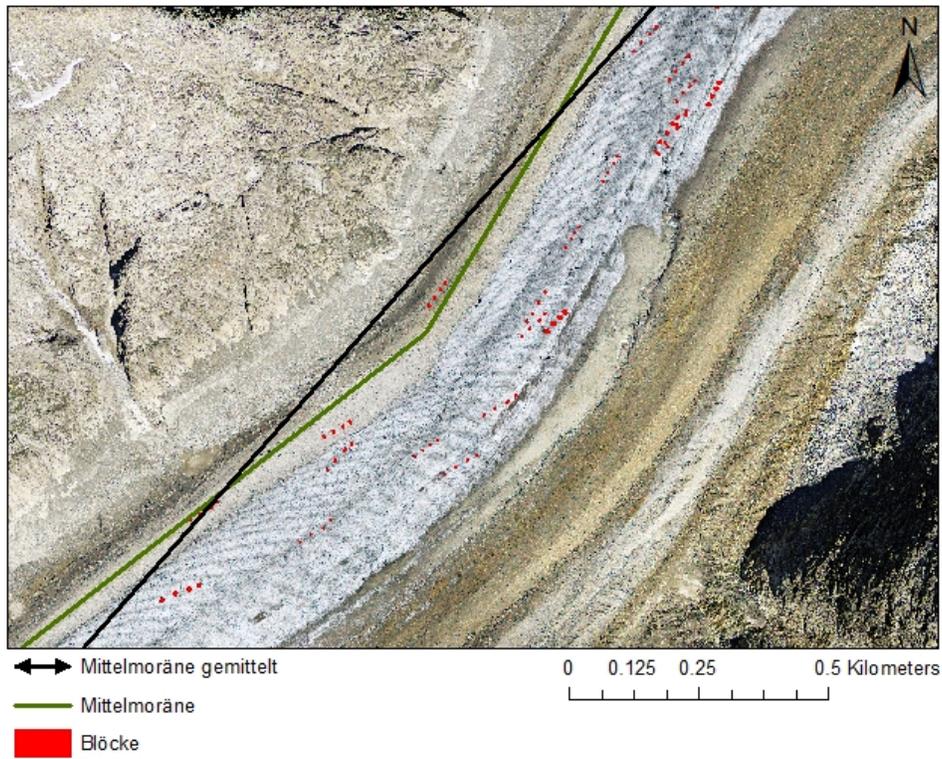


Abbildung 11.16 Kartenausschnitt des Unteraargletschers 2012.

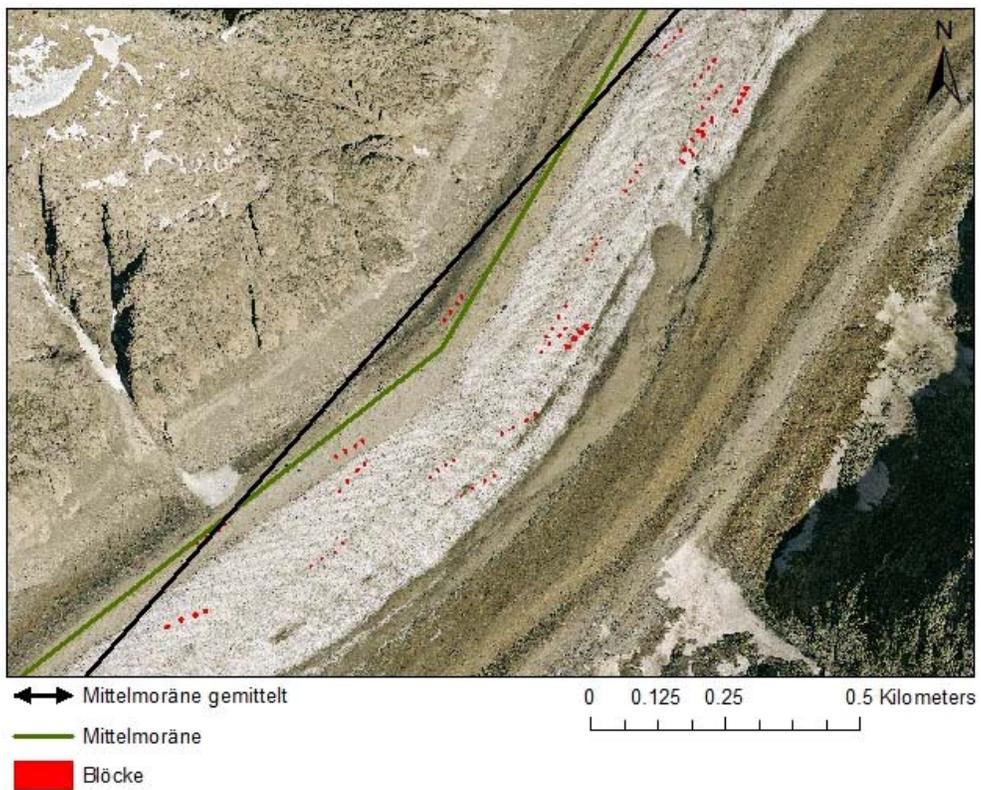


Abbildung 11.17 Kartenausschnitt des Unteraargletschers 2013.

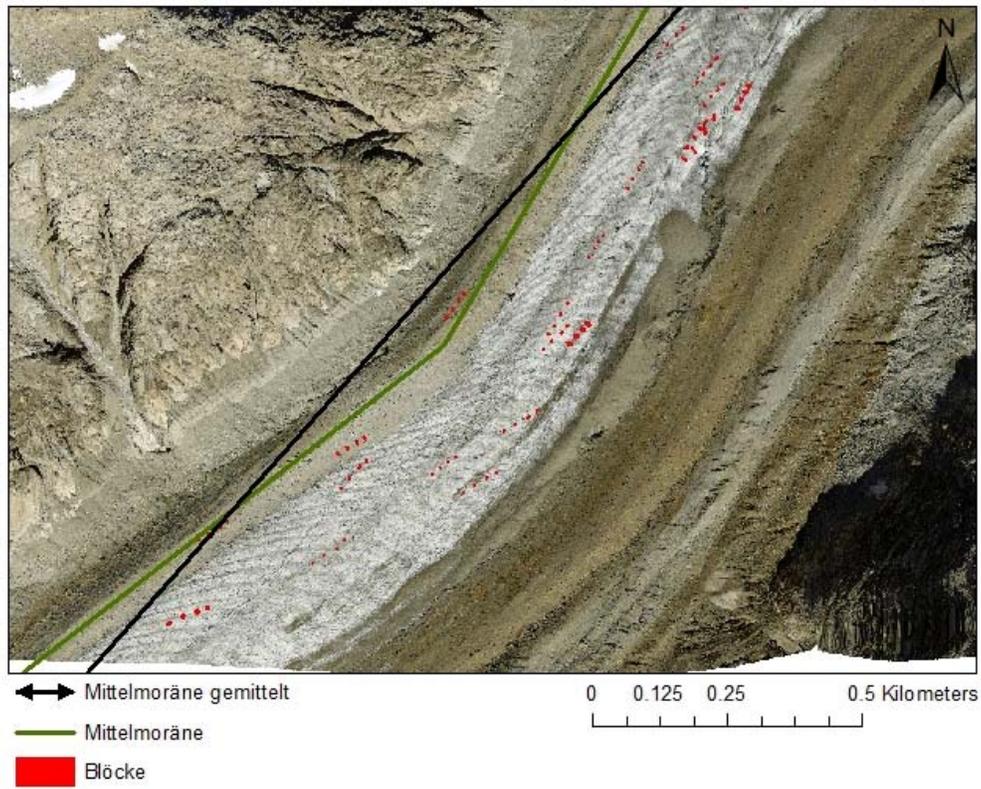


Abbildung 11.18 Kartenausschnitt des Unteraargletschers 2014.

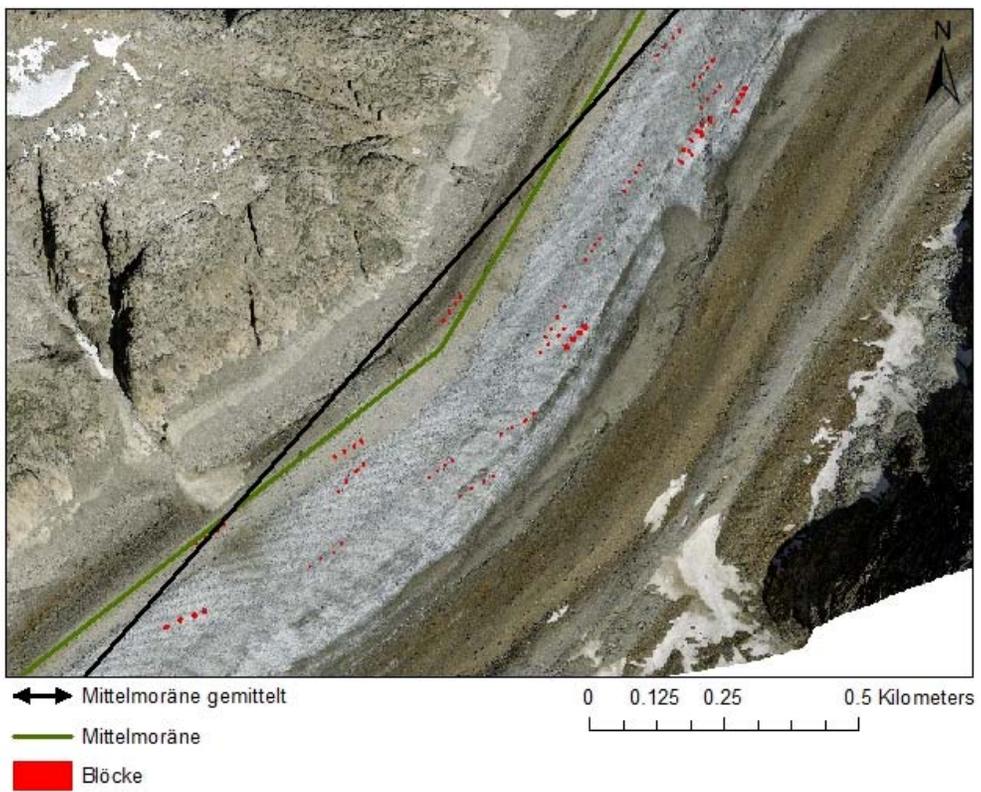


Abbildung 11.19 Kartenausschnitt des Unteraargletschers 2015.

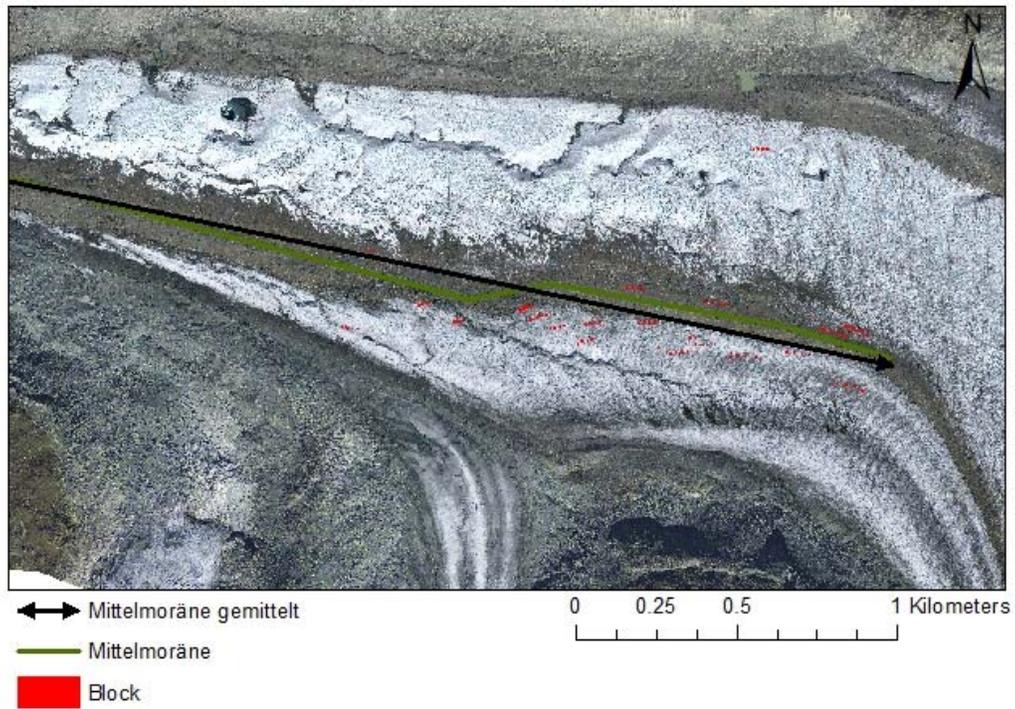


Abbildung 11.20 Kartenausschnitt des Gornergletschers 2012.

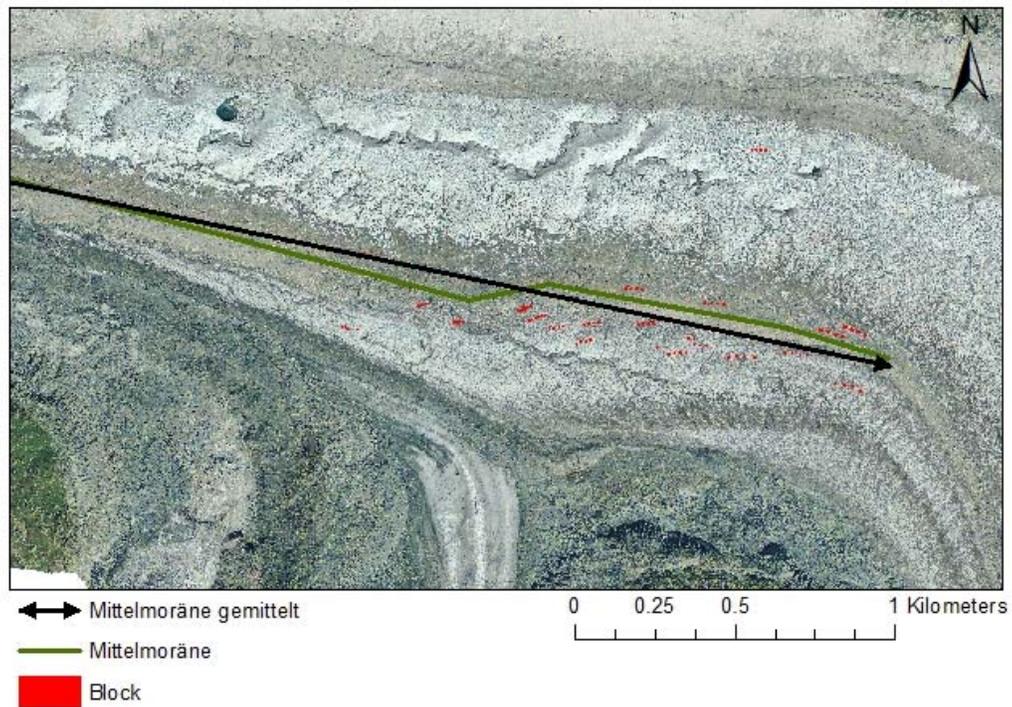


Abbildung 11.21 Kartenausschnitt des Gornergletschers 2013.

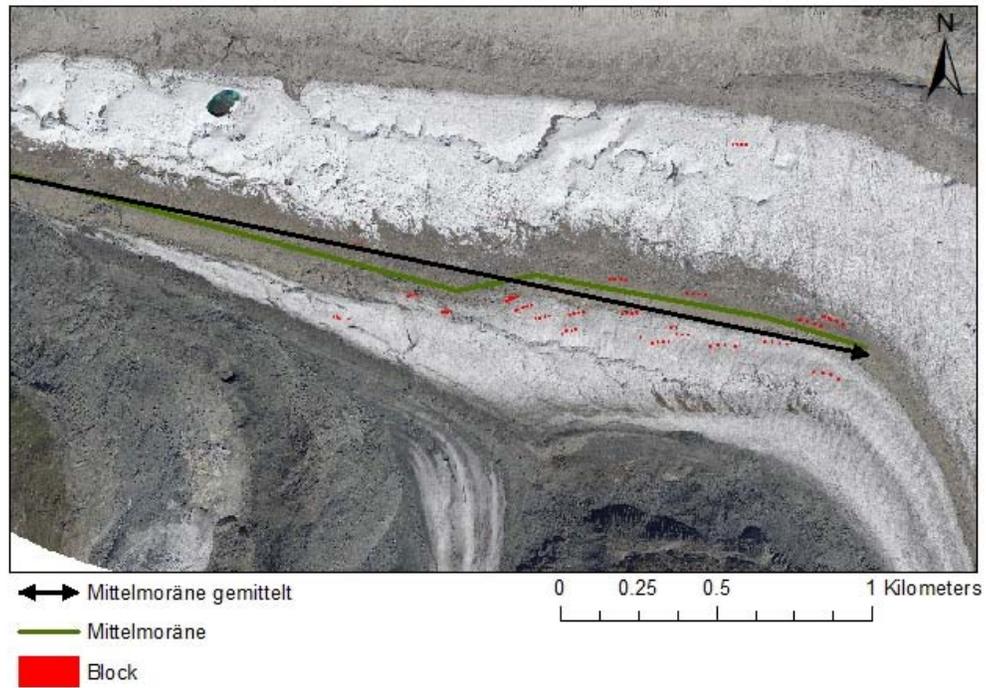


Abbildung 11.22 Kartenausschnitt des Gornergletschers 2014.

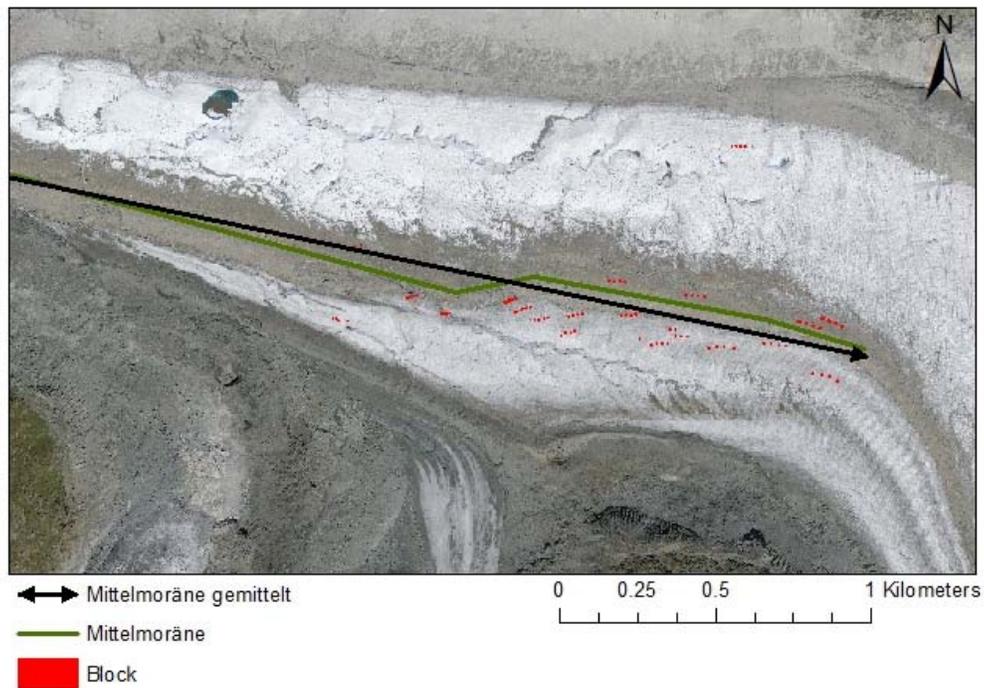


Abbildung 11.23 Kartenausschnitt des Gornergletschers 2015.

## 11.3. Schmelzwerte

Tabelle 11.1 Schmelzwerte von OA1 in der Messperiode 2016. Alle Werte sind in Zentimeter angegeben.

Oberaargletscher 2016	Stange	Schmelze	Einbohrtiefe (Überstand)	Durchschnittliche gemessene Schmelze
<b>16. Aug</b>	OA1S		7cm	
	OA1W		15cm	
	OA1N		7cm	
	OA1E		113cm	
<b>10. Sep</b>	OA1S	73cm	35cm	
	OA1W	110cm	35cm	
	OA1N	108cm	30cm	
	OA1E	>113cm	40cm	101
<b>07. Okt</b>	OA1S	59cm	94cm	
	OA1W	61cm	96cm	
	OA1N	63cm	93cm	
	OA1E	78cm	108cm	65,25
<b>Kumulative Schmelze OA (16.8-7.10)</b>				166,25

Tabelle 11.2 Schmelzwerte von PE1 und PE2 in der Messperiode 2016. Alle Werte sind in Zentimeter angegeben.

Persgletscher	Stange	Schmelze (cm)	Einbohrtiefe (Überstand nach erneutem Einbohren)	Durchschnittliche kumulative Schmelze(cm)
<b>23. Aug</b>	PE1N		30cm	
	PE1S		14cm	
	PE2N		80cm	
	PE2S		46cm	
<b>20. Sep</b>	PE1N	141	57cm	
	PE1S	107	17cm	
	PE2N	92	79cm	
	PE2S	117	0cm	114,25

Tabelle 11.3 Schmelzwerte des Blockes OA1 in der Messperiode 2017. Alle Werte sind in Zentimeter angegeben.

<b>OA1 2017</b>	<b>Ablationsstange</b>	<b>Im Eis (cm)</b>	<b>Kum. Schmelze</b>	<b>Durchschnittl. Kum. Schmelze</b>
<b>02. Jul</b>	Nord	429		
	Ost	434		
	Süd	421		
	West	434		
<b>18. Jul</b>	Nord	307	122	
	Ost	318	116	
	Süd	300	121	
	West	313	121	120
<b>05. Aug</b>	Nord	195	234	
	Ost	207	227	
	Süd	198	223	
	West	200	234	229,5
<b>16. Aug</b>	Nord	148	281	
	Ost	166	268	
	Süd	162	259	
	West	166	268	269

Tabelle 11.4 Schmelzwerte des Blockes OA2 in der Messperiode 2017. Alle Werte sind in Zentimeter angegeben.

<b>OA2 2017</b>	<b>Ablationsstange</b>	<b>Im Eis (cm)</b>	<b>Kum. Schmelze</b>	<b>Durchschnittl. Kum. Schmelze</b>
<b>02. Jul</b>	Nord	425		
	Ost	431		
	Süd	430		
	West	434		
<b>18. Jul</b>	Nord	318	107	
	Ost	320	111	
	Süd	315	115	
	West	332	102	108,75
<b>05. Aug</b>	Nord	210	215	
	Ost	206	225	
	Süd	203	227	
	West	220	214	220,25
<b>16. Aug</b>	Nord	170	255	
	Ost	171	260	
	Süd	170	260	
	West	186	248	255,75

Tabelle 11.5 Schmelzwerte des Blockes OA3 in der Messperiode 2017. Alle Werte sind in Zentimeter angegeben.

<b>OA3 2017</b>	<b>Ablationsstange</b>	<b>Im Eis (cm)</b>	<b>Kum. Schmelze</b>	<b>Durchschnittl. Kum. Schmelze</b>
<b>02. Jul</b>	Nord	412		
	Ost	425		
	Süd	434		
	West	414		
<b>18. Jul</b>	Nord	294	118	
	Ost	313	112	
	Süd	318	116	
	West	299	115	115,25
<b>05. Aug</b>	Nord	182	230	
	Ost	200	225	
	Süd	200	234	
	West	181	233	230,5
<b>16. Aug</b>	Nord	137	275	
	Ost	157	268	
	Süd	163	271	
	West	138	276	272,5

## 12. Persönliche Erklärung

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

Datum / Unterschrift