UNIVERSITÉ DE FRIBOURG
UNIVERSITÄT FREIBURG

Département de Géosciences, Unité de Géographie
Departement für Geowissenschaften, Einheit Geographie

Welchen Wert hat 1m^3 gerettetes Eis?



Bachelorarbeit

5. Mai 2019

Ursina Schwyn
ursina.schwyn@unifr.ch
16-207-888
Route des Arsenaux 39
1700 Fribourg

Betreuer:
Dr. Matthias Huss
matthias.huss@unifr.ch

Inhaltsverzeichnis

Abstract 1

1. Einleitung 2

2. Methoden zur Beeinflussung der Schnee- und Eis-Massenbilanz 4

2.1. Vorstellung vier verschiedener Methoden 4

2.2 Fokus: Gletscherabdeckung 7

3. Datenerhebung 12

3.1 Auswahl der Skigebiete 12

3.2 Erhebungsmethode 13

4. Datenbearbeitung 15

4.1 Kostenrechnung 18

4.2 Herausforderungen bei der Datenverarbeitung 25

5. Resultate 26

5.1 Quantitative Resultate 26

5.1.1 Evolution der Abdeckungen 26

5.1.2 Kosten der Abdeckungen 29

5.1.3 Sensitivitätsstudie 32

5.2 Qualitative Ergebnisse 34

6. Diskussion 39

7. Fazit 42

Bibliographie 44

Tabellenverzeichnis 47

Abbildungsverzeichnis 48

Abbildungsverzeichnis des Anhangs 49

Anhang 50

Abstract

Viele Schweizer Alpengletscher ziehen sich zurück. Das spüren auch die Skigebiete, welche auf die Gletscher angewiesen sind. Ihre Infrastruktur ist mit den Gletschern verbunden und leidet unter dem Schwund. Viele Skigebiete haben deshalb begonnen während der Sommermonate Gletscherabdeckungen vorzunehmen, um die Schmelzrate zu verringern. Dadurch kann die Infrastruktur geschützt werden und gleichzeitig können durch die Abdeckungen auch Schneehaufen übersommert werden, welche in der kommenden Saison verstossen werden, um die Pisten zu präparieren. Dadurch muss weniger künstlich beschneit werden und die Skigebiete sind weniger auf frühen Schneefall angewiesen. In dieser Arbeit wird mittels von den Skigebieten erhaltener Daten sowie bereits bestehenden Daten zu den Gletschern analysiert, wie teuer Gletscherabdeckungen sind. Die Berechnungen zeigen, dass ein durch Abdeckungen geretteter Kubikmeter Eis bei einer momentanen Massenbilanz von -1 m w.e. durchschnittlich CHF 5.40 kostet. Hochrechnungen ergeben, dass das Abdecken von 10% aller Schweizer Gletscher gut eine Milliarde Schweizerfranken kosten würde. Dies ist ein sehr hoher Preis, um die Gletscherschmelze einige Jahre nach hinten zu verschieben.

Schlüsselwörter: Gletscher, Gletscherabdeckungen, Effizienz, Kosten

1. Einleitung

Die Gletscherschmelze ist seit Jahrzehnten ein grosses Thema. Seit dem Ende der kleinen Eiszeit, um 1850, leiden die europäischen Alpengletscher unter grossen Eisvolumenverlusten (Vincent, 2002; Kaser et al., 2006; Ohmura et al., 2007). In den Alpen ist die Erwärmung über die letzten Dekaden mehr als doppelt so gross wie im globalen Durchschnitt (Oerlemans et al., 2017). Der Gletscherrückzug sowie der Massenverlust haben Skiliftstationen und Skilift-Pylonen isoliert. Dadurch mussten einige Skipisten und Skilifte an einen anderen Ort verschoben werden. Weil es immer mehr eisfreie Gebiete gibt, wird zu Beginn der Saison mehr Schnee benötigt, um gute Skipisten bereitstellen zu können. Die Unterhaltskosten für die Pistenpräperation und die Vorbereitung der Liftanlagen und der Pisten steigen stetig (Olefs und Fischer, 2008). Da die Skigebiete so früh wie möglich die Saison eröffnen und die Touristen gute Bedingungen vorfinden wollen, investieren die Skigebiete in verschiedene Massnahmen, um diese zu gewährleisten.

Um das Schmelzen der Gletscher und die daraus folgenden Konsequenzen etwas einzudämmen, gibt es verschiedene Methoden. Diese werden von den Skigebieten angewandt und können dem Schmelzen nur kleinräumig entgegenwirken. Dabei handelt es sich um folgende Methoden: die Wasserinjektion, die Kompaktion und die Gletscherabdeckung (Olefs und Fischer, 2008). Während zwei Jahren, von 2004 bis 2005, wurde ein Forschungsprojekt in den österreichischen Alpen durchgeführt, welches die drei Methoden verglichen hat mit dem Ziel, die effektivste Methode zu finden (Olefs und Fischer, 2008). Bei der Wasserinjektion wird Wasser in die Schneeschicht injiziert, um die Schneeschicht zu härten. Durch Pistenfahrzeuge kann die Schneeschicht auf den Gletschern verdichtet werden, was bei der Kompaktion gemacht wird. Bei der Gletscherabdeckung werden Ende des Winters Textilien auf dem Schnee ausgelegt, welche den Sommer über dort liegen bleiben. Diese reflektieren die Sonnenstrahlung mehr als die Schneeschicht selbst, wodurch weniger Schnee schmilzt während der Wärmeperiode im Sommer. Im Herbst, vor dem ersten Schnee, werden die Textilien wieder entfernt (Olefs und Fischer, 2008; Olefs und Obleitner, 2007). Das Projekt kam zum Ergebnis, dass die Abdeckung des Gletschers mit Vliesen im Sommer die effektivste Methode zur Verringerung der Abschmelzung ist (Olefs und Fischer, 2008; Mountain Manager, 2007). Aus diesem Grund wird die Methode der Gletscherabdeckung in dieser Arbeit im Fokus stehen.

Die Sonneneinstrahlung, welche auf den Gletscher trifft, bringt den Schnee bei einer nicht vorhandenen Abdeckung rasch zum Schmelzen. Falls eine Abdeckung vorgenommen wurde, wird dadurch, vereinfacht gesagt, die Einstrahlung vermehrt reflektiert und damit kann die Energiebilanz zum Positiven für den Gletscher beeinflusst werden (Olefs und Fischer, 2008; Olefs

und Obleitner, 2007). Zu diesem Zweck wird jeweils Ende Winter der Schnee eines Gletschers mit Vlies, Holzchips oder anderen Materialien abgedeckt. Damit kann nicht nur erreicht werden, dass kein Eis schmilzt, sondern dass noch mehrere Dezimeter Schnee aus dem Winter erhalten bleiben. Das bedeutet, dass man gar einen Massengewinn erzielen kann (Mountain Manager, 2007; Olefs und Fischer, 2008). So kann die Isolierung von Skilift-Pylonen und Skiliftstationen eingedämmt oder verhindert werden. Auch der Zugang zu den Pisten kann dadurch wieder verbessert werden.

In der nahen Zukunft wird ein beträchtlicher Rückzug der Alpengletscher erwartet (Jouvet et al. 2009), welcher unter anderem grossen Einfluss auf den Tourismus haben wird (Bürki et al., 2003; Oerlemans et al., 2017). Für den Skitourismus ist die Gletscherabdeckung von sehr grosser Bedeutung, da so der Rückzug etwas verlangsamt werden kann. Die Schmelzreduktion, die daraus erfolgt, hat verschiedene indirekte Einflüsse. Zum einen können so die Skilift-Pylonen der Bergbahnen auf dem Gletscher gestützt, zum anderen kann der Schnee von Snowparks übersommert werden. Wie fast alles, ist auch dies mit enormen Kosten verbunden. Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, *wie viel 1 m^3 gerettetes Eis durch Gletscherabdeckungen kostet*.

Um diese Frage zu beantworten, wurden in dieser Arbeit alle Schweizer Skigebiete, von denen bekannt ist, dass sie Gletscherabdeckungen vornehmen, zu den Investitionskosten der Abdeckungen und den Erfahrungen mit der Methode der Gletscherabdeckung befragt. Mit den dadurch erhobenen quantitativen Daten soll zum einen eine detaillierte Kostenrechnung aufgestellt werden und sollen zum anderen neue Erkenntnisse über die Erfahrungswerte im Zusammenhang mit dieser Methode gewonnen werden. Mittels eines Computerprogramms können durch verschiedene bekannte Parameter und neu in Erfahrung gebrachte Variablen die Gesamtkosten der Gletscherabdeckungen an einem Standort sowie die Schmelzreduktion, welche durch die Abdeckung erreicht wurde, berechnet werden. Aus diesen beiden Werten können die Kosten pro m^3 gerettetem Schnee oder Eis berechnet werden.

In einem ersten Schritt werden in dieser Arbeit auf die drei wichtigsten Methoden zur Beeinflussung der Massenbilanz von Schnee oder Eis eingegangen und die Methoden miteinander verglichen – mit Fokus auf die Gletscherabdeckung. Des Weiteren werden die Datenerhebung sowie die Analyse der Daten erläutert und die qualitativen und quantitativen Resultate dargestellt. In einer Diskussion werden die Ergebnisse gesamtheitlich betrachtet und miteinander verglichen. Zuletzt werden die Ergebnisse in Relation zu bisherigen Erkenntnissen gesetzt und Schlussfolgerungen aus der Arbeit gezogen.

2. Methoden zur Beeinflussung der Schnee- und Eis-Massenbilanz

2.1. Vorstellung vier verschiedener Methoden

Bisher sind vier Methoden im Bereich der Gletscherforschung bekannt, um die Schnee- und Eis-Massenbilanz zu beeinflussen. Wenn keine Massnahmen vorgenommen werden, ist die Massenbilanz des Gletschers mit wenigen jährlichen Ausnahmen negativ. Dies bedeutet, dass der Massenverlust, die Ablation, gegenüber dem Massengewinn, der Akkumulation, dominierend ist. Daraus folgt, dass die Gletscher zurückgehen. Um dem nun entgegenzuwirken, wird mittels der vier Methoden entweder die Akkumulationsrate erhöht oder die Ablationsrate reduziert.

- Die erste Methode ist die *Wasserinjektion.* Dabei wird flüssiges Wasser in die Schneedecke injiziert, wodurch die Akkumulationsrate positiv beeinflusst wird, und die Masse der Schneedecke steigt durch das Wiedergefrieren des Wassers. Dadurch soll erreicht werden, dass durch die grössere Masse mehr Energie benötigt wird, um sie zu schmelzen. So sollte der Schmelzvorgang länger dauern, so dass am Ende der Schmelzperiode eine weniger negative oder gar positive Massenbilanz erreicht werden kann (Olefs und Fischer, 2008). Diese Methode eignet sich besonders, um Skipisten zu präparieren. Da das Wasser in 30 cm Tiefe in die Schneeschicht injiziert wird, vereist die Oberfläche nicht wie bei einer Präparation mit Wasser an der Oberfläche. Die Piste wird durch die Injektion so härter und damit auch resistenter gegen mechanische Beanspruchung. Zudem bricht die Piste nicht und ist weniger temperaturanfällig. Diese Methode ist kostengünstig, da als Verbrauchsmaterial nur reines Wasser genutzt wird ohne chemische Zusätze (Steinbach Alpin, 2019). In einem Experiment von Olefs und Fischer (2008) wurden in ein Gebiet von 104m^2 etwa 2'400 l Wasser injiziert. Daraus resultiert ein mittlerer Massengewinn von ungefähr 23.1 l / m^2 zum Zeitpunkt der Injektion. Im Experiment konnte am Ende des Sommers jedoch kein Massengewinn verzeichnet werden mit der Injektionsmethode.
- Mit der zweiten Methode, der *Kompaktion,* kann die Dichte der Winterschneedecke erhöht werden. Durch diese Verdichtung kann die Wärmeleitfähigkeit der Schneedecke gesteigert werden. Da die Schneedecke durch die gesteigerte Wärmeleitfähigkeit zu Beginn der Schmelze die Wärme besser ableitet, ist diese kühler, woraus geringere Schmelzraten resultieren. Die Kompaktion geschieht entweder nur durch Pistenfahrzeuge, wie sie für die normale Präparation von Skipisten verwendet werden, oder mittels speziellen Verdichtungsmaschinen, welche an Pistenfahrzeuge angebracht werden können (Olefs und Fischer, 2008). In einem Experiment, welches von Olefs und

Obleitner (2007) in der Saison 2003/04 durchgeführt wurde, wurde die Neuschneedecke nach jedem Schneefall mit Pistenfahrzeugen kompaktiert. Die Schneedecke wurde auf 200, 250, 350, 400 und 500 kg/m^3 kompaktiert. Am Ende des Experimentes konnte maximal, verglichen mit dem Referenzlauf, ein Wasseräquivalent von 218 kg/m^2 eingespart werden, was 0.17 m Schnee bei einer Dichte von 500 kg/m^3 entspricht. Die Gletscherschmelze konnte gesamthaft um etwa 5% reduziert werden. In Abbildung 1 ist ersichtlich, dass die Kompaktion, unabhängig von deren Dichte, kaum einen Einfluss auf die Schmelze im Vergleich zum Referenzlauf hat.

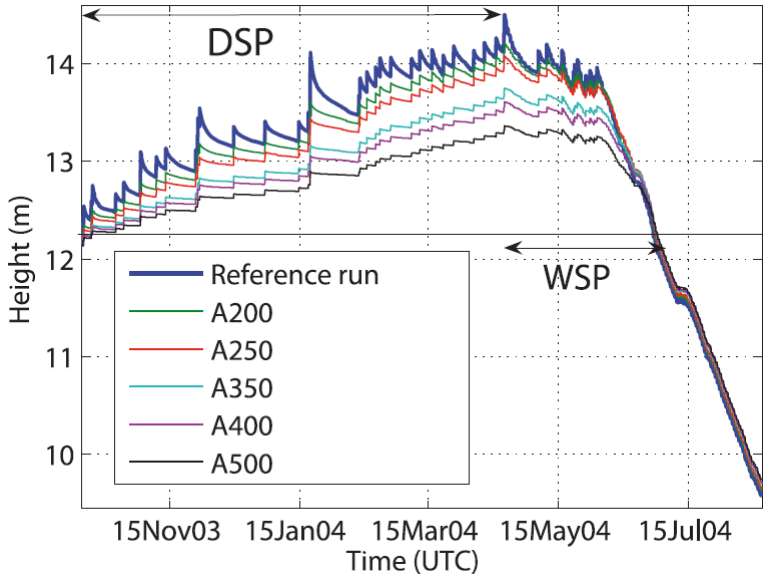


Abbildung 1: Entwicklung der Oberflächenhöhe bei verschieden dichten Kompaktionen der Schneedecke im Vergleich zum Referenzlauf (Olefs und Obleitner, 2007)

- Die dritte Methode ist die *künstliche Produktion von Sommerschnee* auf dem Gletscher. Dadurch kann Masse zum Gletscher hinzugefügt werden, und gleichzeitig kann die Albedo (reflektierte kurzwellige Sonnenstrahlung) der Oberfläche erhöht werden. Neuschnee hat eine grössere Albedo als der sich auf dem Gletscher befindende Schnee oder das Eis, somit wird die Energie, welche für das Schmelzen verfügbar ist, reduziert. Durch die zusätzliche Schneeschicht kann die darunter liegende Eisschicht vor dem Schmelzen geschützt werden. So kann eine positive oder zumindest weniger negative Massenbilanz erreicht werden. Die Beschneiung im Sommer erfolgt mittels des Schmelzwassers, welches auf diese Art und Weise recycelt werden kann. Zuunterst auf dem Gletscher kann nicht künstlich beschneit werden im Sommer, da es zu warm ist. Somit ist das obere Ablationsgebiet am besten geeignet, um zu beschneien. Die Idee ist es, eine möglichst grosse Fläche mit Kunstschnee zu bedecken, so dass das Gletschereis nicht zum Vorschein kommt. Die Beschneiung sollte so früh wie möglich begonnen

werden, da nur an 2-3% der Sommertage Kunstschnee hergestellt werden kann, da es meistens zu warm ist. Bis die Sommerbeschneiung an der Gletscherzunge des studierten Morteratschgletschers eine Wirkung zeigen wird, dauert es zehn Jahre aufgrund der vorliegenden Topographie. Nach diesen zehn Jahren beträgt der Unterschied in der Gletscherlänge zwischen einem sommerbeschneiten Gletscher und einem nicht sommerbeschneiten Gletscher 400 bis 500 m in einer Dekade. Je nach Szenario, welches gewählt wurde, variiert der prognostizierte Gletscherrückgang stark. Die Auswirkungen der Sommerbeschneiung wurden am Morteratschgletscher modelliert. (Oerlemans et al., 2017).

- Die vierte Methode zur Verminderung der Eis- und Schneeschmelze ist die *Abdeckung.* Dabei wird die Schneeoberfläche im Frühling abgedeckt, was einen direkten Impakt auf die Komponenten der Energiebilanz der darunterliegenden Schneeschicht hat durch die mit der Abdeckung erzielte Verminderung der Schmelze. Im folgenden Unterkapitel wird genauer auf diese Methode eingegangen, da diese effektiver ist als die anderen, was aus Feldstudien hervorgeht (Olefs und Obleitner, 2007). In Abbildung 2 ist ersichtlich, dass die Gletscherabdeckung verglichen mit den beiden erstgenannten Methoden die einzige Methode ist mit einem deutlichen Effekt. Die Gletscherschmelze kann durch Abdeckungen um rund 60% reduziert werden (Olefs und Fischer, 2008).

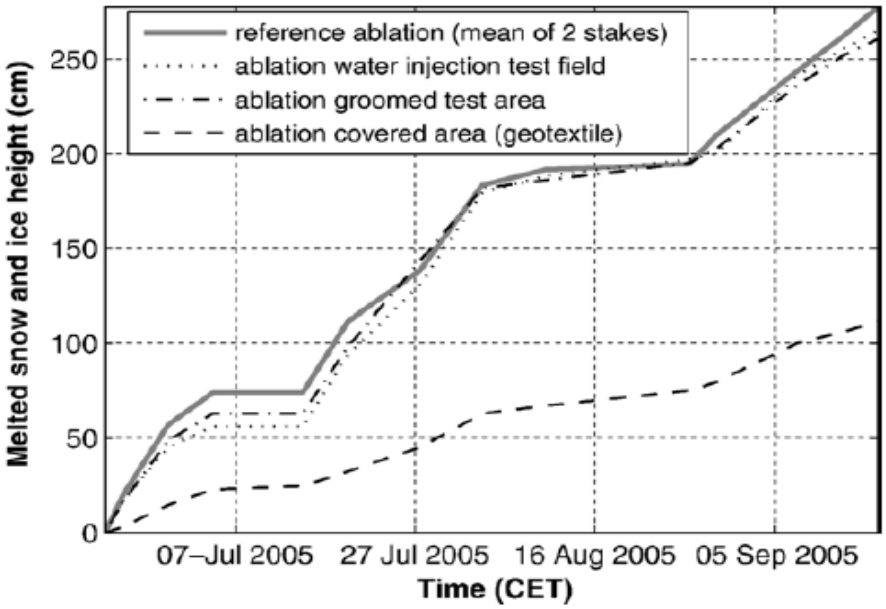


Abbildung 2: Ablation in Form der Schneehöhe der verschiedenen getesteten Methoden (Olefs und Fischer, 2008)

Nebst den vier erwähnten Methoden, deren Ziel die Reduktion der Ablation von Eis und Schnee ist, gibt es eine weitere Methode, welche dazu dient die Pisten früher eröffnen zu können.

- Beim *Snowfarming* werden am Ende der Skisaison Schneehaufen, welche aus künstlichem oder natürlichem Schnee bestehen können, zusammengetragen. Diese werden bis zum Beginn der kommenden Saison mit Geotextilien abgedeckt. So können diese Schneemassen zu Beginn der folgenden Saison verstossen werden, um die Pisten frühzeitig mit genügend Schnee zu versorgen (Kontaktperson Engelberg Titlis).

2.2 Fokus: Gletscherabdeckung

Bei der Methode der Gletscherabdeckung wird die Gletscheroberfläche vom Frühling, wenn jeweils das Maximum der Schneehöhe erreicht ist, bis im Herbst, dem Ende der Ablationsperiode, abgedeckt. In Abbildung 3 bis Abbildung 5 sind die Abdeckungen im Sommer zu sehen, Abbildung 6 zeigt, wie viel Schnee- und Eisschmelze mittels Gletscherabdeckungen eingespart werden kann in einem Sommer. Dazu eignen sich verschiedene Materialien, welche von verschiedenen Forschern getestet und optimiert wurden (Olefs und Fischer, 2008). Es handelt sich einerseits um natürliche Abdeckungen wie Sägemehl oder Holzchips, andererseits um künstliche Textilien. Holzchips werden beispielsweise als Isolationsschicht über der Schneedecke verwendet, die Schmelzrate konnte dabei um 70% bis 85% verringert werden, abhängig von der Dicke der Holzchipsschicht. Bereits eine natürliche Schuttabdeckung auf einem Gletscher reduziert die Schmelzrate im Vergleich zu einem unbedeckten Gletscher um 35% bis 85% (Olefs und Fischer, 2008). Auf die Verwendung von biologisch abbaubaren Materialen wird häufig bewusst verzichtet, da diese Nährstoffe für Mikroben liefern und somit eine drastische Veränderung des Ökosystems herbeiführen (Mountain Manager, 2007).

Wie bei allen genannten Methoden geht es auch bei der Gletscherabdeckung darum, die Komponenten der Energiebilanz zu verändern. Am wichtigsten dabei sind die kurz- sowie langwellige Strahlung sowie turbulente Wärmeflüsse. Die genaue Beschreibung der damit verbundenen Prozesse ist mangels detaillierter Messungen noch nicht möglich. Diese sind Gegenstand derzeitiger und zukünftiger Forschung auf diesem Gebiet. Dennoch können einige Ideen von möglichen Mechanismen vorgestellt werden: Einerseits wird die reflektierte kurzwellige Strahlung beeinflusst durch die Albedo (Reflektion der kurzwelligen Wellen) der Abdeckung, welche sich von der Albedo des Gletschers unterscheidet. Sofern eine Oberfläche eine tiefe Albedo aufweist, wird viel kurzwellige Strahlung reflektiert, was zu einer tiefen Oberflächentemperatur führt. Andererseits ist die langwellige, emittierte Strahlung Funktion des Emissionsgrades und der Oberflächentemperatur (Olefs und Obleitner, 2007).



Abbildung 3: Geotextilien auf der Diavolezza (Südostschweiz, 2018)



Abbildung 4: Gletscherabdeckung auf der Zunge des Rhonegletschers (Alean, 2016)



Abbildung 5: Gurschengletscher Andermatt, Mitte September 2005, kurz vor der Enthüllung (Bildarchiv Andermatt Gotthard Sportbahnen AG, 2005)



Abbildung 6: Testgebiet auf dem Schaufelferner (AU) nach der Wegnahme der Geotextilien am Ende einer Ablationsperiode (Olefs und Fischer, 2008)

Der Emissionsgrad, auch Emissivität genannt, ist ein Mass dafür, wie stark ein Material Wärmestrahlung mit seiner Umgebung austauscht. Ein Körper mit einer Emissivität von 1 emittiert maximal, also die gesamte absorbierte Wärme wird emittiert. Ein Körper mit einer Emissivität von 0 tauscht keinerlei Wärmestrahlung mit der Umgebung aus (RP-Energie-Lexikon, o.D.). Olefs und Obleitner (2007) vermuten, dass die turbulenten Flüsse und der latente Wärmeaustausch von der Abdeckung zu einem gewissen Grad gehemmt werden. Das würde dazu führen, dass der Massenverlust durch Sublimation oder Evaporation sowie der Massengewinn durch Kondensation und Resublimation reduziert werden (Olefs und Obleitner, 2007).

Folgende Eigenschaften des Abdeckungsmaterials können die Wirkung der Abdeckung beeinflussen:

- Die *Permeabilität* der Abdeckung bestimmt die Menge an Energie, welche durch flüssigen Niederschlag ins System gelangt (Olefs und Obleitner, 2007).
- Die *Strahlungseigenschaften* bestimmen, wie viel kurzwellige Strahlung reflektiert und wie viel langwellige Strahlung emittiert wird (Olefs und Fischer, 2008).

- *Thermische Eigenschaften* spielen einen wichtige Rolle für den Austausch von fühlbarer Wärme zwischen der Schnee-/ Eisoberfläche und der Atmosphäre (Olefs und Fischer, 2008).
- Die *Zugfestigkeit* variiert stark mit der Materialzusammensetzung. Die meisten durch Olefs und Fischer (2008) getesteten Geotextilien hatten hohe Werte der Zugfestigkeit, so dass sie Windböen, welche an Einsatzgebieten oft vorkommen, standhalten konnten.
- Die *Oberflächenrauheit* der Textilien bestimmt die Scherfestigkeit zwischen der Abdeckung und dem darunterliegenden Material. Ist diese zu gering, kann das Material kaum fixiert werden. Des Weiteren kann eine zu geringe Oberflächenrauheit auf der Oberseite des Geotextils bei einer Schneebedeckung des Textils zu einem schnelleren Abgleiten und somit zu erhöhter Lawinengefahr führen (Olefs und Fischer, 2008).
- Die *Dicke* der Abdeckung, häufig ausgedrückt als kg/m^2, beeinflusst thermische und Strahlungseigenschaften. Aus praktischen und logistischen Gründen beim Ausbringen und Einsammeln der Textilien darf dieser Wert nicht zu hoch sein (Olefs und Fischer, 2008). Es benötigt weniger Kraft und Arbeitskräfte um leichtere Textilien auf dem Gletscher auszubringen sowie einzusammeln, so dass eine unnötige Dicke nur den Aufwand erhöht. Da die Textilien während des Winters gelagert werden müssen und Platz brauchen ist es auch hier empfehlenswert, die Dicke möglichst gering zu halten.

Die Abdeckungen in den Schweizer sowie auch in den österreichischen Alpen werden mit Geotextilien vorgenommen, nicht mit Holzchips oder ähnlichem. Auch die Experimente, welche in Tabelle 1 erwähnt sind, wurden mit Geotextilien durchgeführt. Tabelle 1 fasst die mittlere Schmelzreduktion bisher durchgeführter Studien zusammen. Diese variieren von 42% bis 65%, was möglicherweise mit einer unterschiedlich langen Testperiode erklärt werden kann (Nestler et al., 2014). Die mittlere Schmelzreduktion wirkt sich linear auf die Effizienz aus (Kosten pro Quadratmeter).

Tabelle 1: Schmelzreduktion im Vergleich zur natürlichen Schmelze

Mittlere Schmelzreduktion durch Geotextilien im Vergleich zur natürlichen Schmelze	Jahr	Studie
42%	2012	Nestler et al., 2014
50%	2006	Olefs und Lehning, 2010
57%	2013	Nestler et al., 2014
60%	2005	Olefs und Fischer, 2008
65%	2004	Olefs und Obleitner, 2007

In der Schweiz werden die Gletscherabdeckungen vorwiegend mit Geotextilien der Firma Landolt in Näfels, GL gemacht. Eine Ausnahme ist bekannt, das Skigebiet Engelberg Titlis, welches Abdeckungen aus Kitzbühel von der Firma Steinbach Alpin in Oberndorf bezieht. Bis 2014 hat auch das Skigebiet Engelberg Titlis bei der Firma Landolt das Vlies bezogen, diese hat dann jedoch die Produktion der Folie, welche gekauft wurde, eingestellt.

Die Firma Landolt produziert zwei verschiedene Gletscherschutzmatten, welche im Gebrauch sind (Landolt, 2019). Deren Eigenschaften sind in Tabelle 2 aufgelistet. Die Vorteile dieser Vliese sind laut dem Hersteller die folgenden: Die Oberflächenrauheit verhindert, dass sich Neuschneelawinen bilden, die Folien sind einfach zu handhaben, die Bahnen können mit einer Gasflamme verbunden werden, die Luftdurchlässigkeit des Vlieses reduziert Sogkräfte während Sturmböen, und letztendlich weisen die Textilien eine ausgezeichnete Umweltverträglichkeit auf, da Rohstoffe eingesetzt werden, welche die sensible Flora und Fauna in Gletscherregionen nicht beeinträchtigen.

Tabelle 2: Eigenschaften der Gletscherschutztextilien der Firma Landolt, Näfels

Eigenschaften	**TenCate Toptex GLS 340**	**TenCate Toptex GLS 550**
Rohstoff	Polypropylen	Polyporpylen
Farbe	weiss	weiss
Dicke unter 2 k Pa	2.0 mm	4.5 mm
Licht-Reflexionsvermögen	78 %	78 %
Zugfestigkeit	23 kN/m	26 kN/m
Wassersäule	> 8 cm	
Lieferformen		
Länge x Breite	70 x 5 m	50 x 4 m
Fläche	350 m^2	200 m^2
Gewicht je Flächeneinheit	340 g/m^2	550
Rollengewicht	130 kg	119 kg

3. Datenerhebung

3.1 Auswahl der Skigebiete

Von 10 Schweizer Skigebieten ist bekannt, dass sie Gletscherabdeckungen verwenden. Dabei handelt es sich um die folgenden Skigebiete: Corvatsch, Diavolezza, Skiarena Andermatt-Sedrun, Laax, Titlis, Verbier, Zermatt, Saas-Fee, Glacier 3000, sowie Lauchernalp/Lötschental. Ein weiteres Gebiet stellt der Rhonegletscher dar, auf welchem durch die Abdeckungen die Eisgrotte geschützt wird (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, 2019). All diesen Skigebieten wurde eine Anfrage zu einem Telefoninterview mit einem angehängten Leitfaden zugeschickt (siehe Anhang 1). In Abbildung 7 sind die angefragten Gebiete auf der Schweizer Landeskarte markiert.

Positive Rückmeldungen gingen aus Saas-Fee, vom Titlis, sowie einem Gebiet ein, welches die Daten anonym halten möchte (alle Daten sind im Anhang zu finden). Absagen mangels Informationen oder Zeit gingen von Laax, sowie Glacier 3000 ein. Verbier liess verlauten, dass sie keine Abdeckungen mehr vornehmen (Téléverbier, 2018). Laut der CIPRA (2007) wurden in Verbier ab 2005 Abdeckungen vorgenommen, bis wann und weshalb diese Technik nicht mehr angewandt wird, konnte leider nicht herausgefunden werden. Von den übrigen Skigebieten ist keine Rückmeldung eingegangen. Vom Rhonegletscher konnten Informationen durch eine bekannte Kontaktperson erlangt werden (Farinotti, o.D.).

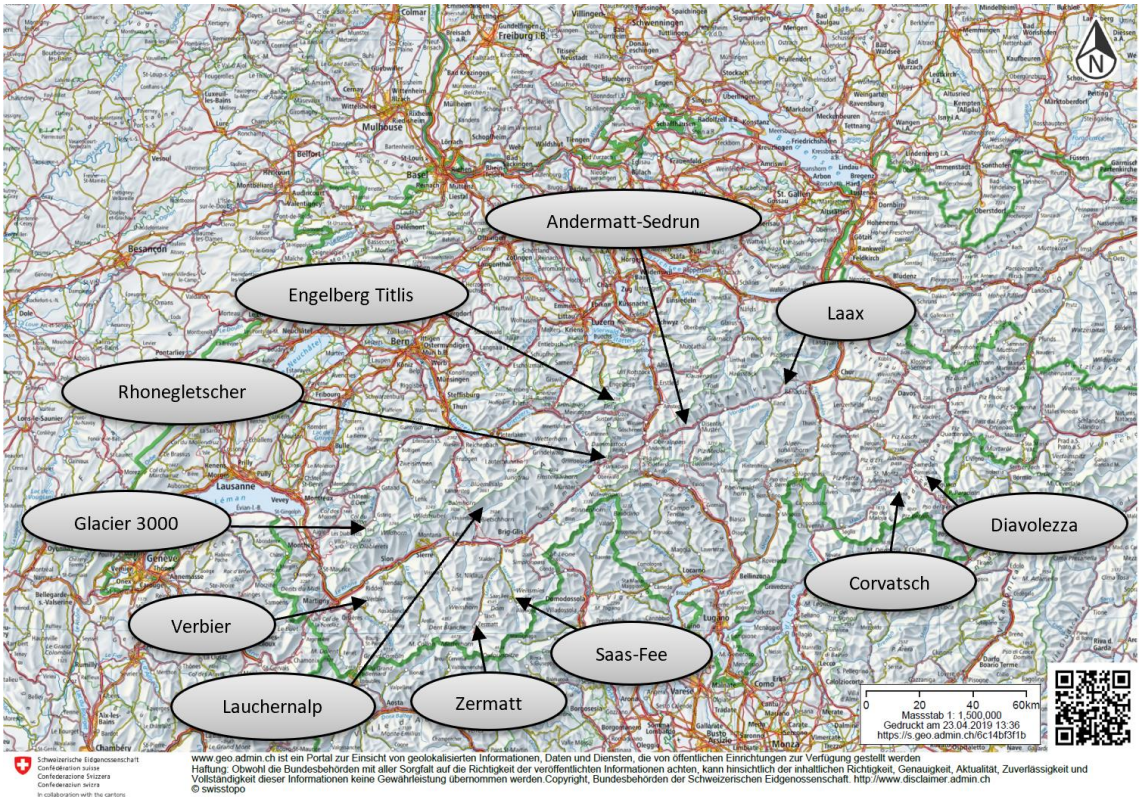


Abbildung 7: Lokalisierung der angefragten Gebiete (Bundesamt für Landestopographie, 2019)

Auch wenn von einigen Skigebieten keine Antworten eingegangen sind, konnten die Abdeckungsflächen über die Webseite des Bundesamtes für Landestopografie ermittelt werden, mit Ausnahme der Skigebiete Glacier 3000 und Lauchernalp/Lötschental. Mittels Orthophotos konnten diese Abdeckungen nicht ausfindig gemacht werden. Anhand eines Positionspapiers der CIPRA Schweiz, welches von Gletscherabdeckungen und Schneebewirtschaftung (2007) handelt, geht hervor, dass Glacier 3000 künstliche Beschneiung direkt auf Gletscherpisten praktiziert hat oder zumindest in Erwägung gezogen hat. Daher stellte sich die Frage, ob Glacier 3000 gar noch einen Schritt weiter gegangen ist und Gletscherabdeckungen vorgenommen hat. Des Weiteren wird von Matthias Huss vermutet, dass auf dem Glacier de Tsanfleuron, welcher dem Skigebiet Glacier 3000 angehört, die Halfpipe abgedeckt wird. Da von Glacier 3000 keine Antwort eingegangen ist, die zur Klärung der Frage beiträgt, weiss man nicht, ob im Skigebiet Glacier 3000 abgedeckt wird oder nicht. Auf dem Milibachgletscher wurde laut der CIPRA (2007) ab 2006 abgedeckt. Ob heute noch abgedeckt wird oder nicht, ist leider unbekannt.

Somit werden alle kommenden Schritte für folgende 8 (Ski-)Gebiete vorgenommen: Diavolezza, Corvatsch, Andermatt (Gemsstock), Flims Laax (Vorabgletscher), Rhonegletscher, Titlis, Zermatt sowie Saas-Fee. Das Gebiet auf dem Rhonegletscher ist das einzige, welches kein Skigebiet darstellt.

3.2 Erhebungsmethode

Zur Durchführung der Datenerhebung wurde ein qualitatives Vorgehen gewählt. Qualitatives Vorgehen wird in Gebieten genutzt, über welche noch nicht viel geforscht wurde und dient somit der Exploration. Neues zu entdecken und allfällige komplexe Zusammenhänge überhaupt erst zu erkennen steht dabei im Zentrum (Springer et al., 2015).

Gewählt wurde die Methode des telefonischen Interviews. Ein grosser Vorteil besteht darin, dass keine Kosten aufkommen für die Anreise zum Interviewort. Ein Telefoninterview kann oft spontan durchgeführt werden, da der Befragte im gewohnten Umfeld bleiben kann und nur ein kleines Zeitfenster zur Verfügung haben muss, was oft der Fall ist. Durch das Telefoninterview kann auf einer sehr persönlichen Ebene kommuniziert werden. Es kann unkompliziert um weitere Ausführungen gebeten werden und auch Verständnisprobleme können sofort geklärt werden. Wenn Experten zusätzliche Erfahrungen oder Kommentare miteinbringen, kann sofort darauf eingegangen werden.

Diese Methode weist wesentlich nur einen grossen Nachteil auf im Verglich zum Face-to-Face-Interview, nämlich die geringere Verfügbarkeit visueller Hilfsmittel (Brosius et al., 2016) . Das

kann jedoch in diesem Fall vernachlässigt werden, da visuelle Hilfsmittel für das Interview nicht vorgesehen sind. Auch die Gefahr, dass die Interviewten plötzlich auflegen, ist sehr gering, da sie sich zum Telefonat bereiterklärt haben. Zudem wissen die Interviewpartner aufgrund des Leitfadens genau, welche Fragen und Themen von Interesse sind. Bei einer Fragebogenerhebung werden nur diejenigen Aspekte erleuchtet, welche schriftlich erwähnt wurden. Ein Nachhaken gestaltet sich komplizierter, da die Person erneut kontaktiert werden muss. Auch ist es schwieriger eine ähnlich gute Qualität der Interviews zu erreichen, da nicht direkt um weitere Ausführungen gebeten werden kann.

Die aufgeführten Überlegungen zur Befragungsmethode sowie die Planung der Interviews erwiesen sich als nicht notwendig. Dies ist der Fall, da letztendlich alle Skigebiete, welche Ihre Daten zur Verfügung gestellt haben, den Leitfaden für das geplante Telefoninterview direkt schriftlich vervollständigt haben. Dabei handelt es sich um die Gebiete Engelberg Titlis, Saas-Fee und ein Gebiet, welches anonym bleiben möchte. So variiert der Informationsgehalt bei einigen Punkten wie beispielsweise «Erfahrung mit dieser Technik» stark, da nicht nachgehakt oder nach weiteren Ausführungen gefragt werden konnte. Hingegen haben mehrere Verantwortliche der Skigebiete angegeben, dass sie bei Unklarheiten oder Fragen zur Verfügung stehen, so dass sie erneut kontaktiert werden konnten.

4. Datenbearbeitung

Die Datenauswertung erfolgt mittels der quantitativen Daten, welche mittels des qualitativen Leitfadens erhoben wurden. Ziel ist es, anhand eines vorhandenen Programms, geschrieben von Dr. Matthias Huss (Code im Anhang), welches in der Programmiersprache IDL geschrieben wurde, die Schmelzreduktion in m^3, die totalen Kosten sowie die Kosten pro m^3 Schnee oder Eis zu berechnen. Dazu müssen die erhobenen Daten in Form gebracht sowie weitere Daten hinzugezogen werden. Diese Daten stammen vom Bundesamt für Landestopografie, aus einem Inventar aller Schweizer Gletscher (Fischer et al., 2016), welches verschiedene Variablen zur Beschreibung der Gletscher enthält oder von der Webseite GLAMOS. GLAMOS ist das schweizerische Gletschermessnetz, welches die langfristige Erforschung der Gletscherveränderungen in den Schweizer Alpen erforscht. Es wird gemeinsam von der Expertenkommission für Kryosphärenmessnetze der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (EKK/SCNAT) mit der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW/ETHZ), dem Departement für Geowissenschaften der Universität Freiburg und dem Geographischen Institut der Universität Zürich betrieben (Schweizerisches Gletschermessnetz GLAMOS, 2019).

Zur Berechnung der Schmelze werden die Massenbilanzanomalie, der Massenbilanzgradient sowie der feste Niederschlag pro Jahr benötigt (Tabelle 3). Die Massenbilanzanomalie entspricht dem Wert, um den das Gletschereis im Mittel vertikal jährlich abnimmt. Schweizweit liegt sie im Mittel in etwa bei einem Wert von -1 m Wasseräquivalent (GLAMOS, 2018). So wird dieser Wert für alle Gebiete angenommen. Als Massenbilanzgradient sowie als fester Niederschlag wurden die gegebenen Werte von 0.08 m Wasseräquivalent / m bzw. -1.5 m water equivalent übernommen.

Tabelle 3: Inputs, welche das Klimaregime bzw. die Schmelze beschreiben. Diese Werte gelten für alle Gebiete.

Massenbilanzanomalie [m w.e.]	-1
Massenbilanzgradient [m w.e./m]	0.008
Fester Niederschlag [m w.e.]	1.5

Nebst den oben genannten Parametern, welche zur Berechnung der Schmelzreduktion benötigt werden, kommen noch weitere dazu, welche für jeden Gletscher einzigartig sind. Um diese Werte ins Programm zu integrieren, greift das Programm auf DAT-Dateien auf dem Computer zurück. Zu jedem der acht Gletscher existiert ein File.

In Abbildung 8 ist das DAT-File von Zermatt ersichtlich. Darin festgehalten ist der bereits erwähnte Mode, welcher bei Zermatt 2 ist, was aus der Befragung hervorgeht. «Elev» bezeichnet die Höhe, auf welcher sich die Abdeckungen befinden. Diese Information konnte auf der Website des Bundesamtes für Landestopografie ermittelt werden. Die «loc_ELA» konnte aus dem Inventar der Schweizer Gletscher herausgelesen werden und beschreibt, auf welcher Höhe sich die Gleichgewichtslinie (Equilibrium Line Altitute) des Gletschers befindet. Die Gleichgewichtslinie hat eine Massenbilanz von 0, sie ist die Trennlinie zwischen Nähr- und Zehrgebiet, bzw. Akkumulations- und Ablationsgebiet. Das Jahr, in welchem die erste Abdeckung vorgenommen wurde, ist durch das Luftbild auf der Website des Bundesamtes für Landestopografie, sowie durch die Datenerhebung in Erfahrung gebracht worden. Dies wird als «first_year» festgehalten.

```
Ob. Theodulgletscher, Zermatt

Mode: 0-permanent, 1-relocated periodically, 2-re-installed every
year
Elev    loc_ELA    first_year    Gl_area(km2)    Mode
3025    3093       2006          2.59813         2

Year     Area(m2)
2006     1767
2010     6385
2012     7664
2015     8291
2018     8068
```

Abbildung 8: DAT-File des Theodulgletschers, Zermatt

Die Fläche des gesamten Gletschers ist «Gl_area (km2)». Diese wurde über das Inventar oder über die Website des Bundesamtes bestimmt. Die «Area (m2)» ist die Fläche der Gletscherabdeckung. Diese wurde ebenfalls über die Webseite des Bundes in Erfahrung gebracht. Bei der Bestimmung der Fläche der Gletscherabdeckungen konnte auf der Webseite die Karte «SWISSIMAGE Zeitreise» verwendet werden. Die räumliche Auflösung der Luftbilder beträgt 25cm (Fischer et al., 2014).

> *Das Orthophotomosaik SWISSIMAGE ist eine Zusammensetzung von gescannten analogen und digitalen, Schwarz-Weiss und farbigen Luftbildern. Ein Orthofoto ist ein Luftbild, bei dem Neigungseinflüsse der Kamera und des Geländes korrigiert wurden. Standardmässig wird der aktuelle Stand vom Produkt SWISSIMAGE angezeigt. Mit der Anzeige von Daten-Zeitstände – genannt «Zeitreise» - lässt sich der Landschaftswandel zwischen 1979 und 1985 und von 1990 bis heute anhand dieser Bilder auf interaktive Weise erfahren.*
>
> (Bundesamt für Landestopographie, 2019)

Mithilfe dieser speziellen Karte konnten die Orthophotos seit Beginn der Abdeckungen von jedem Gletscher untersucht und die Gletscherabdeckungen gemessen werden. Die Fläche der Abdeckungen wurde mittels des Line Tools bestimmt (Abbildung 9, Abbildung 10). Nicht jedes Jahr ist ein Orthofoto jedes Gletschers verfügbar. Im Schnitt gibt es ungefähr alle 3 Jahre ein Orthofoto. Tabelle 4 zeigt auf, an welchen Standorten in welchem Jahr ein Orthofoto verfügbar war und wie gross die Gletscherabdeckung im jeweiligen Jahr war. Das erstgenannte Jahr beschreibt das erste Jahr, in dem eine Abdeckung zu erkennen ist.

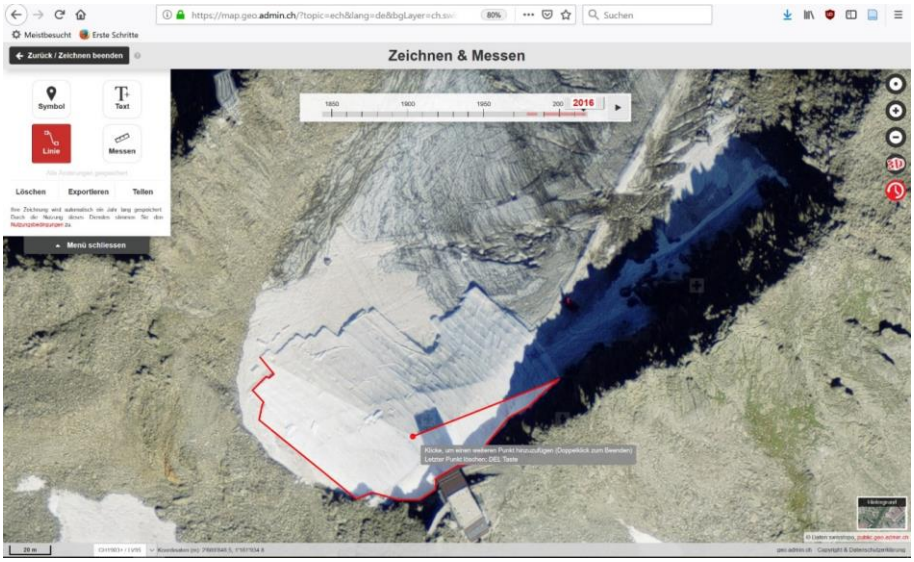


Abbildung 9: Screenshot während der Flächenbestimmung mit dem Line Tool am Beispiel des Gemsstocks (Bundesamt für Landestopographie, 2018)

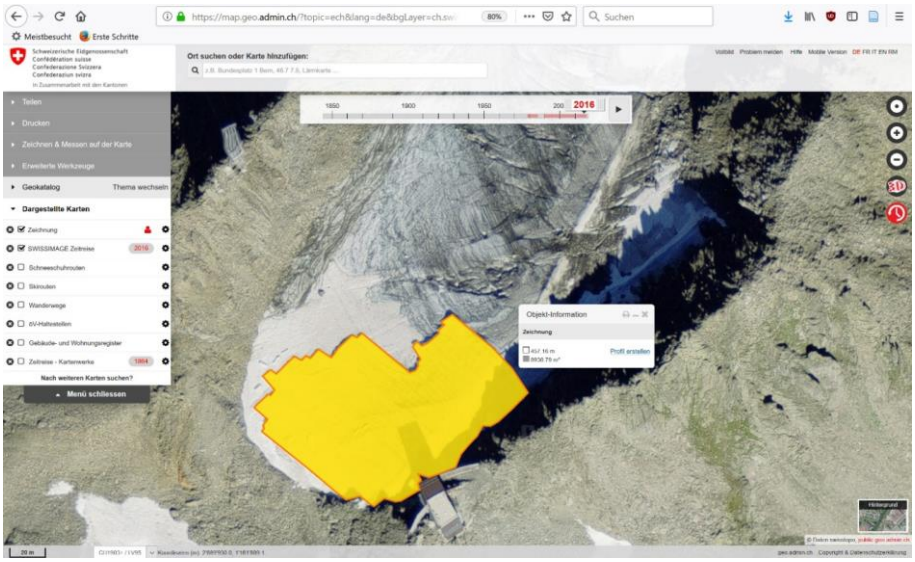


Abbildung 10: Screenshot der vollendeten Flächenbestimmung mit dem Line Tool am Beispiel des Gemsstocks (Bundesamt für Landestopographie, 2018)

Tabelle 4: Jahre verfügbarer Orthophotos und Fläche der erkennbaren Abdeckungen

Gebiet	Jahr	Fläche der ermittelten Abdeckung [m^2]	
Diavolezza	2009	16’200	
	2012	29’400	
	2015	30’600	
Corvatsch	2009	6’100	
	2012	9’600	
	2015	7’700	
Gemsstock, Andermatt	2013	5’000	
	2016	9'000	(vgl. Abb. 9 und 10)
Vorabgletscher, Flims Laax	2008	24’600	
	2011	21’500	
	2014	16’600	
Rhonegletscher	2010	1’900	
	2013	17’900	
	2015	21’900	
	2016	17’100	
	2017	17’300	
Zermatt	2006	1’700	
	2010	6’400	
	2012	7’700	
	2015	8’300	
	2018	8’000	

Für den Titlis wurde die Flächenbestimmung nicht mit Hilfe der «SWISSIMAGE Zeitreise» Karte erstellt. Dies ist damit zu erklären, dass auf den Orthophotos keine oder nur unvollständige Abdeckungsflächen aufzufinden sind. Die Abdeckungen von 2018 wurden in Rücksprache mit dem Verantwortlichen fixiert, so dass diese mit Sicherheit richtig sind. Des Weiteren hat der Verantwortliche bekanntgegeben, dass im Jahr 2020 20’000m^2 abgedeckt werden.
Für die Flächenbestimmung in Saas-Fee wurde gleich vorgegangen wie beim Titlis, da dieselben Probleme aufgetreten sind.

4.1 Kostenrechnung

Die Kostenrechnung wird in drei Hauptkostenarten gegliedert - die Abdeckungsmaterialkosten, die Platzierungskosten auf dem Gletscher und die Unterhaltskosten, siehe Tabelle 10 (S. 22). Alle Kostenarten beziehen sich auf einen m^2 Abdeckung. Für jedes der vier Gebiete (Anonym, Titlis, Saas-Fee und Rhonegletscher), welches Informationen über die Kosten mittgeteilt hat, wird eine separate Kostenrechnung aufgestellt, um deren Ausgaben zu berechnen. Anschliessend wird aus den vier Werten ein Durchschnittswert berechnet, welcher für diejenigen Gebiete gilt, von denen keine Angaben zu den Kostenausgaben vorliegen.

Die Materialkosten sind die Kosten, die für das Gletschervlies oder die Gletscherfolie anfallen, wenn dieses neu gekauft werden muss. Die Verantwortlichen haben diese Kosten bereits pro m^2 angegeben, so dass dieser Wert nicht weiter transformiert werden muss. Die Kosten einer Neuanschaffung der Abdeckungen fallen nicht jährlich an.

Die Platzierungskosten, auch Ausbringungskosten genannt, umfassen alle Kosten, welche bei der Anbringung der Textilien auf dem Gletscher direkt oder indirekt anfallen. Alle Kosten, welche unter diesem Punkt zusammengefasst sind, fallen einmal jährlich an. Dies sind Personalkosten, Kosten für Bodenmaschinen (Pistenfahrzeuge, Raupen und Bagger) und Helikopter, die Lagerung und Vorbereitung der Textilien und das Befestigungsmaterial. Die Kosten für das Befestigungsmaterial, welche von den Verantwortlichen der Skigebiete mitgeteilt wurde, waren die Gesamtkosten davon.

Um das *Befestigungsmaterial* ($K'_{BM,ges}$), welches von den Verantwortlichen der Skigebiete mitgeteilt wurde, auf einen m^2 pro Jahr herunterzubrechen, musste eine Gleichung aufgestellt werden.

$$K'_{BM} = (K'_{BM,ges}/A)/t$$

Um das Befestigungsmaterial pro m^2 (K'_{BM}/m^2) zu berechnen, muss man in einem ersten Schritt das gesamte Befestigungsmaterial ($K'_{BM,ges}$) durch die abzudeckende Fläche teilen. So erhält man einen Zwischenwert, welcher die Kosten des Befestigungsmaterials beschreibt, falls dieses jedes Jahr erneuert werden müsste. Das Befestigungsmaterial hält sicherlich länger als ein Jahr. Um die Lebensdauer abzuschätzen zu können, wurde recherchiert, wie lange Sandsäcke in etwa halten (Sandsackshop.de, 2019). Diese ist jedoch ganz unterschiedlich je nach verwendetem Material. Sandsäcke aus Polypropylen halten beispielsweise viel länger als Jutesandsäcke. So wurde ein Mittelwert, der dort angegebenen Lebensdauern ausgewählt, 7 Jahre. Die verwendeten Stahlseile haben vermutlich eine längere Lebensdauer, da diese aus einem massiven Material bestehen. Um die Stahlseile in die Lebensdauer einfliessen zu lassen, wurde diese auf 9 Jahre (t) erhöht.

Mittels der oben aufgeführten Formel ergeben sich die in Tabelle 5 erwähnten Kosten. Das Befestigungsmaterial wurde nur von zwei Skigebieten angegeben. Da jedoch auch in den Gebieten Saas-Fee und Rhonegletscher Befestigungsmaterial benötigt wird, wird dort mit dem Durchschnittswert gerechnet.

Tabelle 5: Kosten des Befestigungsmaterials pro m² pro Jahr

	Anonym	Titlis	Durchschnitt
Befestigungsmaterial / m² [CHF]	0.17	0.15	0.16

Die *Kosten für die Lagerung und Vorbereitung* wurden ebenfalls als Gesamtkosten angegeben. Auch hier wurde eine einfache Gleichung aufgestellt um diese auf einen m² herunterzurechnen.

$$K'_{L\&V} = \frac{K'_{L\&V,ges}}{A}$$

Die Gesamtkosten werden durch die Abdeckungsfläche geteilt, um den benötigten Wert zu erhalten. Die Kosten für die Lagerung und Vorbereitung wurden nur vom Skigebiet Engelberg Titlis erwähnt (Tabelle 6). Da diese Kosten jedoch alle Skigebiete tragen müssen, wurden sie in der Kostenrechnung auch für das anonyme Gebiet sowie Saas-Fee miteingerechnet. Der Rhonegletscher gehört derjenigen Kategorie an, in welcher die Vliese liegenbleiben und auch nicht mehr hergerichtet werden, so fallen diese Kosten für den Rhonegletscher nicht an.

Tabelle 6: Kosten für die Lagerung und Vorbereitung pro m²

	Titlis, Durchschnitt
Kosten für Lagerung und Vorbereitung / m² [CHF]	0.14

Die Berechnung der *Personalkosten* pro m² wurde wie folgt berechnet

$$K'_{pers} = \frac{t * CHF}{A}$$

Die Arbeitsstunden (t) werden mit dem Stundenansatz (CHF), welcher 70 CHF beträgt, multipliziert und durch die Fläche der Abdeckungen geteilt. Drei der vier befragten Gebiete haben einen Stundenansatz von 70 CHF angegeben. Dieser wurde auch für das vierte Gebiet so angenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Personalkosten pro m²

	Anonym	Titlis	Rhonegletscher	Saas-Fee
Personalkosten /m² [CHF]	2.45	3.81	0.93	1.49

Die Berechnung der Maschinenkosten erfolgt analog zur Berechnung der Personalkosten.

$$K'_{PiFa} = \frac{t * CHF}{A}$$

Die Arbeitsstunden (t) werden mit dem Stundenansatz (CHF), welcher 296 CHF beträgt, multipliziert und durch die Fläche der Abdeckungen geteilt. Zwei der befragten Gebiete haben angegeben, dass sie nur Pistenfahrzeugen benutzen. Eines dieser Gebiete erklärte, dass es 296 CHF koste, das Pistenfahrzeug eine Stunde zu nutzen. Deshalb wurde dieser Wert auch für das zweite Gebiet verwendet. Auf dem Titlis werden nebst Pistenfahrzeugen auch Bagger und Schneeraupen verwendet. Da in diesem Fall aber die Gesamtkosten der Maschinennutzung erwähnt wurden, konnten diese durch die abgedeckte Fläche geteilt werden, um das Resultat zu errechnen. Auf dem Rhonegletscher werden, wie es scheint, keine Maschinen benötigt für das Auslegen der Tücher. In Tabelle 8 sind die Maschinenkosten zusammengefasst.

Tabelle 8: Maschinenkosten pro m²

	Anonym	Titlis	Saas-Fee
Maschinenkosten / m² [CHF]	1.18	0.92	0.16

Helikopterkosten fallen nur in Engelberg Titlis an. Diese wurden als Gesamtkosten angegeben, so dass sie durch die abgedeckte Fläche geteilt werden müssen.

$$K'_{Heli} = \frac{K'_{Heli,ges}}{A}$$

Dies ergibt folgende Kosten (Tabelle 9):

Tabelle 9: Helikopterkosten pro m²

	Titlis
Helikopterkosten / m² [CHF]	0.08

		Anonym	Titlis	Rhonegletscher	Saas-Fee	Durchschnitt
Materialkosten [CHF / m^2]	Abdeckungsmaterial	2.5	2.5	3	3	**2.75**
Platzierungskosten, Ausbringungskosten [CHF / m^2]	Personalkosten	2.45	3.81	0.93	1.49	
	Pistenfahrzeug	1.18	0.92	-	0.16	
	Helikopter	-	0.08	-	-	
	Lagerung und Vorbereitung	0.14	0.14	-	0.14	
	Befestigungsmaterial	0.17	0.15	0.16	0.16	
Summe		3.94	5.1	1.09	1.95	**3.02**
Unterhaltskosten [CHF / m^2]		Kategorie 2: 7.88	Kategorie 2: 10.02	Kategorie 0: 0	Kategorie 2: 3.90	**Kategorie 0: 0** **Kategorie 1: 2** **Kategorie 2: 6.04**

Tabelle 10: Kostenrechnung mittels aller einfliessenden Variablen.

Die Berechnung der Unterhaltskosten (Tabelle 10) gestaltet sich etwas komplexer, da die Art der Gletscherabdeckungen in den Skigebieten variiert. Deshalb werden die Skigebiete je nach Art der Abdeckung und den damit verbundenen Kosten in drei Kategorien eingeteilt:

- Die Kategorie 0 umfasst jene Skigebiete mit Abdeckungen, die permanent an Ort und Stelle liegen gelassen werden können, also im Sommer wie auch Winter. Die Unterhaltskosten belaufen sich hier auch 0 CHF, da nichts mehr weiter gemacht werden muss.
- Der Kategorie 1 gehören alle Skigebiete an, die Vliese verwenden, welche ab und zu wiederhergerichtet werden müssen. Die Kosten dieser Kategorie sind eher schwierig zu berechnen, da nicht bekannt ist, in welchem Umfang die Abdeckungen hergerichtet werden. Hier wird ein Schätzwert von 2 CHF/m^2 angenommen. Dieser beruht auf der folgenden Annahme: Die Wiederherrichtung ist weniger aufwändig als das Ausbringen selbst. Das Ausbringen beläuft sich auf gut 3 CHF pro m^2. Diese Kosten setzen sich aus den Personal-, Maschinen- und Lagerungskosten zusammen. Für den Schätzwert der Kategorie 1 wurden alle aufgeführten Kosten etwas gekürzt, so dass sich ein Wert von 2 CHF/m^2 ergibt.
- Im der letzten Kategorie, der Kategorie 2, befinden sich alle Gebiete mit jenen Abdeckungen, die Ende Sommer ab dem Gletscher genommen werden und Ende Winter wieder neu platziert werden. Gemäss den befragten Skigebieten existieren nur minimale Unterschiede des Aufwandes bei den Ausbringungs- und Abräumarbeiten. Deshalb kann für die Unterhaltskosten dieser Kategorie der Betrag der Ausbringungskosten, welche durch die Umfrage in Erfahrung gebracht werden konnten, verdoppelt werden. Dies ergibt für Kategorie 2 einen Wert von 6.04 CHF/m^2.

Da das Abdeckungsmaterial wie bereits erwähnt nicht jedes Jahr eine neue Anschaffung darstellt, muss bekannt sein, wie lange dieses hält. Mittels der Lebensdauer wird dies festgehalten. Die Abdeckungen werden unterschiedlich lange genutzt von den Skigebieten (Tabelle 11). Laut dem Hersteller (Landolt, 2019) können die Textilien zwei bis drei Saisons genutzt werden. Mittels aller verfügbarer Informationen wurde ein Durchschnittswert ermittelt, welcher für die übrigen Gebiete gilt (Tabelle 11).

Tabelle 11: Lebensdauer der Geotextilien

	Anonym	Titlis	Saas-Fee	Hersteller	Durchschnitt
Lebensdauer der Abdeckungen [J]	8	3	4	2-3	**4**

Laut dem Skigebiet Engelberg Titlis kann mit den Textilien im ersten Jahr eine Schmelzreduktion von 80% erreicht werden, im zweiten Jahr 50% und im dritten und letzten Jahr, in dem sie sie verwenden noch 20%. Dies ergibt einen mittleren Schutz von 50% pro Jahr. In Kapitel 2.2 in Tabelle 1 wurden die Schmelzreduktionen aus bisherigen Studien zusammengetragen. Die mittlere Schmelzreduktion dieser Studien beträgt 55%. Jedoch wird angenommen, dass die Studien mit neuen, ungebrauchten Textilien durchgeführt wurden, was einen grossen Einfluss auf die Schmelzreduktion hat, wie der Verantwortliche des Skigebietes Engelberg Titlis erwähnt hat. Die mittlere Lebensdauer der Textilien beträgt vier Jahre. Wenn die Effizienz der Tücher während vier Jahren linear abnehmen würde mit dem Gradienten, welcher vom Verantwortlichen genannt wurde, dann hätten die Tücher keinen Schutz mehr im letzten Jahr, in dem sie verwendet werden. Deshalb wird der Gradient so angepasst, dass die Schmelzreduktion pro Jahr um 20% abnimmt, so dass die Abdeckungen im letzten Jahr noch eine Schmelzreduktion von 20% aufweisen (Tabelle 12). Die mittlere Schmelzreduktion pro Jahr beträgt somit 50%.

Tabelle 12: Schmelzreduktion der Geotextilien

	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	4. Jahr	Durchschnitt
Schmelzreduktion [%]	80	60	40	20	50

All die erwähnten Kosten fliessen schliesslich in eine Gleichung ein. Diese Gleichung wird für jeden Standort mit den jeweiligen Zahlen berechnet, so dass die totalen Kosten für den jeweiligen Standort herauskommen.

$$K'_{tot} = (K'_{mat} * A \,/\, Lebensdauer) + (K'_{unt}(abh.\,der\,Kat) * A) + (K'_{ausbr} * A)$$

Zur Berechnung der totalen Kosten (K'_{tot}) werden die Materialkosten (K'_{mat}) mit der abgedeckten Fläche multipliziert und durch die Lebensdauer geteilt, da diese nur alle paar Jahre neu erworben werden müssen. Dazu addiert wird die abgedeckte Fläche, multipliziert mit den Unterhaltskosten (K'_{unt}), welche variieren je nach Kategorie, dem das Gebiet angehört. Zum Schluss werden die Ausbringungskosten (K'_{ausbr}), multipliziert mit der abgedeckten Fläche, dazu addiert.

4.2 Herausforderungen bei der Datenverarbeitung

Im Zuge der Auswertung der Daten mussten zwei grössere Schwierigkeiten berücksichtigt werden. Zum einen hat sich herausgestellt, dass die Fläche der Abdeckung, welche durch die Datenerhebung hervorgegangen ist, nicht immer mit derjenigen auf den Luftbildern übereinstimmt. Dies ist sehr wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die verschiedenen Vliesbahnen auf dem Gletscher einander immer leicht überschneiden, was zu einer Differenz der Grösse des gebrauchten Vlieses und der effektiv abgedeckten Gletscherfläche führt. In der Kostenrechnung wurde deshalb mit jenem Wert gerechnet, der von den Verantwortlichen stammt, da dieser genauer ist. Im DAT-File handelt es sich um denjenigen, welcher via Luftbild bestimmt wurde, da die Abdeckungen grössentechnisch variieren mit den Jahren. In der Befragung wurde hingegen nur die momentane Abdeckungsfläche erhoben.

Andererseits stellten die erwähnten Abschreibungskosten der Skigebiete eine Herausforderung dar. Schlussendlich wurde entschieden diese nicht einzeln aufzuführen, da diese durch die Lebensdauer der Textilien bzw. des Befestigungsmaterials berücksichtigt werden, was im vorherigen Unterkapitel beschrieben wurde. Eine einzelne Aufführung der Abschreibungskosten würde zu einer doppelten Einrechnung führen.

Generell musste festgestellt werden, dass der Umfang der anfallenden Kostenpunkte pro Skigebiet unterschiedlich dargestellt wurde. So hat ein Skigebiet zum Beispiel eine sehr ausführliche Kostenauflistung eingereicht, die ausführlicher und detaillierter ist als jene der anderen Skigebiete. Deshalb mussten verschiedene Annahmen zur Höhe der folgenden zwei Kostenpunkte gemacht werden, wie oben bereits erwähnt wurde. Generell muss angenommen werden, dass einige Kosten nicht miteinberechnet werden konnten aufgrund der zu wenig detaillierten Kostenaufstellungen, so dass die «effektiven» Kosten der Gletscherabdeckung wahrscheinlich höher sind als hier berechnet.

5. Resultate

5.1 Quantitative Resultate

Dieses Unterkapitel wird in weitere Unterkapitel gegliedert, um die verschiedenen quantitativen Resultate und Berechnungen möglichst übersichtlich zu vermitteln. Nachfolgend wird die Evolution der Abdeckungen über die Jahre, die Kosten der Gletscherabdeckungen und eine Sensibilitätsanalyse vorgestellt.

5.1.1 Evolution der Abdeckungen

In diesem Kapitel wird die Evolution der Gletscherabdeckungen in der Zeit genauer betrachtet. Dazu wurde Abbildung 11 erstellt, welche aufzeigt, welche Gletscherabdeckungen in welchem Jahr wie gross waren. In Abbildung 11 ist ersichtlich, dass die Abdeckungen der Gletscherfläche jährlich zunehmen. Vereinzelt kommt es vor, dass in einem Jahr weniger abgedeckt wird, ab diesem Zeitpunkt ist die Tendenz wieder steigend oder bisher konstant (Vadret dal Corvatsch, Rhonegletscher). Ausnahmen stellen der Vorabgletscher in Flims Laax sowie der Glacier de Tortin in Nendaz dar. Auf dem Vorabgletscher sind die Abdeckungsflächen rückläufig, sie werden jährlich kleiner. Der Glacier de Tortin wurde früher teilweise abgedeckt, heute wird aber auf eine Abdeckung verzichtet (Téléverbier, 2018). Die Standorte Titlis sowie Saas-Fee sind auf dem Diagramm nicht vertreten, da keine Evolution der Abdeckung darstellbar ist. Es konnten für diese Standorte ausschliesslich Daten von 2018 erhoben werden.

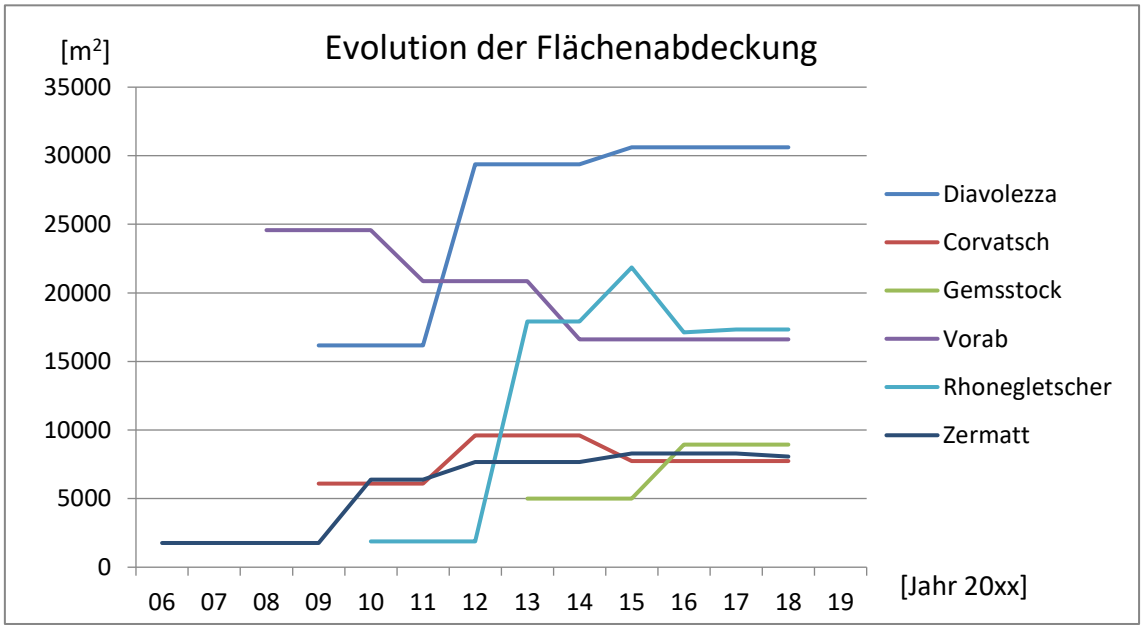


Abbildung 11: Evolution der Gletscherabdeckungen

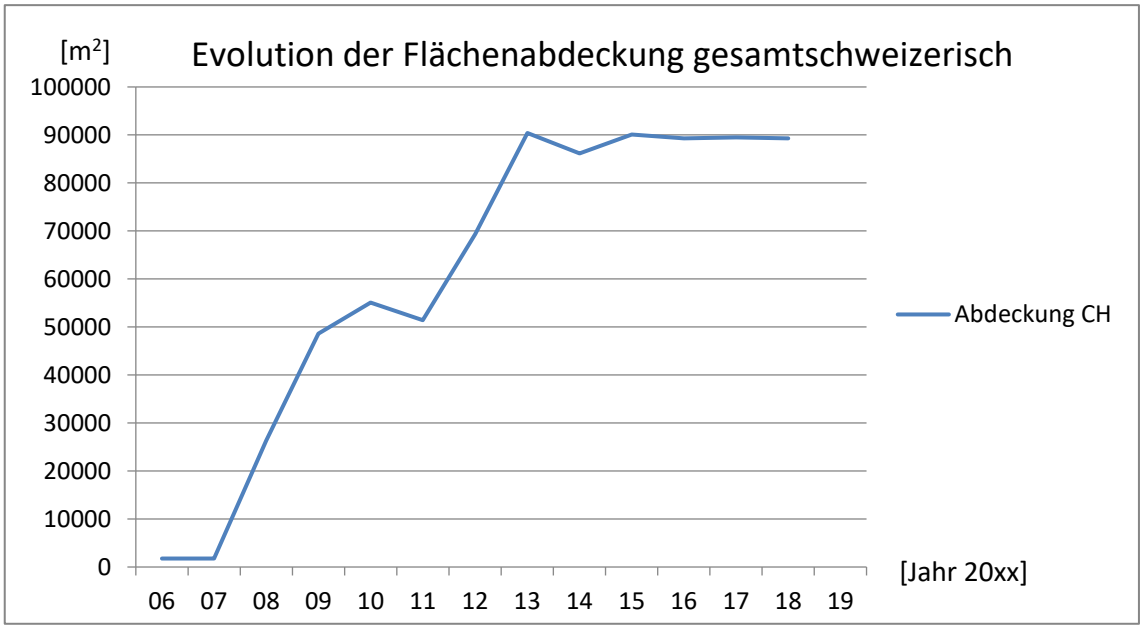


Abbildung 12: Evolution der Gletscherabdeckungen schweizweit

In Abbildung 12 ist die Evolution der Gletscherabdeckungen gesamthaft dargestellt. Die Skigebiete Saas-Fee und Titlis wurden in der Graphik nicht berücksichtigt, da nur Werte von 2018 verfügbar sind. Würden diese miteinfliessen, hätte man das Gefühl, dass die Abdeckungen im Jahr 2018 wieder angestiegen sind, was nicht der Fall ist. Von 2006 bis 2013 ist eine starke Zunahme der abgedeckten Flächen zu erkennen. Seit 2014 ist die abgedeckte Fläche ziemlich konstant.

Ein weiteres Element zur Analyse der Evolution der Abdeckungen sind die Karten in Abbildung 13 bis und mit Abbildung 17. Die Werte, welche in Abbildung 11 verwendet wurden, wurden diesen Karten entnommen, somit stimmen die Werte überein. Die Karten aller weiteren Standorte sind im Anhang zu finden, mit Ausnahme von Saas-Fee. Zu den Abdeckungen in Saas-Fee ist keine Karte erstellt worden, da die abgedeckten Gebiete auf dem Luftbild undeutlich erkennbar sind. Die Abdeckungen aller Standorte wurden absichtlich im selben Massstab dargestellt, um deren Umfang besser von Auge vergleichen zu können. Das untenstehende Beispiel des Rhonegletschers zeigt, dass die Abdeckungen bis 2015 zugenommen haben, 2016 waren sie kleiner als im Vorjahr und 2017 ähnlich wie im Jahr 2016.

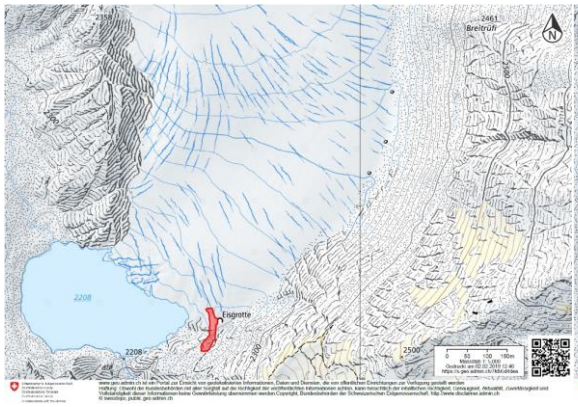


Abbildung 13: Abdeckung Rhonegletscher 2010, 1’882m²

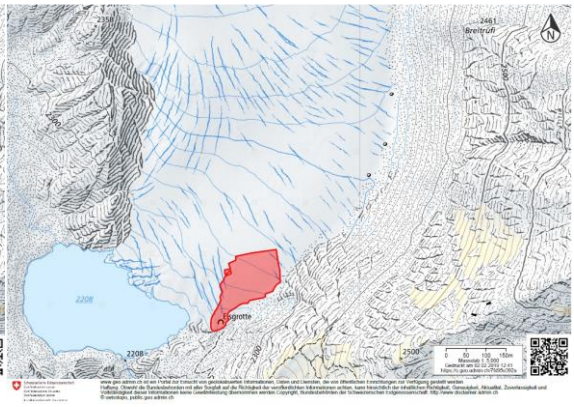


Abbildung 14: Abdeckung Rhonegletscher 2013, 17’914m²

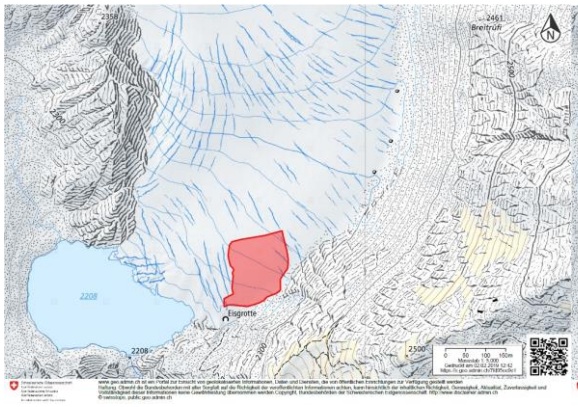


Abbildung 15: Abdeckung Rhonegletscher 2015, 21'855m²

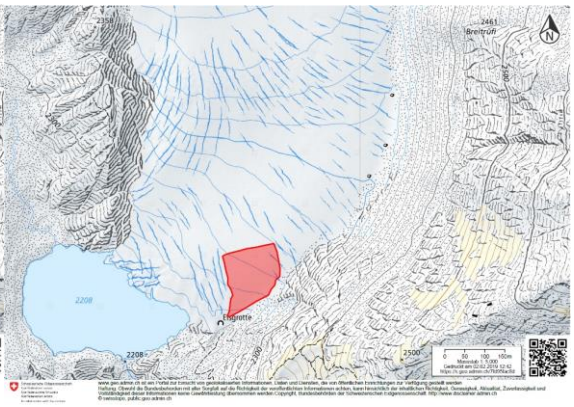


Abbildung 16: Abdeckung Rhonegletscher 2016, 17'117m²

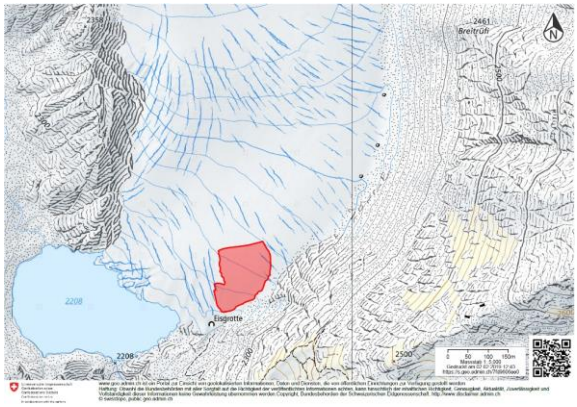


Abbildung 17: Abdeckung Rhonegletscher 2017, 17'325m²

5.1.2 Kosten der Abdeckungen

Im folgenden Unterkapitel werden die Kosten, die Schmelzreduktion und die Effizienz der Gletscherabdeckungen auf zwei verschiedene Arten berechnet. Des Weiteren wird berechnet, wie viele Kubikmeter [m^3] Eis pro Quadratmeter [m^2] abgedeckter Fläche gerettet werden können.

Um die Kosten auf die erste Art vergleichen zu können, werden für alle Gebiete die im Kapitel 4.1 ermittelten Durchschnittswerte verwendet. Die Grundlage der Berechnung der Durchschnittswerte bilden diejenigen Daten, welche aus der Datenerhebung hervorgehen. Daraus ergeben sich die Werte in Tabelle 13.

Tabelle 13: Berechnung der Effizienz mittels der Durchschnittswerte für eine gletscherweite Massenbilanz von -1 m w.e., Stichjahr 2018

Gebiet	Schmelzreduktion in [m^3]	Totale Kosten [CHF]	Effizienz [CHF/m^3]
Rhonegletscher, Furkapass	78’232	64’232	0.82
Feegletscher, Saas-Fee	47’757	151’086	3.16
Diavolezza, Oberengadin	48’744	298’409	6.12
Ob. Theodulgletscher, Zermatt	12’810	78’642	6.14
Titlis, Engelberg	10’619	92’883	8.75
Vorab, Flims	17’939	161’915	9.03
Gemsstock, Andermatt	9’584	87’132	9.09
Corvatsch, Oberengadin	5’023	75’338	15.00
Durchschnitt		1'009’637	5.40

Die Alternative dazu ist, die Schmelzreduktion, die totalen Kosten sowie die Effizienz der vier befragten Gebiete mittels der erhobenen Werte jedes Gebietes zu berechnen, um präzisere Werte zu erhalten. Die genauen Werte sind in Tabelle 10 zu finden. Mit dieser Art der Berechnung können Werte berechnet werden, die den «effektiven» Kosten sehr nahekommen. Die «effektiven» Werte selbst liegen sehr wahrscheinlich darüber, aus den in Kapitel 4.2 erwähnten Gründen. Diese alternative Berechnungsmethode ergibt folgende Resultate:

Tabelle 14: Berechnung der Effizienz mittels der Daten für jedes Gebiet für eine gletscherweite Massenbilanz von -1 m w.e., Stichjahr 2018

Gebiet	Schmelzreduktion in [m^3]	Totale Kosten [CHF]	Effizienz [CHF/m^3]
Rhonegletscher, Furkapass	78’232	29’279	0.37
Feegletscher, Saas-Fee	47’757	102’300	2.14
Anonym	12’810	97’885	7.64
Titlis	10’619	153’734	14.48

Anhand der berechneten Werte der Schmelzreduktion und der abgedeckten Fläche kann die Menge an gerettetem Eis [m^3] pro abgedeckte Fläche [m^2] ermittelt werden. Im Durchschnitt sind dies 1.84m^3, was einer Mächtigkeit von 1.84m gerettetem Eis pro Jahr entspricht. In Tabelle 15 finden sich die Werte der einzelnen Standorte. Dabei ist auffällig, dass der Rhonegletscher und Saas-Fee deutlich über dem Durchschnitt liegen, was bedeutet, dass mehr Kubikmeter Eis eingespart werden können pro Quadratmeter abgedeckter Fläche als bei den anderen Gebieten. Dies liegt daran, dass in Saas-Fee und auf dem Rhonegletscher im Ablationsgebiet, oder gar darunter, abgedeckt wird, so dass an diesen beiden Standorten mehr Schmelze eingespart werden kann mittels der Textilien.

Tabelle 15: Anzahl Kubikmeter Eis, welche durch einen Quadratmeter abgedeckter Fläche gerettet werden können

Gebiet	Gerettete m^3 Eis pro m^2 abgedeckter Fläche
Corvatsch	0.65
Gemsstock	1.07
Vorabgletscher	1.08
Titlis	1.11
Diavolezza	1.59
Zermatt	1.59
Saas-Fee	3.08
Rhonegletscher	4.52

Tabelle 16 zeigt die Grössenverhältnisse der Abdeckungen gegenüber dem gesamten Gletscher. Gesamthaft werden momentan 114'200 m^2 Fläche abgedeckt, ein Grossteil davon auf Glet schern. Die gesamte Fläche der acht Gletscher, welche Abdeckungen tragen, beträgt 35'976'900 m^2. Es werden 0.32% der Fläche der acht beobachteten Gletscher abgedeckt. Auf die Gesamtfläche aller Gletscher in der Schweiz bezogen wird 0.01% der Gletscherfläche abgedeckt.

Tabelle 16: Prozentuale Flächenbedeckung der Textilien auf dem gesamten Gletscher

	Abgedeckte Fläche [m^2]	Gletscherfläche [m^2]	Anteil der abgedeckten Fläche an der Gletscherfläche [%]
Saas-Fee	15’500	15'450’900	0.10
Rhonegletscher	17’300	15’310’000	0.11
Zermatt	8’100	2'598’100	0.31
Titlis	9’500	1'200’000	0.79
Vorabgletscher	16’600	982’300	1.69
Corvatsch	7’700	292’900	2.63
Gemsstock	8’900	112’100	7.90
Diavolezza	30’600	30’600	100
Mittelwert	114’200	35'976’900	0.32
Gesamtschweizerisch	114’200	944’091’090	0.01

Mittels der Kosten, welche in Tabelle 13 (S. 29) dargestellt sind, sowie den Gletscherflächen, welche in Tabelle 16 (S. 30) zu finden sind, kann eine interessante Hochrechnung mittels einer einfachen Berechnung gemacht werden. Damit kann berechnet werden, wie viel es kostet, x % der gesamtschweizerischen Gletscherfläche zu bedecken. Da die Kosten stark davon abhängen, ob die Textilien nach dem Ausbringen liegengelassen werden oder ob sie jedes Jahr neu ausgelegt werden, werden beide Fälle betrachtet.

Für den ersten Fall wird der Rhonegletscher als Berechnungsgrundlage gewählt, auf welchem die Textilien liegengelassen und auch nicht mehr hergerichtet werden. Die Kosten, um 17'300 m^2 des Rhonegletschers zu bedecken, belaufen sich auf CHF 64'232. Mittels dieser Werte kann nun wie folgt die Gleichung aufgestellt werden:

$$K'(x) = \frac{64'232}{17'300} * 944'091'090 * x$$

$K'(x)$ beschreibt die Kosten, um x% der Gesamtgletscherfläche zu bedecken. Die Gleichung wurde berechnet für verschiedene Werte von x. Diese Berechnungen sind sehr vereinfacht und linear. In der Realität werden die Kosten nicht linear steigen mit der abgedeckten Fläche, da man durch Wissen und Anschaffungen, welche man bereits getätigt hat, effizienter arbeiten kann (Titlis).

Tabelle 17: Hochrechnung der Kosten bei einer Abdeckung, welche liegengelassen wird. Hochgerechnet auf eine Abdeckungsfläche von x% der gesamtschweizerischen Gletscherfläche

x%	$K'(x)$ [CHF]
10	350'525'196
20	701'050'391
50	1'752'625'980

Für den zweiten Fall wird das Skigebiet Engelberg Titlis als Berechnungsgrundlage genommen. Auf dem Titlis werden die Textilien am Ende jeder Saison ausgelegt und wieder eingeholt, bevor der Winter kommt. Um 8'900 m^2 zu bedecken, belaufen sich die Kosten auf CHF 92'883. Daraus kann folgende Gleichung hergeleitet werden:

$$K'(x) = \frac{92'883}{8'900} * 944'091'090 * x$$

In Tabelle 18 finden sich die Kosten für eine Abdeckung von 10, 20 und 50% der schweizerischen Gletscher, wenn die Textilien während des Winters weggenommen werden würden.

Tabelle 18: Hochrechnung der Kosten bei einer Abdeckung, welche jährlich ausgebracht und wieder eingeholt wird. Hochgerechnet auf eine Abdeckungsfläche von x% der gesamtschweizerischen Gletscherfläche

$x\%$	$K'(x)$ [CHF]
10	923'052'765
20	1'846'105'531
50	4'615'263'827

5.1.3 Sensitivitätsstudie

Um herauszufinden, welchen Einfluss die Massenbilanz auf die Schmelze und somit auch auf die Kosten hat, wird eine Sensitivitätsstudie durchgeführt. Es wird im Mittel angenommen, dass die Massenbilanz -1 m Wasseräquivalent entspricht [m w.e.]. Für die Studie werden Werte von -2 m w.e., sowie 0.0001 m w.e. eingesetzt. Der Wert 0.0001 wurde so gewählt, damit es keinen Fehler gibt im Programm wegen einer Division durch Null.

In Tabelle 19 bis Tabelle 21 sind die Ergebnisse dargestellt. Tabelle 20 beinhaltet dieselben Werte wie Tabelle 13 und wird hier vollständigkeitshalber nochmals aufgeführt.

Es ist zu erkennen, dass die Abdeckungen bei einer negativeren Massenbilanz effizienter werden und umgekehrt. Jedoch ist auch zu beobachten, dass der Schritt von 0.0001m w.e. auf -1 m w.e. eine grössere Effizienzverbesserung darstellt als derjenige von -1 m w.e. auf -2 m w.e.

Abbildung 18 stellt die Resultate aus Tabelle 19 bis Tabelle 21 graphisch dar. Darin ist zu erkennen, dass die Effizienz bei allen Gebieten kleiner und somit besser ist bei einer höheren Massenbilanz. Der Peak des Corvatsch bei 0 m w.e. wurde herausgenommen, da dieser sehr hoch ist.

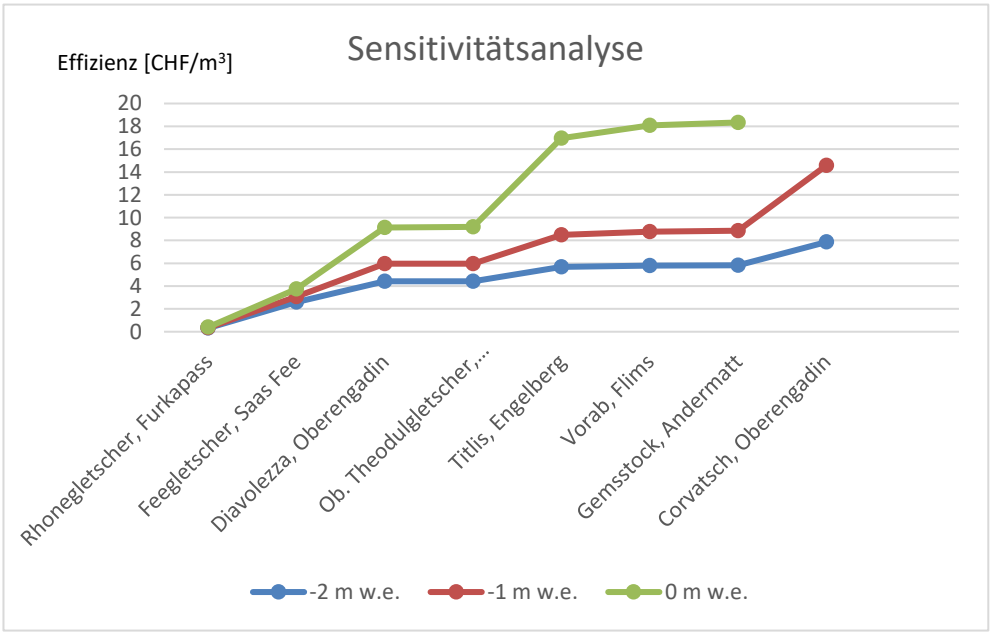


Abbildung 18: Graphische Darstellung der Sensitivitätsanalyse

Tabelle 19: Schmelzreduktion und Effizienz bei einer Massenbilanz von -2 m w.e.

Gebiet	Schmelzreduktion in [m^3]	Totale Kosten [CHF]	Effizienz [CHF/m^3]
Rhonegletscher, Furkapass	87’857	64’232	0.73
Feegletscher, Saas-Fee	56’368	151’086	2.68
Diavolezza, Oberengadin	65’752	298’409	4.54
Ob. Theodulgletscher, Zermatt	17’292	78’642	4.55
Titlis, Engelberg	15’913	92’883	5.84
Vorab, Flims	27’168	161’915	5.96
Gemsstock, Andermatt	14’550	87’132	5.99
Corvatsch, Oberengadin	9’317	75’338	8.09
Durchschnitt			4.24

Tabelle 20: Schmelzreduktion und Effizienz bei einer Massenbilanz von -1 m w.e.

Gebiet	Schmelzreduktion in [m^3]	Totale Kosten [CHF]	Effizienz [CHF/m^3]
Rhonegletscher, Furkapass	78’232	64’232	0.82
Feegletscher, Saas-Fee	47’757	151’086	3.16
Diavolezza, Oberengadin	48’744	298’409	6.12
Ob. Theodulgletscher, Zermatt	12’810	78’642	6.14
Titlis, Engelberg	10’619	92’883	8.75
Vorab, Flims	17’939	161’915	9.03
Gemsstock, Andermatt	9’584	87’132	9.09
Corvatsch, Oberengadin	5’023	75’338	15.00
Durchschnitt		1'009’637	5.40

Tabelle 21: Schmelzreduktion und Effizienz bei einer Massenbilanz von 0 m w.e.

Gebiet	Schmelzreduktion in [m^3]	Totale Kosten [CHF]	Effizienz [CHF/m^3]
Rhonegletscher, Furkapass	68’606	64’232	0.94
Feegletscher, Saas-Fee	39’145	151’086	3.86
Diavolezza, Oberengadin	31’734	298’409	9.40
Ob. Theodulgletscher, Zermatt	8’327	78’642	9.44
Titlis, Engelberg	5’325	92’883	17.44
Vorab, Flims	8’710	161’915	18.59
Gemsstock, Andermatt	4’617	87’132	18’87
Corvatsch, Oberengadin	729	75’338	103.27

5.2 Qualitative Ergebnisse

Im Folgenden werden die Resultate der Umfrage zu den Gletscherabdeckungen analysiert und erläutert. Es werden auch Resultate und Erkenntnisse miteinfliessen, welche durch Internetrecherche in Erfahrung gebracht werden konnten. In einem ersten Teil werden allgemeingültige Schlüsse gezogen, anschliessend wird auf einige Skigebiete im Einzelnen eingegangen.

Bei Gletscherabdeckungen, welche der Kategorie 2 angehören (vgl. S. 23), sind der Ausbringungs- und der Abräumaufwand gleich gross, sagt der Verantwortliche des Gebietes, welches anonym ist. An einigen Standorten wird (nur) der Stützenbereich abgedeckt (z.B. in Zermatt), um die Fundamente der Liftanlagen im Eis den Sommer durch zu sichern, und an anderen Orten (z.B. Titlis) wird diese Technik genutzt, um Snowfarming zu betreiben. Die Abdeckungen in Zermatt, Saas-Fee und auf dem Titlis werden zu Lasten der Bergbahnunternehmung finanziert.

- Wichtig sei es, dass man auf dem Gletscher keinen Schnee abträgt und an einem anderen Ort anhäuft beim Snowfarming, sondern nur den dort vorhandenen Schnee oder zusätzlichen Kunstschnee abdeckt. Denn wenn der Schnee dem Gletscher an einem Ort weggenommen wird, fehlt er in diesem abgetragenen Gebiet (Titlis, Anonym).
- Erfahrungsgemäss könne mit der Gletscherabdeckung im abgedeckten Bereich pro Jahr bis zu 2.5m Gewinn der Eismächtigkeit verzeichnet werden (Anonym). Die Eismächtigkeit, oder auch Eisdicke, ist die vertikale Eisdicke einer Eisschicht oder von Gletschereis.
- Die grösste Herausforderung der Gletscherabdeckung sei die Befestigung des Vlieses auf dem Gletscher auf oder über 3000 m ü.M., da dort mit Windböen von über 100 km/h zu rechnen ist (Titlis).
- Da das Vlies eine raue Oberflächenstruktur aufweist, nehme es sehr viel Schmutzpartikel auf, welche nicht ausgewaschen werden. Dadurch sei der Verlust der Albedo bereits nach kurzer Zeit sehr gross und auch der Aufwand grösser als der Ertrag (Titlis).
- In allen Kriterien sei der Erhalt von Schnee auf einem konzentrierten Haufen effizienter als bestehende Pisten abzudecken (Titlis).
- Sehr wahrscheinlich produziert die Entsorgung bzw. Verbrennung der alten Vliese eine negative Ökobilanz im Zusammenhang mit der Produktion und Bewirtschaftung (Titlis).
- Bei den Gletscherabdeckungen auf dem Rhonegletscher werden die Tücher nach dem Ausbringen nicht mehr stark hergerichtet und bleiben so lange da liegen, bis sie im Gletschersee landen (Rhonegletscher).

- In Saas-Fee wird nur eine Stelle auf dem Gletscher abgedeckt, welche sich am Gletscherrand befindet. An den anderen Stellen ist kein Gletscher mehr vorhanden (Saas-Fee).

Das Skigebiet Engelberg Titlis macht sich grosse Gedanken, was mit den Abdeckungsfolien passiert, wenn diese nur noch eine ungenügende Albedo besitzen und nicht mehr auf Gletschern genutzt werden können. Primär werden die Tücher auf dem Titlis nur zwei Jahre eingesetzt, da sie im dritten Jahr nur noch über eine Schmelzreduktion von 20% verfügen. Das Skigebiet sei auf der Suche nach Abnehmern in der Tiefbaubranche, um die Tücher weiter verwenden zu können. Ein weiterer negativer Aspekt sei das teilweise sehr lange Bewilligungsverfahren für Abdeckungen, da Gletscher ein Gemeingut darstellen.

Im Skigebiet Engelberg Titlis werden zwei verschiedene Arten von Snowfarming verfolgt. Bei der ersten Art geht es darum, die Pistenfläche abzudecken, wie sie nach dem Skibetrieb vorgefunden wird. Auch hier wird erwähnt, dass es keinen Sinn macht, den Schnee auf dem Gletscher zusammenzuschieben, da er sonst im abgetragenen Gebiet fehlt. Primär geht es bei der Pistenabdeckung darum, die Infrastruktur mittels Abdeckungen und leichten Verbesserungen während der nächsten zehn bis fünfzehn Jahre mit einem vernünftigen Aufwand zu erhalten. Die zweite Art von Snowfarming in Engelberg ist die Produktion von Kunstschnee auf einem konzentrierten Schneehaufen (Abbildung 19). Dieser wird übersommert und zu Beginn des Winters wieder verstossen. Zukünftig wird vermehrt Maschinenschnee nach der primären Beschneiung der Pisten und Wege konzentriert auf einen Haufen geschneit und natürlicher Schnee (von Orten neben dem Gletscher) auf den Haufen geführt. Auch diese Haufen werden dann übersommert, um zu Beginn der nächsten Skisaison verstossen werden zu können.

Im Skigebiet in Saas-Fee wird ausschliesslich Snowfarming betrieben, so dass Schneehaufen zu Beginn der nächsten Saison wieder verstossen werden können. In diesem Skigebiet werden die Abdeckungen nicht dazu genutzt Pfeiler zu stützen, um die Liftanlagen erhalten zu können.



Abbildung 19: Übersommerte Schneehaufen (Abdeckung bereits entfernt), im Hintergrund der St. Annafirn (Huss, 2018)

Das Skigebiet Gemsstock oberhalb von Andermatt war das erste, welches Gletscherabdeckungen in der Schweiz ausgebracht hat. Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen die Gletschertextilien im Jahr 2005, dem Jahr, in dem das Pilotprojekt gestartet wurde. Mittels dieser Technik konnte am Gemsstock sogar Eisvolumen aufgebaut werden. Das Vlies führt zu einer Energieeinsparung, da der Aufwand dafür geringer ist, wie wenn beschneit werden muss. Die Beschneiung benötigt Wasser, welches zuerst auf den Berg transportiert werden muss. Zudem wird viel Energie in Form von Strom und Treibstoff verbraucht für die Pistenfahrzeuge. Am Gemsstock wird der obere Teil der Piste abgedeckt, um den 20 m hohen Absatz von der Bergstation zum Start der Skipiste nicht künstlich auffüllen zu müssen. Dort befindet sich eine Schneerampe, welche durch die Abdeckungen bis zur kommenden Saison zu 80% erhalten werden kann. Dadurch können wochenlange Arbeitseinsätze und eine grosse Anzahl Einsatzstunden von Pistenfahrzeugen und mehrere Tausend Liter Diesel eingespart werden. Am Gemsstock konnte sogar ein Gewinn der Eismächtigkeit verzeichnet werden, so dass der Gletscher nun wieder näher an der Bergstation liegt (Radio SRF 1, 2013; Landolt, 2005).



Abbildung 20: Arbeiter beim Auslegen des Vlieses über der Rampe am Gurschengletscher (Bildarchiv Andermatt Gotthard Sportbahnen AG, 2005)



Abbildung 21: Nach der Montage des Vlieses, 10. Mai 2005 (Bildarchiv Andermatt Gotthard Sportbahnen AG, 2005)

Wenn auf der Diavolezza der Gletscher abschmilzt, würde eine senkrechte Felswand zum Vorschein kommen. Diese könnte auch durch Beschneiung kaum pistentauglich gemacht werden, so dass der Skibetrieb ohne Textilien bald ein Ende finden müsste. Durch die Abdeckung jedoch hat die Eisdicke in den letzten 11 Jahren um 10 bis 15 m zugenommen. Des Weiteren kann mittels der Textilien Energie gespart werden, da nicht beschneit werden muss (Südostschweiz, 2018). Abbildung 22 bis und mit Abbildung 23 zeigen die Arbeiten im Herbst beim Enthüllen des Gletschers auf der Diavolezza.



Abbildung 22: Die Abdeckvliese werden im Herbst wieder entfernt (Ehrenzeller, o.D.)



Abbildung 24: Ein Pistenfahrzeug zieht das Vlies von der Piste ab (Ehrenzeller, o.D.)



Abbildung 23: Ein Pistenarbeiter rollt mithilfe eines Pistenfahrzeugs das Vlies wieder auf (Ehrenzeller, o.D.)

6. Diskussion

Die in Abbildung 11 dargestellte Evolution der Abdeckungen zeigt, dass ein Grossteil der Abdeckungen zunehmen. Es gibt aber auch Skigebiete, wie der Vorabgletscher, welche rückläufige Abdeckungen aufweisen. Die grösstenteils zunehmenden Abdeckungen weisen darauf hin, dass diese Methode ein Erfolg ist und damit etwas erreicht werden kann hinsichtlich der Befestigung von Liftanlagen, Übersommerung der Skipisten und Schneehaufen und Nutzung der Infrastruktur. Ein Problem sehe ich jedoch darin, wenn nur sehr kleine Abdeckungen wie beispielsweise in Zermatt, über mehrere Jahre hinweg vorgenommen werden. Dort werden die Pfeiler einer Liftanlage abgedeckt, um diese vor dem Umkippen zu bewahren. Wenn jedoch solch kleine Flächen Jahr für Jahr abgedeckt werden und jährlich um angenommen 2 Meter an Eismächtigkeit gewinnen, ragen diese meiner Meinung nach irgendwann über den restlichen Gletscher hinaus (zur Verdeutlichung dargestellt in Abbildung 25). Deshalb ist es aus meiner Sicht sinnvoller, grössere Flächen oder Schneehaufen abzudecken, welche wieder verstossen werden. Des Weiteren geht bei einer kleinflächigen Abdeckung sofort mehr Eismächtigkeit verloren, wenn nicht mehr abgedeckt wird, da die Angriffsfläche viel grösser ist.

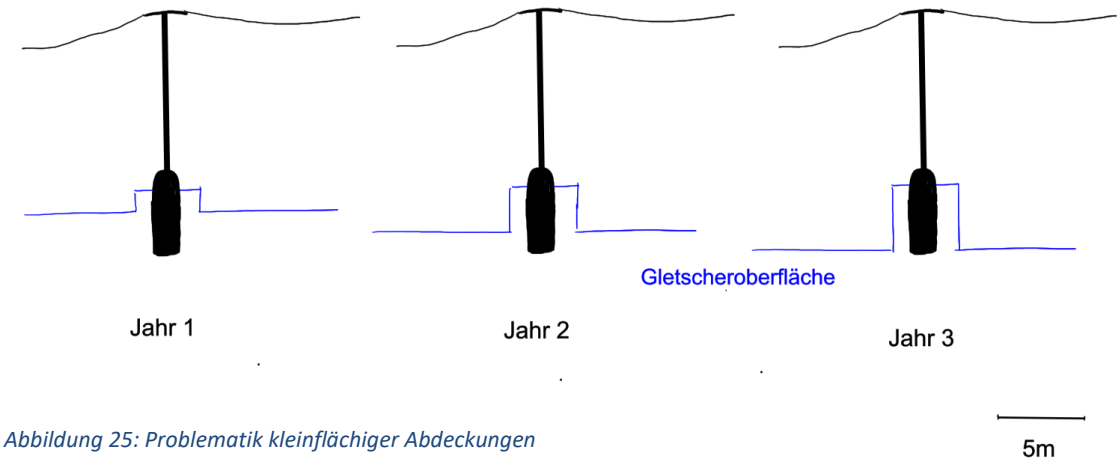


Abbildung 25: Problematik kleinflächiger Abdeckungen

Anhand der Darstellung der Evolution des Rhonegletschers (Abbildung 13 bis und mit Abbildung 17) wird ersichtlich, dass die Abdeckung im Ablationsgebiet vorgenommen wird, um die Eisgrotte zu schützen. Auch im Ablationsgebiet oder gar unterhalb des Gletschers setzt das Skigebiet Saas-Fee Abdeckungen ein. Demgegenüber gibt es auch Abdeckungen, welche sich ausschliesslich im Akkumulationsgebiet befinden, wie beispielsweise auf dem Corvatsch oder in Andermatt (siehe Karten im Anhang 4).

Tabelle 13 zeigt für die Effizienz [CHF/m^3] des Corvatsch einen Wert von 14.58 und für Andermatt 8.84. Diese beiden sind, wenn auch nur knapp, die höchsten Werte, welche in dieser Spalte zu finden sind. Dem liegt folgende Erklärung zu Grunde: Gletscher verlieren den Grossteil

ihrer Masse im Ablationsgebiet, also an der Gletscherzunge. Wenn die Abdeckungen also dort angebracht werden, kann potenziell mehr Schmelze eingespart werden. Im Akkumulationsgebiet hingegen verlieren die Gletscher auch ohne Abdeckungen nicht viel an Masse, so dass Abdeckungen dort weniger effizient genutzt werden können als im Ablationsgebiet. Dies geht auch aus den geringen Werten des Corvatsch und Andermatt in Tabelle 15 hervor. Alle Gebiete, welche teilweise oder ausschliesslich über Abdeckungen im Akkumulationsgebiet verfügen, weisen die kleinsten Werte auf. Dies sind die Skigebiete Andermatt und Corvatsch, welche nur im Akkumulationsgebiet abdecken, sowie die Gebiete Vorabgletscher wie auch der Titlis, welche Abdeckungen im Ablations- sowie auch Akkumulationsgebiet vornehmen. Diejenigen Gebiete, welche nur im Ablationsgebiet oder gar darunter abdecken, weisen die höchsten Werte der Schmelzreduktion pro Quadratmeter abgedeckter Fläche auf: 4.52 m^3/m^2 für den Rhonegletscher und 3.08 m^3/m^2 für Saas-Fee. Letzteres Resultat ist jedoch mit Vorsicht zu geniessen, da nicht bekannt ist, inwieweit das Programm die Schmelzreduktion unterhalb des Gletschers berechnen kann.

Am Ende des Kapitels 5.1.2 wird verdeutlicht, was für geringe Ausmasse die Gletscherabdeckungen auf die Gesamtfläche der bedeckten Gletscher beziehungsweise aller Gletscher in der Schweiz haben. Lediglich 0.32% der acht beobachteten Gletscher werden abgedeckt und über alle Gletscher der Schweiz gesehen ist dieser Wert noch viel geringer, nämlich 0.01%. Die Hochrechnungen zeigen auf, dass eine Abdeckung von 10% der Schweizer Gletscherfläche zwischen 350 und 920 Millionen Franken kosten würde. Der grosse Unterschied rührt daher, dass die Hochrechnung für zwei verschiedene Kategorien gemacht wurde. Die günstigere Variante wurde mit derjenigen Kategorie berechnet, bei welcher die Textilien ganzjährlich auf dem Gletscher gelassen werden. Der schwerwiegende Nachteil dieser Methode hingegen ist die Umweltverschmutzung, welche damit gemacht wird: Dadurch, dass die Textilien auf dem Gletscher gelassen werden, lagert sich das Geröll darauf ab. Durch die Masse des Gerölls auf den Textilien ist es praktisch unmöglich diese wieder aus der Gletscherlandschaft zu entfernen, auch wenn der Gletscher sich zurückgezogen hat. Die zweite Hochrechnung wurde für die Kategorie gemacht, in welcher die Textilien beim Schneemaximum ausgebracht und auf den Winter hin wieder eingeholt werden. Der Vorteil dieser Kategorie ist, dass die Gletscherlandschaft dadurch nicht verschmutzt wird, da die Textilien nicht unter Geröll begraben werden. Die hohen Kosten sind der Nachteil.

Dies zeigt auf, dass Gletscherabdeckungen keine langfristige Lösung gegen das Schmelzen der Gletscher sind. Damit kann lediglich kurzfristig und in einem kleinen Gebiet, wie ein Skigebiet, viel erreicht werden. Dies dient in ebendiesen Skigebieten dazu, Fundamente von Skiliften zu

sichern, den Zugang zur Infrastruktur zu erhalten oder zu verbessern und Schneehaufen oder Pistenschnee über den Sommer hindurch zu sichern, damit die Saison pünktlich beginnen kann oder weniger beschneit werden muss.

Die Sensibilitätsstudie verdeutlicht, dass die Abdeckungen effizienter sind, je grösser die Massenbilanzanomalie ist. Dies bedeutet, dass mehr Schmelzreduktion erreicht werden kann bei einer grösseren Massenbilanzanomalie und dass dadurch die proportionalen Kosten gesenkt werden können. Auffällig dabei ist, dass der Effizienzgewinn von 0 m w.e. zu -1 m w.e. viel grösser ist als derjenige von -1 zu -2 m w.e.. Weshalb der Wert des Corvatsch bei 0 m w.e. (103.27CHF/m^3) so enorm hoch ist, konnte leider nicht herausgefunden werden.

Auf der qualitativen Ebene hat sich herauskristallisiert, dass die Massnahme der Gletscherabdeckung hauptsächlich dazu dient, die Infrastruktur noch eine weitere Dekade erhalten zu können. Wenn diese Vorkehrungen nicht getroffen werden, würden die Liftanlagen instabil werden, da ihre Verankerung im Eis nicht mehr dauerhaft hält. Ebenfalls kann betreffend die Infrastruktur mittels der Abdeckungen der Zugang auf den Gletscher verbessert werden (Beispiel Andermatt). Auch bewährt hat sich die Abdeckung von Schneehaufen, welche mittels Kunstschnee oder Schneezusammenführen (Schnee, welcher nicht vom Gletscher stammt) aufgetürmt wurden. Diese Schneehaufen können übersommert werden und Anfangs Winter wieder verstossen werden, um die Pisten zu präparieren. Die Abdeckung der Pisten, wie sie Ende der Saison auffindbar sind, ist weniger effizient als die eben genannte Abdeckung von Schneehaufen.

Die von Olefs und Fischer (2008) angesprochene Zugfestigkeit, welche notwendig sei, damit die Geotextilien nicht von Windböen zerrissen werden, scheint kein grosses Problem zu sein. Vielmehr sorgen die Böen über 3000 m über Meer dazu, dass die Befestigung der Textilien zu einer grossen Herausforderung wird, da man aufpassen muss, dass diese nicht davongeweht werden.

Es wurde angesprochen, dass durch die Rauheit der Oberfläche der Abdeckungen Schmutzpartikel sehr schnell hängen bleiben und sich diese auch nicht mehr herauswaschen. Dadurch nimmt die Albedo innert weniger Jahre drastisch ab, was zur Folge hat, dass die Textilien schneller ausgetauscht werden müssen. Die Oberfläche muss jedoch eine gewisse Rauheit aufweisen, damit die Scherfestigkeit nicht zu tief ist. Denn nur durch eine gewisse Scherfestigkeit kann gewährleistet werden, dass eine Neuschneeschicht auf der Abdeckung sich nicht in eine Lawine verwandelt und abrutscht.

7. Fazit

Durch Gletscherabdeckungen kann eine Schmelzreduktion der Gletscher, oder wie die Abdeckungen auf der Diavolezza oder am Gemsstock beweisen, gar ein Wachstum der Gletscher erreicht werden. Ein grosser Vorteil der Abdeckungen ist es, dass Energiekosten in Form von Wasser zur Beschneiung oder Treibstoff für die Pistenfahrzeuge gespart werden kann. Die Nachteile hingegen sind die hohen Kosten der Textilien selbst und auch der Aufwand, der damit verbunden ist, sie auszubringen und wieder einzuholen, bevor die nächste Saison startet.

Die Gletscherabdeckung ist sehr nützlich für die kurzfristige Aufrechterhaltung der vor Ort vorhandenen Infrastruktur. Auch als sehr effizient erwiesen hat sich das Übersommern von Schneehaufen, welche zu Beginn des Winters verstossen werden. Die Skigebiete sind darauf angewiesen Textilien auszubringen, um konkurrenzfähig zu bleiben. Wenn sie dies nicht tun, weichen die Touristen auf andere Schneesportorte mit besseren Pistenbedingungen aus.

Es konnte berechnet werden, dass das Retten von 1m^3 Schnee durch Gletscherabdeckungen im Durchschnitt CHF 5.40 pro m^3 kostet. Die Spanne beläuft sich jedoch von CHF 0.82 bis CHF 15.00. Die Effizienz ist hauptsächlich stark von zwei Faktoren abhängig. Einerseits davon, ob die Abdeckungen auf dem Akkumulations- oder Ablationsgebiet vorgenommen wurden. Im Ablationsbereich kann viel mehr Schmelze eingespart werden, dadurch sind auch die Abdeckungen dort generell effizienter. Andererseits hängen die Kosten und die damit verbundene Effizienz von der Kategorie ab, welcher das Gebiet angehört. Wenn die Textilien Ende Saison ausgebracht werden und vor Wintereinbruch wieder eingeholt werden, entsteht ein Mehraufwand. Dieser fällt bei Gebieten, wie dem Rhonegletscher, welche die Textilien auslegen und dort liegenlassen, nicht an, und somit haben diese viel weniger Kosten.

Schlussendlich sind es jedoch die Skigebiete selbst, welche entscheiden müssen, zu welchem Preis sich eine Abdeckung für sie noch lohnt. Die Kosten auf dem Gemsstock in Andermatt belaufen sich beispielsweise auf CHF 9.09 pro m^3. Dies ist das Skigebiet, welches den zweithöchsten Wert aufweist, jedoch lohnt sich der Aufwand für das Skigebiet abermals, da so rund 80% der Schneerampe, welche von der Bergstation zur Piste führt, übersommert werden kann. Dadurch ist viel weniger Aufwand zu Beginn der Saison notwendig, um die Rampe jährlich wieder neu aufzubauen. Auch zum Erhalt der Fundamente der Skilifte, wie dies beispielsweise Zermatt vornimmt, sind Abdeckungen im Akkumulationsgebiet unumgänglich.

Die Abdeckungen, welche in der Schweiz vorgenommen werden, umfassen lediglich 0.01% der Gesamtfläche der gesamten Schweizer Gletscher. Wenn nun hochgerechnet wird, was es kosten würde 10 oder gar 50 % der gesamten Schweizer Gletscherfläche abzudecken, belaufen sich die

Kosten auf 350 bis 920 Millionen bzw. 1.7 bis 4.6 Milliarden Schweizer Franken. Diese grossen Unterschiede basieren auf den verschiedenen Kategorien, mit welchen gerechnet wurde. Wenn die Abdeckungen saisonal ausgebracht und wieder eingeholt werden, entstehen viel höhere Kosten als wenn sie dort permanent liegengelassen werden. Die Vorteile der einen Kategorie, dass das Liegenlassen mit viel weniger Aufwand verbunden ist und dadurch weniger Kosten entstehen, bilden gleichzeitig den Nachteil der anderen Kategorie. Die Abdeckungen saisonal wieder neu anzubringen ist mit viel Aufwand und hohen Kosten verbunden. Die Abdeckungen an Ort und Stelle zu lassen ist jedoch auch nicht die Lösung, da diese so mit Geröll bedeckt werden und es unmöglich ist, diese aus der intakten Gletscherlandschaft wieder zu entfernen, auch wenn der Gletscher bereits zurückgegangen ist.

Kurzfristig kann die Methode der Gletscherabdeckung auf einem begrenzten Gebiet sehr effizient sein. Längerfristig hingegen ist die Gletscherabdeckung nicht die rettende Lösung gegen das Schmelzen der Alpengletscher. Damit können nur die Auswirkungen der Klimaerwärmung eingedämmt, nicht aber die Ursachen bekämpft werden.

Bibliographie

Anonym (2007). «Schutz vor Sonne und Regen», *Mountain Manager*, 34-35.

Alean, J. (2016). [Abbildung 4].

Andermatt Gotthard Sportbahnen AG (o.D.). [Abbildungen 5, 20, und 21].

Brosius, H-B., Haas A. und Koschel F. (2016). *Methoden der empirischen Kommunikations-forschung: eine Einführung*. Wiesbaden, Springer VS.

Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2018). https://www.geo.admin.ch

Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2019). https://www.geo.admin.ch

Bürki, R., Elsasser, B. und Abegg, B. (2003). *Climate change: impacts on the tourism industry in mountain areas.* Proceedings of the 1st International Conference on Climate Change and Tourism, Djerba, 9-11 April 2003.

CIPRA (2007). *Positionspapier der CIPRA Schweiz: «Gletscherabdeckungen und Schnee-bewirtschaftung».* Zürich, Internationale Alpenschutzkomission.

Ehrenzeller, G. (o.D.). [Abbildungen 22, 23 und 24]. Abgerufen von https://www.nzz.ch /panorama/bildstrecke/diavolezza-die-abdeckung-der-skipiste-wird-entfernt-ld.1313325#lg=1 &slide=9

Farinotti, D. (o.D.). persönliche Mitteilung. Rhonegletscher.

Fischer, M., Huss, M., Barboux, Ch. und Hoelzle, M. (2014). «The new Swiss Glacier Inventory SGI2010: relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers. (Das neue Schweizer Gletscherinventar SGI2010: Relevanz der Verwendung hochauflösender Bilder in durch sehr kleine Gletscher dominierten Gebieten).» *Arctic, Antarctic, and Alpine Research,* 46 (4): 933-945.

Fischer, M., Huss, M., Kummert, M., und Hoelzle, M. (2016). «Application and validation of long-range terrestrial laser scanning to monitor the mass balance of very small glaciers in the Swiss Alps.» *The Cryosphere*, 10: 1279-1295, doi:10.5194/tc-10-1279-2016.

GLAMOS (2018). The Swiss Glaciers 2015/16 und 2016/17, Bauder, A. (ed.), Glaciological Report No. 137/138 of the Cryospheric Commission (EKK) of the Swiss Academy of Sciences (SCNAT) published by VAW / ETH Zürich. Doi: 10.18752/glrep_137-138.

Huss, M. (2018). [Abbildung 19].

Jouvet, G., Huss, M., Blatter, H., Picasso, M. und Rappaz, J. (2009). «Numerical simulation of Rhonegletscher from 1874 to 2010», *Journal of Computational Physics*, 228 (17): 6426-6439. Doi: 10.1016/j.jcp.2009.05.033.

Kaser, G., Cogley, J. G., Dyurgerov, M. B., Meier, M. F. und Ohmura, A. (2006). «Mass balance of glaciers and ice caps: consensus estimates for 1961-2004», *Geophysical Research Letters*, 33 (19), L19501. Doi: 10.1029/2006GL027511.

Landolt (2019). persönliche Mitteilung. Näfels.

Landolt (2005). *Herausforderung am Gurschengletscher in Andermatt (CH).* Projektbericht Sommer 2005. Näfels.

Nestler, A., Huss, M., Ambartzumian, R. und Hambarian Artak (2014). «Hydrological Implications of Covering Wind-Blown Snow Accumulations with Geotextiles on Mount Argats, Armenia», *Geosciences,* 4: 73-92. Doi: 10.3390/geosciences4030073.

Oerlemans, J., Haag, M. und Keller F. (2017). «Slowing down the Retreat of the Morteratsch Glacier, Switzerland, by Artificially Produced Summer Snow: A Feasibility Study», *Climatic Change,* 145 (1–2): 189–203. https://doi.org/10.1007/s10584-017-2102-1.

Ohmura, A., Bauder, A., Müller, H. und Kappenberger, G. (2007). «Long-term change of mass balance and the role of radiaton», *Annals of Glaciology*, 46: 367-374. Doi: 10.3189/ 00221408787779960.

Olefs, M. und Fischer A. (2008). «Comparative Study of Technical Measures to Reduce Snow and Ice Ablation in Alpine Glacier Ski Resorts», *Cold Regions Science and Technology*, 52 (3): 371–84.

Olefs, M., und Lehning, M. (2010). «Textile Protection of Snow and Ice: Measured and Simulated Effects on the Energy and Mass Balance», *Cold Regions Science and Technology,* 62 (2–3): 126–41. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.03.011.

Olefs, M. und Obleitner F. (2007). «Numerical Simulations on Artificial Reduction of Snow and Ice Ablation: ARTIFICIAL ABLATION REDUCTION OF SNOW AND ICE», *Water Resources Research,* 43 (6).

Radio SRF 1 (2013). So «überlebt» der Gletscher den Sommer, https://www.srf.ch/radio-srf-1/radio-srf-1/so-ueberlebt-der-gletscher-den-sommer [aufgerufen am 21.03.2019].

RP-Energie-Lexikon (o.D.). https://www.energie-lexikon.info/emissionsgrad.html [aufgerufen am 28.03.2019].

Sandsackshop.de (2019). http://www.sandsackshop.de/Was-soll-ich-bestellen/ [aufgerufen am 26.04.2019].

Schweizerisches Gletschermessnetz GLAMOS (2019). https://www.glamos.ch/impressum# /B56 %2F03 [aufgerufen am 23.02.2019].

Springer N., Koschel F., Fahr A. und Pürer H. (2015). *Empirische Methoden der Kommunikations-wissenschaft.* Konstanz und München, UVK Verlagsgesellschaft mBH.

Steinbach Alpin (2019). https://www.steinbach-alpin.com/injektion-winter/?nid=57126 [aufgerufen am 28.03.2019].

Südostschweiz (2018). Erfolgreiche Gletscherabdeckung, https://www.suedostschweiz.ch/sendungen/2018-06-15/erfolgreiche-gletscher-abdeckung [aufgerufen am 21.03.2019].

Téléverbier (2018). Persönliche Mitteilung. Verbier.

Vincent, C. (2002). «Influence of climate change over the 20th Century on four French glaciermass balances», *Journal of Geophysical Research*, 107 (4375), D19. Doi: 10.1029/2001JD000832

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schmelzreduktion im Vergleich zur natürlichen Schmelze 10
Tabelle 2: Eigenschaften der Gletscherschutztextilien der Firma Landolt, Näfels..... 11
Tabelle 3: Inputs, welche das Klimaregime bzw. die Schmelze beschreiben. Diese Werte gelten für alle Gebiete..... 15
Tabelle 4: Jahre verfügbarer Orthophotos und Fläche der erkennbaren Abdeckungen 18
Tabelle 5: Kosten des Befestigungsmaterials pro m^2 pro Jahr..... 20
Tabelle 6: Kosten für die Lagerung und Vorbereitung pro m^2 20
Tabelle 7: Personalkosten pro m^2 20
Tabelle 8: Maschinenkosten pro m^2..... 21
Tabelle 9: Helikopterkosten pro m^2 21
Tabelle 10: Kostenrechnung mittels aller einfliessenden Variablen. 22
Tabelle 11: Lebensdauer der Geotextilien 23
Tabelle 12: Schmelzreduktion der Geotextilien..... 24
Tabelle 13: Berechnung der Effizienz mittels der Durchschnittswerte für eine gletscherweite Massenbilanz von -1 m w.e., Stichjahr 2018..... 29
Tabelle 14: Berechnung der Effizienz mittels der Daten für jedes Gebiet für eine gletscherweite Massenbilanz von -1 m w.e., Stichjahr 2018..... 29
Tabelle 15: Anzahl Kubikmeter Eis, welche durch einen Quadratmeter abgedeckter Fläche gerettet werden können 30
Tabelle 16: Prozentuale Flächenbedeckung der Textilien auf dem gesamten Gletscher 30
Tabelle 17: Hochrechnung der Kosten bei einer Abdeckung, welche liegengelassen wird. Hochgerechnet auf eine Abdeckungsfläche von x% der gesamtschweizerischen Gletscherfläche 31
Tabelle 18: Hochrechnung der Kosten bei einer Abdeckung, welche jährlich ausgebracht und wieder eingeholt wird. Hochgerechnet auf eine Abdeckungsfläche von x% der gesamtschweizerischen Gletscherfläche 32
Tabelle 19: Schmelzreduktion und Effizienz bei einer Massenbilanz von -2 m w.e..... 33
Tabelle 20: Schmelzreduktion und Effizienz bei einer Massenbilanz von -1 m w.e..... 33
Tabelle 21: Schmelzreduktion und Effizienz bei einer Massenbilanz von 0 m w.e..... 33

Abbildungsverzeichnis

Titelbild: Radio SRF 1 (2013). So «überlebt» der Gletscher den Sommer, https://www.srf.ch/radio-srf-1/radio-srf-1/so-ueberlebt-der-gletscher-den-sommer

Abbildung 1: Entwicklung der Oberflächenhöhe bei verschieden dichten Kompaktionen der Schneedecke im Vergleich zum Referenzlauf (Olefs und Obleitner, 2007) 5

Abbildung 2: Ablation in Form der Schneehöhe der verschiedenen getesteten Methoden (Olefs und Fischer, 2008) 6

Abbildung 3: Geotextilien auf der Diavolezza (Südostschweiz, 2018) 8

Abbildung 4: Gletscherabdeckung auf der Zunge des Rhonegletschers (Alean, 2016) 8

Abbildung 5: Gurschengletscher Andermatt, Mitte September 2005, kurz vor der Enthüllung (Bildarchiv Andermatt Gotthard Sportbahnen AG, 2005) 8

Abbildung 6: Testgebiet auf dem Schaufelferner (AU) nach der Wegnahme der Geotextilien am Ende einer Ablationsperiode (Olefs und Fischer, 2008) 9

Abbildung 7: Lokalisierung der angefragten Gebiete (Bundesamt für Landestopographie, 2019) 12

Abbildung 8: DAT-File des Theodulgletschers, Zermatt 16

Abbildung 9: Screenshot während der Flächenbestimmung mit dem Line Tool am Beispiel des Gemsstocks (Bundesamt für Landestopographie, 2018) 17

Abbildung 10: Screenshot der vollendeten Flächenbestimmung mit dem Line Tool am Beispiel des Gemsstocks (Bundesamt für Landestopographie, 2018) 17

Abbildung 11: Evolution der Gletscherabdeckungen 26

Abbildung 12: Evolution der Gletscherabdeckungen schweizweit 27

Abbildung 13: Abdeckung Rhonegletscher 2010, 1’882m^2 28

Abbildung 14: Abdeckung Rhonegletscher 2013, 17’914m^2 28

Abbildung 15: Abdeckung Rhonegletscher 2015, 21'855m^2 28

Abbildung 16: Abdeckung Rhonegletscher 2016, 17'117m^2 28

Abbildung 17: Abdeckung Rhonegletscher 2017, 17'325m^2 28

Abbildung 18: Graphische Darstellung der Sensitivitätsanalyse 32

Abbildung 19: Übersommerte Schneehaufen (Abdeckung bereits entfernt), im Hintergrund der St. Annafirn (Huss, 2018) 36

Abbildung 20: Arbeiter beim Auslegen des Vlieses über der Rampe am Gurschengletscher (Bildarchiv Andermatt Gotthard Sportbahnen AG, 2005) 37

Abbildung 21: Nach der Montage des Vlieses, 10. Mai 2005 (Bildarchiv Andermatt Gotthard Sportbahnen AG, 2005) 37

Abbildung 22: Die Abdeckvliese werden im Herbst wieder entfernt (Ehrenzeller, o.D.) 38

Abbildung 23: Ein Pistenarbeiter rollt mithilfe eines Pistenfahrzeugs das Vlies wieder auf (Ehrenzeller, o.D.) 38
Abbildung 24: Ein Pistenfahrzeug zieht das Vlies von der Piste ab (Ehrenzeller, o.D.) 38
Abbildung 25: Problematik kleinflächiger Abdeckungen 39

Abbildungsverzeichnis des Anhangs

Abbildung 1: Abdeckung Corvatsch 2009, 6’095m^2 56
Abbildung 2: Abdeckung Corvatsch 2012, 9’608m^2 56
Abbildung 3: Abdeckung Corvatsch 2015, 7’729m^2 56
Abbildung 4: Abdeckung Diavolezza 2009, 16’170m^2 56
Abbildung 5: Abdeckung Diavolezza 2012, 29’367m^2 56
Abbildung 6: Abdeckung Diavolezza 2015, 30’614m^2 57
Abbildung 7: Abdeckung Gurschenfirn 2013, 5’002m^2 57
Abbildung 8: Abdeckung Gurschenfirn 2016, 8’939m^2 57
Abbildung 9: Abdeckung Vorabgletscher 2008, 24'585m^2 57
Abbildung 10: Abdeckung Vorabgletscher 2011, 21'526m^2 57
Abbildung 11: Abdeckung Vorabgletscher 2014, 16'611m^2 58
Abbildung 12: Abdeckung Titlis 2018, 9'529m^2 58
Abbildung 13: Abdeckung ob. Theodulgl. 2006, 1'767m^2 59
Abbildung 14: Abdeckung ob. Theodulgl. 2010, 6'385m^2 59
Abbildung 15: Abdeckung ob. Theodulgl. 2012, 7'664m^2 59
Abbildung 16: Abdeckung ob. Theodulgl. 2015, 8'291m^2 59
Abbildung 17: Abdeckung ob. Theodulgl. 2018, 8’068m^2 59

Anhang

A.1 Leitfaden aus Anfrage

Leitfaden für Interview – wie teuer ist 1m^3 geretteter/s Schnee/Eis?

- Fläche der Abdeckung, Entwicklung der abgedeckten Fläche (Vergrösserung in den letzten Jahren?)
- Seit wann wird diese Methode verwendet
- Material der Abdeckung
- Wie lange können die Tücher genutzt werden
- Gewicht von 1m^2 Tuch
- Kosten des Materials pro m^2
- Dauer der Ausbringung der Textilien, Anzahl Arbeiter, die mithelfen, Anzahl der Helikopterflüge/ Kosten pro Flug (hin&retour), etc. -> gesamter Ausbringungsaufwand
- Gesamtkosten; wie wird es finanziert?
- Bedeckung auf der Gletscherzunge oder/und Akkumulationsgebiet
- Handelt es sich um ein Skigebiet?
- Erfahrung mit dieser Technik

A.2 Daten der Skigebiete

1. Anonym

- Fläche der Abdeckung, Entwicklung der abgedeckten Fläche (Vergrösserung in den letzten Jahren?) 10000 m^2
- Seit wann wird diese Methode verwendet 2006
- Material der Abdeckung Gletscherflies Top Tex GLS (Firma Landolt)
- Wie lange können die Tücher genutzt werden ca. 8 Jahre
- Gewicht von 1m^2 Tuch 0.35kg/m^2
- Kosten des Materials pro m^2 2.50.-Fr / m^2 inkl. Transport nach Zermatt
- Dauer der Ausbringung der Textilien, Anzahl Arbeiter, die mithelfen, Anzahl der Helikopterflüge/ Kosten pro Flug (hin&retour), etc. -> gesamter Ausbringungsaufwand
  350 Std Personal und 40 Std Pistenfahrzeug denselben Aufwand haben wir fürs abräumen!
  350Std. x 70.-Fr. + 40Std. Pifa x296.-Fr ergibt 36340.-Fr. Aufwand zum Auslegen oder abräumen!
- Gesamtkosten; wie wird es finanziert?
  Anschaffung Material ca. 40000.-Fr. inkl. Sandsäcke zum Beschweren. Die Finanzierung wird über die Bahnunternehmung gemacht. Wir brauchen diese Abdeckung im Stützenbereich, um die Fundamente im Eis den Sommer durch zu sichern.
- Abdeckung auf der Gletscherzunge oder/und Akkumulationsgebiet
  Nur im Stützenbereich!
- Handelt es sich um ein Skigebiet? Ja, es handelt sich um ein Skigebiet!
- Erfahrung mit dieser Technik Die Technik bringt sehr viel, im abgedeckten Bereich pro Jahr ca. 2.5m gewinn der Eismächtigkeit. In anderen Gebieten wird die Technik auch als Hilfsmittel für Snowfarming gebraucht. Bei uns wird aber auf dem Gletscher kein Snowfarming betrieben, da wir der Meinung sind, dass wenn man Schnee anhäuft und abdeckt, dass er dann dem Gletscher im abgetragenen Bereich fehlt!

2. Titlis

- Fläche der Abdeckung, Entwicklung der abgedeckten Fläche (Vergrösserung in den letzten Jahren?)
  1. 2004 200m2
  2. 2018 9000m2

- Seit wann wird diese Methode verwendet

  1. 2004 mit normalem Flies ca. 100g pro m2
  2. 2008 mit spezifisch entwickelter Folie ca. 400g pro m2
  3. 2014 mit Folie aus Kitzbühel 500g pro m2

- Material der Abdeckung

  Spezifische Zusammensetzung ist nicht bekannt.

  1. Firma Landolt hat die Produktion mit der Spezialfolie im 2014 eingestellt. Die Folie war sehr teuer Fr. 6.00 pro m2

  2. Info: Firma Steinbach Alpin / Paß Thurn Str. 10 a, A-6372 Oberndorf

     Telefon: +43 (0)5356 71 832 12

- Wie lange können die Tücher genutzt werden

  1. Im 1. Jahr Schutz bis 80%
  2. Im 2 Jahr Schutz bis 50%
  3. Im 3 Jahr Schutz bis 20% wird nicht mehr primär eingesetzt
  4. Im 4 Jahr wird die Folie entsorgt.
     a. Gesucht wären hier Abnehmer in der Tiefbaubranche. Ich denke hier an einen Pool CH für die Zukunft.

- Gewicht von 1m^2 Tuch

  Die Rollen werden bei uns 4x50m bezogen a 500g pro 2

- Kosten des Materials pro m^2

  Fr. 2.50 pro m2

- Dauer der Ausbringung der Textilien, Anzahl Arbeiter, die mithelfen, Anzahl der Helikopterflüge/ Kosten pro Flug (hin&retour), etc. -> gesamter Ausbringungsaufwand

  Total Produktionskosten

  a. 28 Arbeitstage 9000m2 Auf und Abbau
  b. 5 Personen a 7 Std. Fr. 68600.00
  c. Maschinen Std. Schneeraupe, Bagger Fr. 16500.00
  d. Helikopter Fr. 1500.00
  e. Lagerung und Vorbereitung Fr. 2500.00
  f. Abschreibung pro Jahr Fr. 9000.00
  g. Befestigungsmaterial Fr. 4000.00

  Fr.170700.00

  Eine genaue Kostenberechnung pro m3 Schnee erhalt auf dem Gletscher habe ich noch nicht berechnet.

Der Erfolg liegt wahrscheinlich im Schnitt pro m2 bei 1.8m3 = 16200m3

Daher ergibt sich eine Bilanz von Fr. 10.00 pro m3 (Wahnsinn, wenn das stimmt)

- Gesamtkosten; wie wird es finanziert?

  Die Finanzierung ist 100% zu Lasten Bergbahnen Engelberg Titlis AG

  a. Intern wird dies unter Snowfarming bzw. Beschneiung Unterhalt geführt.

- Bedeckung auf der Gletscherzunge oder/und Akkumulationsgebiet

  1. 70% bis Dato wird dem direkten Schutz verschiedener Infrastrukturen abgedeckt
  2. 30% zum eigentlichen Aufbau der Rutschpisten und Zugänge an Stationen
  3. Ab 2019 werden wir ca. 22000m3 reine Pistenflächen schützen. Dies entspricht der Fläche, die wir neu auf dem Gletscher beschneien.
  4. Die Kosten werden jedoch nur um ca. 30% steigen.

- Handelt es sich um ein Skigebiet?

  1. Es handelt sich um ein Skigebiet. Abgedeckt wird nur der Gletscher
  2. Zielsetzung: Ab 2020 starten wir ein Projekt Snowfarming unter 2000müM im Umfang von rund 20000m3 Schnee.

- Erfahrung mit dieser Technik

  1. Am Titlis Gletscher verfolgen wir 2 verschiedene Arten von Snowfarming
     a. Wir schützen die Pistenfläche wie wir sie im nach dem Skibetrieb vorfinden. Auf Gletscher ist es nicht sinnvoll den Schnee vom Winter zusammenschieben, denn da fehlt die Masse (natürlicher Schutz) auf dem Eis, wo nicht abgedeckt werden kann.
        Der Schutz auf dem Gletscher ist beschränkt und wird langfristig verworfen.
        Eisaufbau auf dem Gletscher ist kleinräumig möglich.
        Als Massenbilanz ist jedoch dies vernachlässigbar.
        Wir können unsere Infrastruktur und leichte Verbesserungen die nächsten 10- 15 Jahre in einem vernünftigen Aufwand halten.
     b. Wir produzieren Schnee auf einen konzentrierten Schneehaufen.

  2. Zukünftig werden wir unterhalb 2000müM Schnee übersommern.
     a. Maschinenschnee wird nach der primären Beschneiung der Pisten und Wege konzentriert auf einen Haufen geschneit.
     b. Zusätzlich wird natürlicher Schnee auf den Haufen geführt.
     c. Der Haufen wird mit Isomatten und dem Vlies oder Holzschnitzel abgedeckt.

Erfahrungswerte Gletscher:

1. Die Befestigung des Vlieses auf dem Gletscher 3000müM ist die grösste Herausforderung. Es ist mit Windböen über 100kmh zu rechnen.
2. Das Vlies mit der filzigen Oberflächenstruktur nimmt sehr viel Schmutzpartikel auf und wird nicht ausgewaschen bzw. der Verlust der Albedo ist gross und nach kurzer Zeit ist der Aufwand grösser als der Erfolg.
3. In allen Kriterien ist der Erhalt von Schnee auf einem Konzentrierten Haufen effizienter.

4. Ökologisch, ökonomisch gesehen ist das Beschneien auf dem Gletscher ohne Abdeckung über den Sommer nicht zielführend.
5. Snowfarming ist eine sehr anspruchsvolle Herausforderung.
    a. Landeigentümer
    b. Bewilligungsverfahren
    c. Topografische, logistische Voraussetzung
    d. Viel Knowhow der Beteiligten auch im Verständnis der natürlichen Akkumulation von Schneemassen im Gletscherbereich.
    e. Es werden in Zukunft neue Techniken angewendet, die kleinräumige Angebote durchaus kostenneutral bewirtschaftet lassen.

6. Die alten Vlies zu entsorgen bzw. zu verbrennen ist im Zusammenhang mit der Produktion und Bewirtschaftung wahrscheinlich eher eine negative Ökobilanz.

3. Rhonegletscher

- Fläche der Abdeckung, Entwicklung der abgedeckten Fläche (Vergrösserung in den letzten Jahren?)
- Seit wann wird diese Methode verwendet
- Material der Abdeckung Filz-Bahnen à 6m x 50m x 5mm
- Wie lange können die Tücher genutzt werden Die Bahnen werden nach dem Auslegen nicht mehr gross gerichtet, sondern bleiben so lange da bis sie im See landen…
- Gewicht von 1m^2 Tuch
- Kosten des Materials pro m^2 ca. 3 CHF
- Dauer der Ausbringung der Textilien, Anzahl Arbeiter, die mithelfen, Anzahl der Helikopterflüge/ Kosten pro Flug (hin&retour), etc. -> gesamter Ausbringungsaufwand
  Zu 4 sind 8 Bahnen an einem Tag machbar
- Gesamtkosten; wie wird es finanziert?
- Bedeckung auf der Gletscherzunge oder/und Akkumulationsgebiet
- Handelt es sich um ein Skigebiet?
- Erfahrung mit dieser Technik

4. Saas-Fee

- Fläche der Abdeckung, Entwicklung der abgedeckten Fläche (Vergrösserung in den letzten Jahren?)
  15000 m^2 der übersommerte Schnee wird wieder verstossen, um die Pisten bereit zu stellen.
- Seit wann wird diese Methode verwendet
  Wir legen das Flies schon über 10 Jahre aus
- Material der Abdeckung
  Gletscherschutzvlies 100% Polypropylen Weiss
- Wie lange können die Tücher genutzt werden
  3-5 Jahre nachher ist der Schutz nicht mehr so gut, da die Matten verschmutzt sind
- Gewicht von 1m^2 Tuch
  0.55 kg
- Kosten des Materials pro m^2
  Ca 3.- CHF
- Dauer der Ausbringung der Textilien, Anzahl Arbeiter, die mithelfen, Anzahl der Helikopterflüge/ Kosten pro Flug (hin&retour), etc. -> gesamter Ausbringungsaufwand

Ca 4 Arbeitstage à 8 h mit 10 Personen, die 2 m breite Vliesmatten werden mit einer Handnähmaschine zusammengenäht. Die Matten werden mittels Pistenfahrzeug zum Standort transportiert ca 8 h

- Gesamtkosten; wie wird es finanziert?
  Nicht berechnet
- Bedeckung auf der Gletscherzunge oder/und Akkumulationsgebiet
  Eine Stelle wird der Gletscherrand abgedeckt, bei der anderen ist kein Gletscher mehr vorhanden
- Handelt es sich um ein Skigebiet?
  Ja
- Erfahrung mit dieser Technik

  Ja

A.3 Programmcode

```
noval=-9999

dir='C:\Users\schwy\Desktop\geotextile/'

; ***************
sites=['diavolezza','vorab','corvatsch','gemsstock','zermatt','saasfee', 'titlis', 'rhone']
;sites=['titlis']

; ***************
mb_anomaly=-1   ; [m w.e.] glacier-wide mass balance in a given year
mbgradient=0.008    ; [m w.e. m-1] mass balance gradient
solid_precipitation=1.5  ; [m w.e.] annual sum of snow precipitation (modified by position of ELA)

target_year=2018
; ****************************
efficiency=50                   ; %  melt reduction (average)

material_cost=2.75              ; average CHF per m2
;material_cost=2.5              ; CHF per m2, zermatt
;material_cost=2.5              ; CHF per m2, titlis
;material_cost=3                ; CHF per m2, rhonegletscher
;material_cost=3                ; CHF per m2, saas-fee

placement_cost=3.02             ; average CHF per m2, (including transport)
;placement_cost=3.94            ; CHF per m2, (including transport), zermatt
;placement_cost=5.10            ; CHF per m2, (including transport), titlis
;placement_cost=1.09            ; CHF per m2, (including transport), rhonegletscher
;placement_cost=1.95            ; CHF per m2, (including transport), saas-fee

maintenance_cost=[0,2,6.04]     ; average CHF per m2 per year, depending on mode
;maintenance_cost=[0,2,7.88]    ; CHF per m2 per year, zermatt
;maintenance_cost=[0,2,10.2]    ; CHF per m2 per year, titlis
;maintenance_cost=[0,2,2.18]    ; CHF per m2 per year, rhonegletscher
;maintenance_cost=[0,2,3.9]     ; CHF per m2 per year, saas-fee

livetime=4                      ; [a] typical lifetime of geotextile (average)
;livetime=8                     ; [a] lifetime zermatt
;livetime=3                     ; [a] lifetime titlis
;livetime=5                     ; [a] lifetime rhonegletscher
;livetime=4                     ; [a] lifetime saas-fee

ch_glarea=900.                  ; km2

; ------------------------------

ns=n_elements(sites)
names=strarr(ns) & elev=dblarr(ns) & ela=elev & mode_g=elev & garea=elev & years=dblarr(ns,5)+noval & cov=years & cov_now=elev


; read
for i=0,ns-1 do begin
   fn=dir+'data/'+sites(i)+'.dat' & anz=file_lines(fn)-7 & da=dblarr(2,anz) & s1=strarr(4) & tt=dblarr(5,1) & s2=strarr(2)
   openr,1,fn & readf,1,s1 & readf,1,tt & readf,1,s2 & readf,1,da & close,1
   names(i)=s1(0)
   elev(i)=tt(0) & ela(i)=tt(1) & garea(i)=tt(3) & mode_g(i)=tt(4)
   for j=0,anz-1 do years(i,j)=da(0,j) & for j=0,anz-1 do cov(i,j)=da(1,j)
   a=min(abs(years(i,*)-target_year),ind) & cov_now(i)=cov(i,ind)/1000000.
endfor


; ---------------------------------------
; evaluate

print, 'Covered glacier area in about '+string(target_year,fo='(i4)')+' (km2):'+string(total(cov_now),fo='(f8.4)')
print, 'Percent of present Swiss glacier area: '+string(total(cov_now)*100./ch_glarea,fo='(f10.4)')+' %'
print, ''

; melt reduction
reduction=dblarr(ns) & cost=reduction & mb_effect=cost
for i=0,ns-1 do begin
    prec_ela=solid_precipitation+(3000.-ela(i))*0.002 & melt=prec_ela+(ela(i)-elev(i))*mbgradient-mb_anomaly
    reduction(i)=melt*efficiency/100.*cov_now(i)*1000000.
endfor

print, 'Total ice melt reduction per year (m3):'+string(total(reduction)/0.9,fo='(i8)')
print, 'Relative ice melt reduction (%):'+string(total(reduction)*100/(ch_glarea*1000000./0.9*(-1.)*mb_anomaly),fo='(f8.5)')
print, ''

; mass balance effect
for i=0,ns-1 do begin
    mb_effect(i)=reduction(i)/(garea(i)*1000.)
endfor
print, 'Max. MB effect (mm w.e. a-1):'+string(max(mb_effect,ind),fo='(f9.3)')+' - '+sites(ind)
print, 'Min. MB effect (mm w.e. a-1):'+string(min(mb_effect,ind),fo='(f9.3)')+' - '+sites(ind)
print, 'AVG MB effect covered glaciers (mm w.e. a-1):'+string(total(reduction)/(total(garea)*1000.),fo='(f9.3)')
print, 'MB effect on all Swiss glaciers (mm w.e. a-1):'+string(total(reduction)/(ch_glarea*1000.),fo='(f9.3)')
print, ''


; cost
for i=0,ns-1 do begin
    ;cost(i)=material_cost*cov_now(i)*1000000./livetime+maintenance_cost(mode_g(i))*cov_now(i)*1000000.
    cost(i)=((material_cost)*cov_now(i)*1000000./livetime)+(maintenance_cost(mode_g(i))*cov_now(i)*1000000.)+(placement_cost*cov_now(i)*1000000.)
endfor
print, 'Total cost per year (CHF):'+string(total(cost),fo='(i9)')
print, 'Cost per m3 ice per year (CHF):'+string(total(cost)/total(reduction)/0.9,fo='(f7.2)')

print, ''
print, 'Results for all individual glaciers in list:'
print, '(name)  (melt reduction in m3)  (total cost in CHF)  (efficiency CHF/m3)'
for i=0,ns-1 do print,names(i),reduction(i)/0.9,cost(i),cost(i)/(reduction(i)/0.9),fo='(a,4x,2i10,f8.2)'

; ---------------------------------------
; plot

;device,/close_file

end
```

A.4 Evolution der Abdeckungen

1. Corvatsch

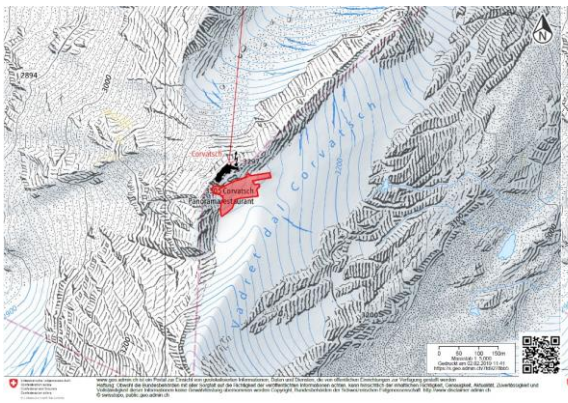


Abbildung 1: Abdeckung Corvatsch 2009, 6’095m²

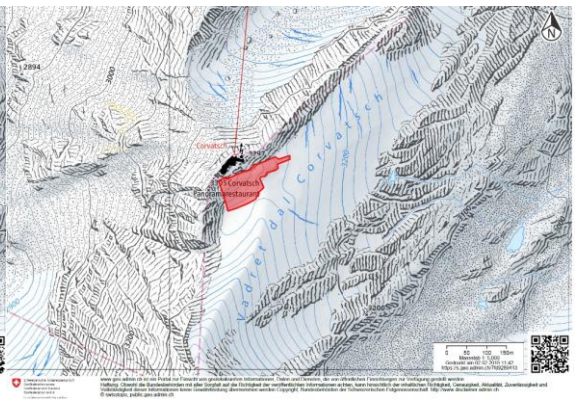


Abbildung 2: Abdeckung Corvatsch 2012, 9’608m²

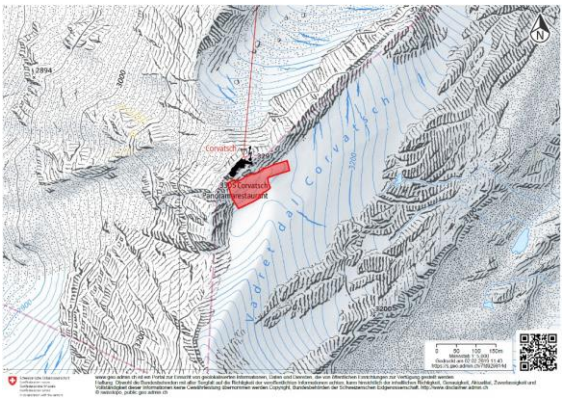


Abbildung 3: Abdeckung Corvatsch 2015, 7’729m²

2. Diavolezza

Speziell am Standort Diavolezza ist, dass dato 2019 alles, was vom Gletscher übrig ist, abgedeckt wird. Somit sind die Abdeckungsfläche und die Gletscherfläche identisch.

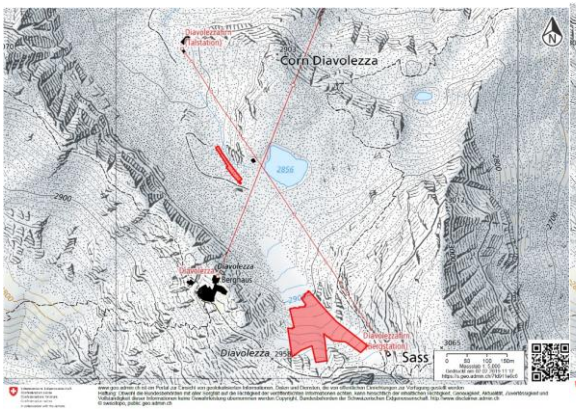


Abbildung 4: Abdeckung Diavolezza 2009, 16’170m²

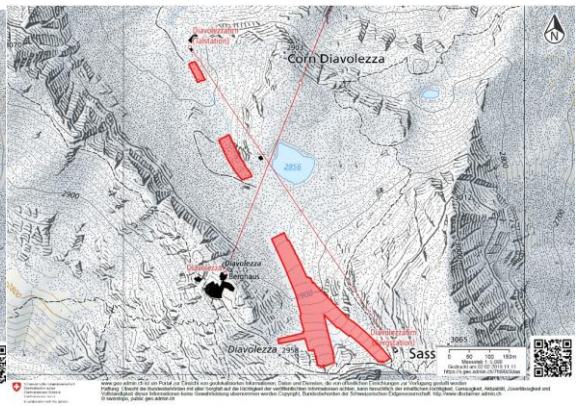


Abbildung 5: Abdeckung Diavolezza 2012, 29’367m²

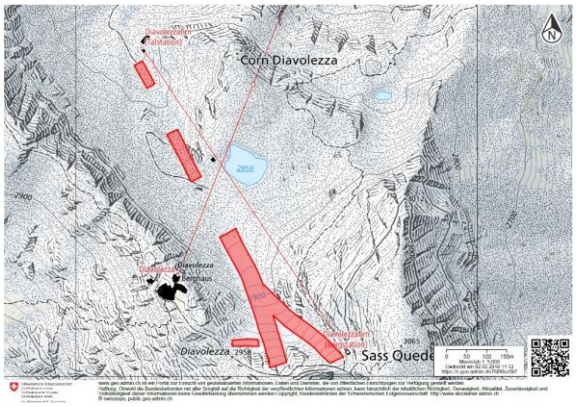


Abbildung 6: Abdeckung Diavolezza 2015, 30’614m²

3. Gurschenfirn Gemsstock, Andermatt

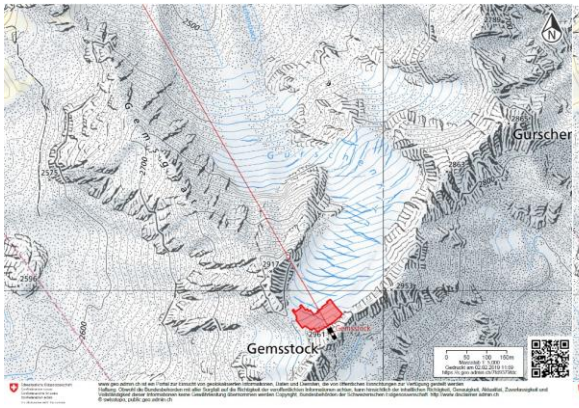


Abbildung 7: Abdeckung Gurschenfirn 2013, 5’002m²

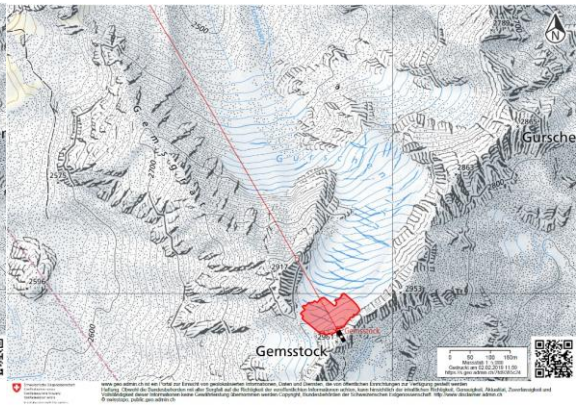


Abbildung 8: Abdeckung Gurschenfirn 2016, 8’939m²

4. Vorabgletscher, Flims Laax

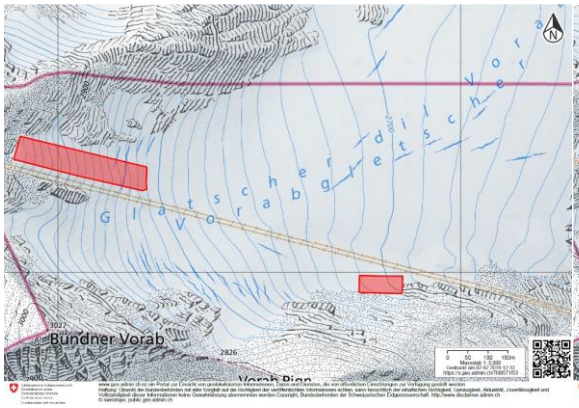


Abbildung 9: Abdeckung Vorabgletscher 2008, 24'585m²

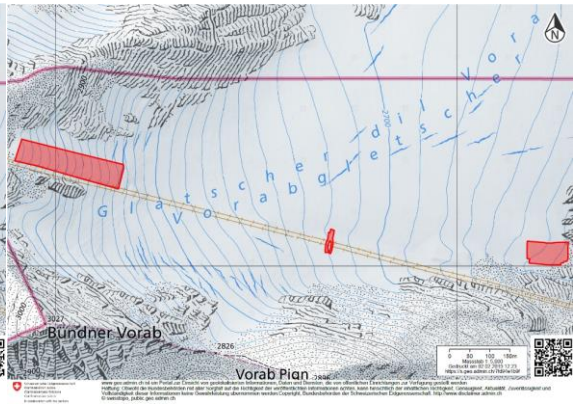


Abbildung 10: Abdeckung Vorabgletscher 2011, 21'526m²

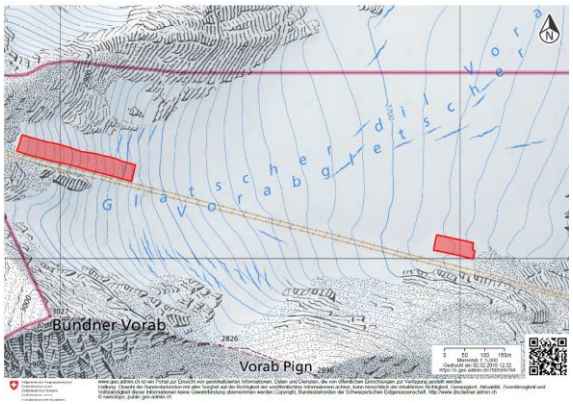
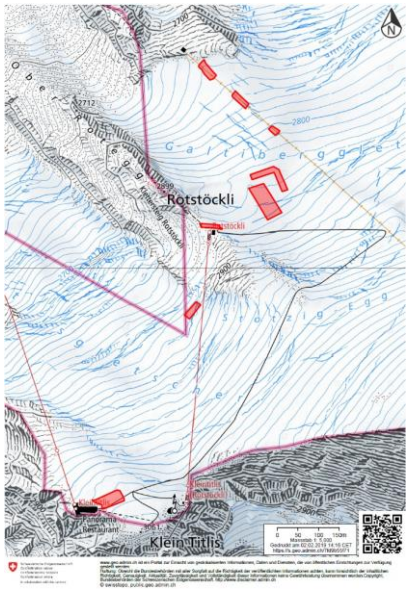


Abbildung 11: Abdeckung Vorabgletscher 2014, 16'611m²

5. Titlis



Für den Titlis ist nur die Abdeckungsfläche von 2018 verfügbar. Dies ist damit zu erklären, dass auf den Luftbildern keine oder nur unvollständige Abdeckungsflächen aufzufinden sind. Die Abdeckungen von 2018 wurden in Rücksprache mit dem Verantwortlichen fixiert, so dass diese mit Sicherheit richtig sind. Des Weiteren hat der Verantwortliche bekanntgegeben, dass im Jahr 2020 20’000m² abgedeckt werden.

Abbildung 12: Abdeckung Titlis 2018, 9'529m²

6. Oberer Theodulgletscher, Zermatt

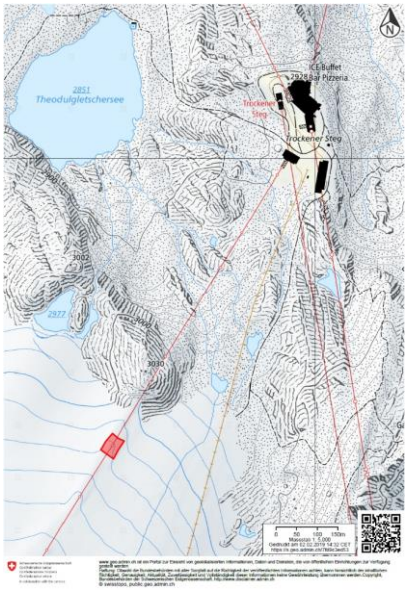


Abbildung 13: Abdeckung ob. Theodulgl. 2006, 1'767m²

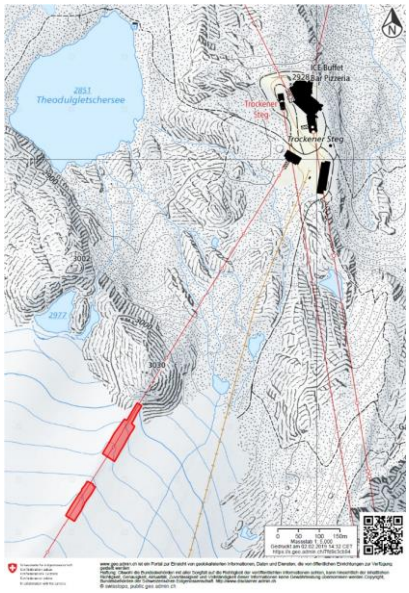


Abbildung 14: Abdeckung ob. Theodulgl. 2010, 6'385m²

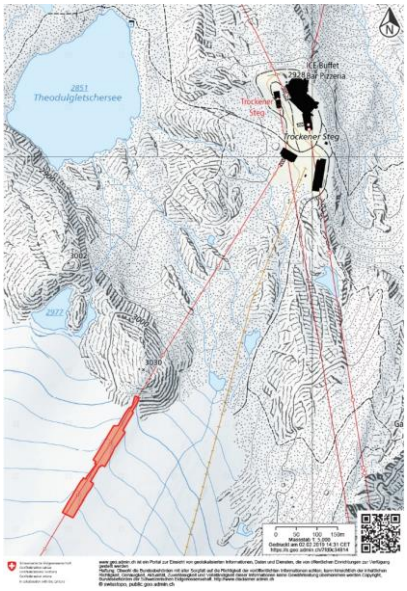


Abbildung 15: Abdeckung ob. Theodulgl. 2012, 7'664m²

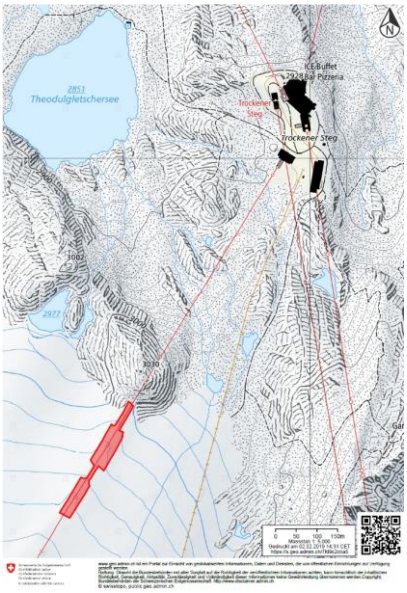


Abbildung 16: Abdeckung ob. Theodulgl. 2015, 8'291m²

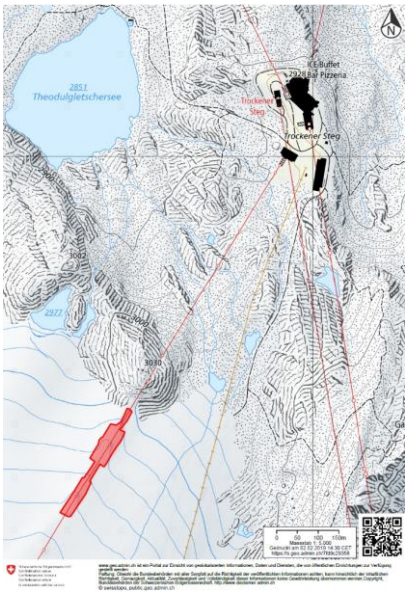


Abbildung 17: Abdeckung ob. Theodulgl. 2018, 8'068m²