# **Gletscherschutzprojekt MortAlive**

Graubündner Kantonalbank #gkb2020

Projekt Nr. 19/20033

## **Vorstudie MortAlive**

## Projektausführung:

Dr. sc. nat. ETH Felix Keller (Glaziologe),
Dr. sc. techn. Dieter Müller (Dipl. Bauingenieur ETH),
Dr. sc. nat. Christine Levy (Geographin),
Christine Seupel (Geophysikerin/Geoinformatikerin)

Academia Engiadina, 7503 Samedan

## Zusammenfassung

Der Gletscherschwund beschäftigt weltweit. Insbesondere in Zentralasien (Himalaya) und Südamerika (Anden) bedrohen schwindende Gletschermassen die Verfügbarkeit von Süsswasser von über 200 Mio. Menschen. Dank der vorliegenden Vorstudie könnte das am Morteratschgletscher bei Pontresina entwickelte Verfahren diesen Menschen helfen. Mit dem von uns bezeichneten «Schmelzwasser Recycling» wird das in höheren Lagen anfallende Schmelzwasser gesammelt und im folgenden Winter mit einer hocheffizienten Schneitechnologie ohne den Einsatz von elektrischem Strom verschneit. Diese Schneedecke schützt im folgenden Sommer tieferliegende Gletschergebiete vor der Schmelze. In dieser Vorstudie wurden die wichtigsten Grundlagen für ein reales Ausführungsprojekt auf dem Morteratschgletscher erarbeitet und die dazu notwendigen Baumassnahmen und Ausrüstung festgelegt.

Im Umfeld des MortAlive Projektes steht auch die wichtige Frage nach den zukünftigen Klimaszenarien, auf die in diesem Bericht bewusst nur der Bezug zu den Arbeiten der Universität Fribourg hergestellt wird, da der Fokus auf der technischen Machbarkeit und den baulich und planerisch zu bewältigenden Herausforderungen liegt. Damit sollen die Grundlagen geschaffen werden, um das MortAlive Verfahren aus technischer Sicht weiter zu bringen. Aus dieser Perspektive wäre auch die Realisierung des MortAlive Projektes zu betrachten, denn im Oberengadin herrscht in naher Zukunft weder einseitige Abhängigkeit von Gletscher Schmelzwasser noch wüstenähnliche Trockenheit.

Auf der naturwissenschaftlichen Seite wurden mit dem sogenannten Modell COSIPY mittels Massenbilanzberechnungen die Schmelzwasserabflüsse im fraglichen Einzugsgebiet abgeschätzt und mit Abflussmessungen validiert. Anschliessend wurde der Einfluss der schützenden Schneeschicht auf die Massenbilanz des Morteratschgletschers untersucht. Im Hinblick auf die zu planenden Bauwerke wurde mit Radarmessungen die Topographie des zurzeit noch eisbedeckten Gletscherbettes und für den ganzen Projektperimeter die geologische Situation, die Existenz von Permafrost sowie die Naturgefahren Eisstürze, Stein- und Felsstürze sowie Lawinen und Murgänge untersucht. Auf der baulichen Seite wurde der Fokus auf die Wasserlogistik, namentlich dem zu erstellenden Speichersee «Pers», einer Entsanderanlage, einem Verbindungsstollen, sowie der Fundation, Ausrüstung, Auslegung und Anordnung der Schneiseile sowie der Erschliessung der Baustellen gelegt. Diese Arbeiten bilden die Grundlage für die Berechnung der Baukosten der ganzen Anlage. Im Bereich Nachhaltigkeit wurde eine Relevanzanalyse mit den Bundesratskriterien durchgeführt und die Umwelteinflüsse im Sinne von Vorarbeiten für eine Umweltverträglichkeitsprüfung übersichtsmässig erfasst. Dazu gehört auch eine Zusammenstellung der rechtlichen Grundlagen und eine Risikoanalyse. Abschliessend werden die gesellschaftlichen und politischen Aspekte angesprochen, die bei einem derart langfristigen und visionären Vorhaben eine Rolle spielen werden.

Nach Abschluss dieser Vorstudie zeigt sich klar, dass unter der Voraussetzung der erfolgreichen Entwicklung der Schneiseil-Technologie im laufenden Innosuisseprojekt der Erhalt eines gefrorenen Süsswasserspeichers beim Morteratschgletscher als machbar bezeichnet werden kann. Dabei ist die Ausgewogenheit zwischen Einsatz von Technologie, Umwelteingriffen und

natürlichen Grenzen unbedingt Beachtung zu schenken. Aufgrund der Massenbilanzanalysen muss jährlich ein Wasservolumen von ca. 2.5 Mio. m<sup>3</sup> bereitgestellt werden können, damit eine Fläche von 0.8 km² ganzjährig mit einer Schneeschicht unter den heutigen Klimabedingungen vollständig vor dem Schmelzen geschützt werden kann. Im Gebiet des benachbarten Persgletschers muss hierzu eine 650 m lange und maximal ca. 31 m hohe Gewichtsmauer erstellt werden. Das zu speichernde Wasser kann aus dem Schmelz- und Regenwasser des Persgletschers gewonnen werden womit eine Beschneiung ohne zusätzliche Energie machbar ist. Die auf dem Morteratschgletscher geplante Schneianlage besteht aus acht zwischen 850 und 1200 m langen Schneiseilen. Diese wird über einen 900 m langen Stollen durch die Isla Persa mit dem Speichersee verbunden. Um die Landschaftsbelastung bei der Erschliessung des Projektperimeters minimal zu halten, wird ein ca. 5 km langer Erschliessungsstollen vorgeschlagen. Die Risikoanalyse zeigt, dass das Ausmass des Klimawandels ein ernstzunehmendes Risiko ist und das Verfahren trotz seiner Flexibilität betreffend Anzahl Schneiseile/Düsen und Positionierung an seine Grenzen stossen kann. Für den Bau der gesamten Anlage inkl. Projektierung, Bewilligungsverfahren und Reserven für Unvorhergesehenes muss mit Kosten von ca. 156 Mio. Schweizer Franken (± 30%) gerechnet werden. Auf Basis des heutigen Entwicklungsstands der Schneiseiltechnologie konnten noch keine Kosten für den Betrieb und Unterhalt der Anlage evaluiert werden. Gemäss der Projektplanung liegt der früheste Zeitpunkt für die Inbetriebnahme der Anlage im Jahr 2031. Die Bauzeit beträgt 7 Jahre. Bis dahin muss neben der Fertigentwicklung der Schneiseiltechnologie, der Bereitstellung der Finanzen und der Erstellung eines Bau- und Ausführungsprojektes inkl. Umweltverträglichkeitsbericht im Hinblick auf die Baubewilligung viel Einsatz geleistet werden, denn der Morteratschgletscher ist Teil eines umfassend geschützten BLN-Gebietes.

#### **Vorwort**

2020 feierte die GKB ihr 150-Jahr Jubiläum (#gkb2020) und setzte dabei Zeichen für eine nachhaltige Zukunft. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Projekte entwickelt, welche während des Jubiläumsjahres realisiert wurden und über das Jahr 2020 hinaus weiter wirken.

Ein unterstützungswürdiges Themenfeld heisst «Gletscher und Klima». Dazu erarbeiteten die Zürcher Hochschule der Künste in Zusammenarbeit mit der Universität Fribourg attraktive und einfach verständliche Informationen über die faszinierende Gletscherwelt und deren Zusammenhänge mit dem Klima, der Gesellschaft und der natürlichen Umwelt. Diese Inhalt werden im Besucherzentrum VR Glacier Experience an der Talstation Diavolezza den Gästen in einfachster Weise aufgezeigt und erklärt.

Ein weiterer Baustein im #gkb2020 Themenfeld «Gletscher und Klima» stellt diese Vorstudie dar, in welcher weltweit zum ersten Mal Überlegungen angestellt werden, wie die technische Anlage zur Pflege eines Gletschers mit dem MortAlive Verfahren am Beispiel des Morteratschgletschers aussehen könnte. Dabei stehen also bauliche und konstruktive Aspekte im Vordergrund, die aufgrund der vorliegenden glaziologischen, geologischen, topographischen und meteorologischen Voraussetzungen von Bedeutung sind. Natürlich sind auch Kosten, Bewilligungen und Fragen zur Nachhaltigkeit bei der Planung eines Bauwerkes zu beachten, worauf in dieser Studie auch eingegangen wird.

Als MortAlive Team ist es uns ein Anliegen, der Graubündner Kantonalbank für Ihr Engagement zu danken, um mutig in die wohl noch ungewisse Zukunft zu schauen. Entsprechend dem Zitat von Steven Covey «Be a part of the solution and not of the problem» möchten wir uns gemeinsam für eine gute Zukunft einsetzen.

Samedan, Juni 2021

Das MortAlive Team

| Abb | ildu                   | ngen  | . 2                      |  |  |  |  |
|-----|------------------------|---|--------------------------|--|--|--|--|
| Tab | ellei                  | າ   | . 4                      |  |  |  |  |
| 1   | Einl                   | eitung / Auftrag  | . 5                      |  |  |  |  |
| 2   | Ausgangslage           |   |                          |  |  |  |  |
| 3   | Ziele                  |   |                          |  |  |  |  |
| 4   | Vorgehen               |   |                          |  |  |  |  |
| 5   | Technische Machbarkeit |   |                          |  |  |  |  |
|     | 5.1                    | Grundlagen  | 9                        |  |  |  |  |
|     |                        | 5.1.1 Meteorologische Verhältnisse  | .11<br>.15<br>.19<br>.22 |  |  |  |  |
|     |                        | 5.1.6 Naturgefahren   |                          |  |  |  |  |
|     |                        | 5.1.8 Verfügbarkeit von Beschneiungswasser  | .33                      |  |  |  |  |
|     | 5.2                    | Vorbemessung Beschneiung  |                          |  |  |  |  |
|     | 5.3                    | Bau – Planung   | .38                      |  |  |  |  |
|     | 5.4                    | Ausrüstung – Auslegung  |                          |  |  |  |  |
|     | 5.5                    | Betrieb und Unterhalt   | .45                      |  |  |  |  |
| 6   | Nachhaltigkeit46       |   |                          |  |  |  |  |
|     | 6.1<br>6.2             | Umwelteinflüsse   |                          |  |  |  |  |
| 7   | Risi                   | ken   | 51                       |  |  |  |  |
| 8   | Kos                    | ten!  | 55                       |  |  |  |  |
| 9   | Ter                    | minplanung  | 57                       |  |  |  |  |
| 10  | Rec                    | htliche Grundlagen  | 57                       |  |  |  |  |
|     | 10.1                   | BLN   | .59                      |  |  |  |  |
|     |                        | Wildtierschutzgebiet  |                          |  |  |  |  |
|     |                        | Bundesgesetz über die Raumplanung  Bewilligungsverfahren (UVB/Termine/Baubewilligungen) |                          |  |  |  |  |
| 11  | Ges                    | sellschaftliche und Politische Aspekte  | 63                       |  |  |  |  |
| 12  | Sch                    | lussfolgerungen und Empfehlungen  | 64                       |  |  |  |  |
| 13  | Lite                   | eraturverzeichnis   | 66                       |  |  |  |  |
| 14  | Anh                    | nang  | 68                       |  |  |  |  |

# **Abbildungen**

| Abbildung 1: Künstlerische Visualisierung der ersten Visionen der                                     |            |
|---|------------|
| Schneiseilanlage auf dem Morteratschgletscher (Graphik: Andy  |            |
| Pfenninger) <sub></sub>   | 6          |
| Abbildung 2: Übersicht über die ersten Vorstellungen des MortAlive                                    |            |
| Projektes aus dem Jahr 2018   | 7          |
| Abbildung 3: Zeit in Prozent, in der auf dem Morteratschgletscher an der                              |            |
| Lokation der Wetterstation Schnee produziert werden kann für drei                                     |            |
| hydrologische Jahre   | 11         |
| Abbildung 4: Längsprofile des Morteratschgletschers im Jahr 2100 für die                              |            |
| verschiedenen Szenarien. Gestrichelte Linien zeigen die Berechnung mit,                               |            |
| durchgezogene Linien ohne künstlichen Schnee (Oerlemans, et al.,                                      |            |
| 2017).  | 14         |
| Abbildung 5: Mögliche Seen (dunkelblau) die sich nach dem Abschmelzen                                 |            |
| des Morteratsch- und Persgletschers bilden werden. Die im Jahr 2100                                   |            |
| noch verbleibende Gletscherfläche gemäss der Arbeit von (Rothenbühler,                                |            |
| 2006) ist hellblau eingezeichnet  | 14         |
| Abbildung 6: Längsprofile des Morteratschgletschers für Szenario (iv) für                             |            |
| den Fall mit (a) und ohne künstlichen Schnee (b). Die blauen  |            |
| gestrichelten Linien markieren die Pegel von potenziellen Gletscherseen.                              |            |
| Die Gletscherfront von 2090 ist mit einem kleinen Pfeil markiert                                      |            |
| (Oerlemans, et al., 2017)   | 15         |
| Abbildung 7: Hypsometrie des Pers- und Morteratschtgletschers   |            |
| (Datengrundlage DHM25)  | 16         |
| Abbildung 8: Gletscherbett-Topographie des Morteratsch- und   |            |
| Persgletschers nach (Grab, et al., 2021) Die Höhendifferenz zwischen                                  |            |
| den Höhenlinien beträgt 200 m. Das rote Kästchen markiert den Bereich                                 | 4 -        |
| für einen möglichen Speichersee   | 1/         |
| Abbildung 9: Auf der Grundlage der Radarmessungen (schwarze Linien)                                   |            |
| vom 4. Februar 2021 interpolierte Höhenlinien des Gletscherbettes im                                  | 10         |
| Bereich des zukünftigen Schmelzwassersees   | 10         |
| Abbildung 10: Permafrost- und Bodeneiskarte des SLF (PGIM) im Gebiet Boyalhütte – Isla Persa (Ouelle: |            |
| ( )   |            |
| https://www.slf.ch/de/permafrost/bauen-im-permafrost/permafrost-                                      | 20         |
| und-bodeneiskarte.html)   | 20         |
| (Legende: rot: kein Permafrost, grau: Unsicherheitsbereich, blau:                                     |            |
| Permafrost wahrscheinlich)  | 21         |
| Abbildung 12: Geologische Karte des Berninamassivs, Ausschnitt der Val                                | <b>Z</b> I |
| Morteratsch (Spillmann, 1993)   | 23         |
| Abbildung 13: Geologisches Profil Persgletscher-Gemsfreiheit-Fortezza                                 | 23         |
| Gletscher – Morteratschgletscher (Spillmann, et al., 2007))   | 24         |
| Abbildung 14: Flächen mit einer Hangneigung von 30° oder mehr   | ۷٦         |
| (swisstopo). Rot eingekreist sind mögliche Lawinenanrisszonen, die roten                              |            |
| Pfeile zeigen die Lawinenzugbahnen aufgrund des Geländes (Rinnen)                                     | 26         |
| Abbildung 15: Diverse Nassschneelawinen auf der orographisch linken Seite,                            | 20         |
| blau umkreist ist das Gebiet «Gianda Boval» (Foto: 1.6.2019)  | 27         |
| Abbildung 16: Potentielle Anrissgebiete von Eislawinen (rote Rechtecke)                               | ر ح        |
| sowie die möglichen Ablagerungsgebiete (rote Kreise; Foto: 23.6.2018).                                |            |
|   | 28         |
|   |            |

| Abbildung 17: Ausschnitt aus der geomorphologischen Karte. Das rote<br>Rechteck markiert die Moränenbastion, welche bereits zwei Murgang- |    |
|---|----|
| Anrisse aufweist (Koch, 2003)   | 30 |
| Abbildung 18: Lage der Punkte für die Eingabe der Salzlösung sowie der  | 50 |
| Messpunkte (Orthophoto: (swisstopo, 2021))  | 31 |
| Abbildung 19: Abflussspenden für den Rosegbach und die Massa (Daten:  |    |
| BAFU)   | 32 |
| Abbildung 20: Mögliche Einzugsgebiete der Abflussmessungen am   | J_ |
| Persgletscher (blauer Punkt). Einzugsgebiet 1 wird durch die rote Linie   |    |
| markiert. Einzugsgebiet 2 beinhaltet die Fläche von Einzugsgebiet 1 (rote   |    |
|   | 33 |
| Abbildung 21: Möglicher Standort eines Speichers beim Gletschertor Pers   |    |
|   | 34 |
| Abbildung 22: Modellierung der Beschneiung Morteratsch  | •  |
| (CONFIG_KW22_Basl) für folgende Randbedingungen: 8 Schneiseile, je  |    |
| 100 Düsen pro Schneiseil, Speichervolumen Pers von 2.5 Mio. m <sup>3</sup>  |    |
| ·   | 36 |
| Abbildung 23: Modellierung der Beschneiung Morteratsch  |    |
| (CONFIG_KW22_Basline.csv) für folgende Randbedingungen:8  |    |
| Schneiseile, je 100 Düsen pro Schneiseil, Speichervolumen Pers von 2.25   |    |
|   | 37 |
| Abbildung 24: Modellierte Schneehöhen mit COSIPY mit Beschneiung für  |    |
| ein verfügbares Wasservolumen von 1.5 Mio. m³ und 2.5 Mio. m³ an der  |    |
| Lokation der Wetterstation für drei hydrologische Jahre   | 37 |
| Abbildung 25: Summenkurven (in m³) des anfallenden Schmelzwassers   |    |
| (blau) und des verbrauchten Beschneiungswassers (rot) für das   |    |
| hydrologische Jahr 2017/2018  | 38 |
| Abbildung 26: Übersicht der möglichen Anordnung der notwendigen Bauten  |    |
|   | 39 |
| Abbildung 27: Situationsplan des Speichers Pers (blau) inkl. Sperrenachse   |    |
| (rot/weiss)   | 40 |
| Abbildung 28: Stollenprofil mit Druckleitung  | 41 |
| Abbildung 29: Übersicht der Baustellenerschliessungsmöglichkeiten   | 43 |
| Abbildung 30: Die Wasser- und Druckluftleitung werden an den Tragseilen   |    |
| aufgehängt  | 44 |
| Abbildung 31: Drucklufterzeugung mit Turbine und Kompressor   | 44 |
| Abbildung 32: Seilreiter Abbildung 33: Wartungsbahn   | 45 |
| Abbildung 34: Risikomatrix aus Wirkung und Eintreffenswahrscheinlichkeit  |    |
| der identifizierten Risiken ohne Risikoprävention und   |    |
| Korrekturmassnahmen   | 52 |
| Abbildung 35: Risikomatrix aus Wirkung und Eintreffwahrscheinlichkeit   |    |
| der identifizierten Risiken mit Risikooptimierung durch Risikoprävention  |    |
| und Korrekturmassnahmen   |    |
| Abbildung 36: Entwurf Bauablauf und -programm   | 57 |

# **Tabellen**

| Tabelle 1:    | _               |               | _              |             |                |       |
|---------------|-----------------|---------------|----------------|-------------|----------------|-------|
| 02.09.20      | 20 mit Werte    | n die an dei  | n jeweiligen S | Sonden ge   | emessen wur    | den.  |
|               |                 |               |                |             |                | 32    |
| Tabelle 2:    | Kenndaten f     | ür die Statio | onen am Ros    | egbach ur   | nd Massa (Da   | aten: |
| BAFU).        |                 |               |                |             |                | 32    |
| Tabelle 3: Pi | rototyp einer   | möglichen     | Relevanzma     | atrix als I | Bestandteil e  | eines |
| Umweltve      | erträglichkeits | sberichts     |                |             |                | 47    |
| Tabelle 4:    | Relevanzana     | nalyse zur    | ersten Ein     | schätzung   | g der mögli    | chen  |
| Wirkunge      | en anha         | and d         | er Bur         | ndesratski  | riterien       | zur   |
| Nachhalti     | gkeitsbeurtei   | lung          |                |             |                | 49    |
| Tabelle 5:    | Identifizierte  | e Risiken n   | nit Kurzbesc   | hreibung    | und Indikat    | oren  |
| beim Eint     | reffen des Ri   | sikos (Farb   | kodierung ge   | emäss Abl   | oildung 34     | 51    |
| Tabelle 6:    | Präventions-    | und Korre     | kturmassnah    | nmen zu d   | en identifizie | erten |
| Risiken u     | nd zugehörig    | e Erfolgsfal  | ktoren         |             |                | 53    |
| Tabelle 7:    |                 |               |                |             |                |       |

## 1 Einleitung / Auftrag

Der Morteratschgletscher bei Pontresina zeigt die Auswirkungen der globalen Erwärmung. Wir haben Bilder aus unserer Kindheit im Kopf, wie die Gletscherzunge weit ins Tal reicht. Heute sehen wir, wie die Eismassen schrumpfen, in den letzten Jahrzehnten in einem immer schnelleren Tempo. Hohe Moränen prägen die Landschaft und zeigen uns, wo der Gletscher sich 1860 befand.

Der Gletscherschwund beschäftigt weltweit. Insbesondere in Zentralasien (Himalaya und Südamerika (Anden) sorgen schwindende Gletschermassen für bedrohliche Zustände bei der Wasserversorgung und der Bewässerung. Gemäss einer kürzlich erschienenen Studie im Wissenschaftsmagazin «Nature» sind rund 221 Millionen Menschen im Himalayagebiet direkt vom Schmelzwasser der Gletscher abhängig (Pritchard, 2019). Mit dem Abdecken der dortigen Gletscher mit Schnee könnte das Schmelzen stark verzögert werden.

Über die Nutzung der wissenschaftlichen Basis und den Einbezug, der sich in Entwicklung befindenden Schneiseiltechnologie wird in der vorliegenden Studie MortAlive nun erstmalig eine Planungsarbeit, für die möglicherweise weltweit erste grossangelegte Pflege eines Gletschers zum Erhalt eines Süsswasserspeichers erstellt. In dieser Planungsarbeit geht es um eine erste Vorstudie für diese Anlage, um das MortAlive Verfahren aus technischer Sicht voran zu bringen, während auf die Erfolgschancen aus glaziologischer Sicht und Wirtschaftlichkeitsaspekten weniger eingegangen wird.

# 2 Ausgangslage

Wenn man das massenweise im Sommer anfallende Schmelzwasser des Gletschers möglichst hoch oben sammeln, im Winter in Form von Schnee wieder recyceln und so dem Gletscher zurückgeben würde, könnte das Gletscherschmelzen verzögert werden - der Begriff «Schmelzwasser-Recycling» entstand. Was passiert also, wenn man Gletscher mit Schnee abdeckt? Das war eine zentrale Frage, die sich der Glaziologe Felix Keller an der Academia Engiadina in Samedan zusammen mit Johannes Oerlemans von der Universität Utrecht (NL) im Auftrag der Gemeinde Pontresina seit 2015 stellte. Es folgten zahlreiche Studien und Feldversuche im Oberengadin und eine glaziologische Machbarkeitsstudie wurde durchgeführt und wissenschaftlich publiziert (Oerlemans, et al., 2017). Als deren Grundlage diente die weltweit längste Energiebilanz-Messreihe auf einer Gletscherzunge, welche vom Team von Johannes Oerlemans auf dem Morteratschgletscher gemessen wurde. Zudem liegen aus dem Schweizer Gletschermessnetz Längenmessungen seit 1878 vor (GLAMOS, 1881-2020). Es konnte wissenschaftlich dargelegt werden, dass unter den Klima-Bedingungen des frühen 20ten Jahrhunderts sogar ein Gletscherwachstum (Zunahme der Länge) in 10 Jahren möglich sei, wenn man 10 % der Gletscherfläche mit Schnee ganzjährig abdecken würde.

Da die technische Beschneiung gemäss den ersten Erkenntnissen im Frühling jeweils mit meteorologisch grenznahen Bedingungen (Temperatur,

Luftfeuchtigkeit) durchgeführt werden müsste und demzufolge minimale Abweichungen drastische Auswirkungen haben könnten, wurden die in der wissenschaftlichen Studie gemachten Berechnungen bei einem Beschneiungsexperiment mit einem sogenannten Baby-Gletscher auf der Diavolezza erfolgreich überprüft.

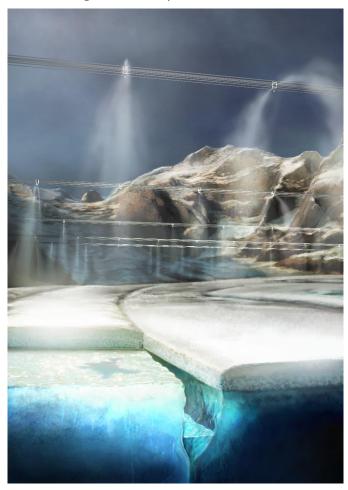


Abbildung 1: Künstlerische Visualisierung der ersten Visionen der Schneiseilanlage auf dem Morteratschgletscher (Graphik: Andy Pfenninger)

Für das lokale Beschneien eines Gletschers sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen. Die Installation herkömmlicher Schneilanzen ist aufgrund der Bodenbeschaffenheit (Permafrost- und Gletschergebiete) nicht möglich. Zudem sollte möglichst keine elektrische Energie für den Wassertransport und die Schneeerzeugung notwendig sein und es muss genug Schmelzwasser zur Verfügung stehen. So entstand die Idee eines bodenunabhängigen Beschneiungssystems. Dabei werden neu zu entwickelnde Schneiseile mit Schneeerzeugern über dem Gletscher angebracht. Die Schweizer Firma Bartholet Maschinenbau AG ist einer der führenden Hersteller von Seilbahnsystemen und weltweit tätig. Die Firma Bächler Top Track AG hat zudem ein Patent auf das «Nessy»-System, dass eine stromfreie Schneeproduktion möglich macht. Im Juni 2019 reichte die Fachhochschule Graubünden (FHGR) bei der Schweizerischen Agentur für Innovationsförderung (Innosuisse) das Projekt ein, welches zeitnah bewilligt

wurde. Im Technologie-Entwicklungsprojekt «Bodenunabhängiges Beschneiungssystem» wird zusammen mit Forschungs- und Industriepartnern, die zur Umsetzung der Gletscherschutzidee notwendige Technologie entwickelt. Forschungsgelder wurden gesprochen für die Entwicklung der Seilklemme, der Schneidüsen und der Seilaufhänger mit Eisbehang. Die Hochschule Luzern (HSLU) ist in diesem ambitiösen Projekt für die Entwicklung der neuartigen Schneidüsen in Zusammenarbeit mit der Firma Bächler Top Track verantwortlich, während die Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) die Beschneiung simuliert. Besondere Beachtung findet auch die Seiltechnik (Klemmen, Schwingungsverhalten). Dieser Aspekt erfolgt über die Zusammenarbeit des Innerstaatlichen Technikums Buchs (NTB) mit der Firma Bartholet.

Dank der Unterstützung durch die Emile Dreyfuss Stiftung, dem Kanton Graubünden, der Region Maloja und der Oberengadiner Gemeinden konnte im Jahr 2018 in einem Flyer eine erste Projektskizze erstellt werden (vgl. Abbildung 2). Mit diesem Flyer konnten unter anderem mit der Teilnahme an der World Rotary Convention im Juni 2019 und zahlreichen Publikumsvorträge bereits erste Diskussionen mit interessierten Personen geführt werden. Mit Andy Pfenninger (illumikon.ch) konnte ein Künstler gefunden werden, welcher die ersten Visionen einer Schneiseilanlage auf dem Morteratschgletscher visualisierte (Abbildung 1).

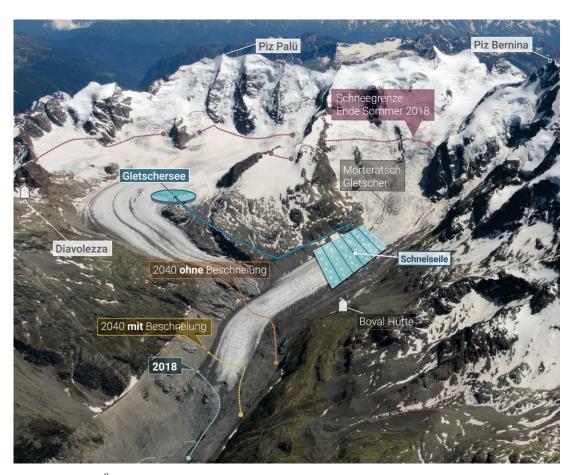


Abbildung 2: Übersicht über die ersten Vorstellungen des MortAlive Projektes aus dem Jahr 2018.

## 3 Ziele

Im Rahmen dieser Ingenieur-Vorstudie für das weltweit erste Projekt für den aktiven Schutz eines Gebirgsgletschers (MortAlive) wurden ausgehend von der obigen Ausgangslage folgende Ziele gesetzt:

- 1. Erarbeitung der wichtigsten Grundlagen für ein reales Ausführungsprojekt auf dem Morteratschgletscher
- 2. Festlegung der dazu notwendigen Baumassnahmen und der Ausrüstung inkl. Risikoanalyse
- 3. Klärung des Bewilligungsverfahrens und Überlegungen zur Nachhaltigkeit
- 4. Grobkostenschätzung
- 5. Projektplan für das weitere Vorgehen inkl. Diskussion von politischen und gesellschaftlichen Aspekten.

# 4 Vorgehen

Über die Nutzung der wissenschaftlichen Basis und dem Einbezug, der sich in Entwicklung befindenden Schneiseil-Technologie wird in der Vorstudie MortAlive nun erstmalig eine Projektierungsarbeit, für die möglicherweise weltweit erste grossangelegte Pflege eines Gletschers zum Erhalt eines Süsswasserspeichers erstellt.

## Natürliche Rahmenbedingungen

Jeder Gletscher wird von vielen unterschiedlichen natürlichen Faktoren beeinflusst. Alleine schon bei der meteorologischen Ausgangslage muss zwischen den Luft-, Schnee- und Eistemperaturen, der lang- und kurzwelligen Strahlungsbilanz, verschiedenartigen Niederschlägen und stark variablen Windsystemen unterschieden werden. Doch auch die Hydrologie (Abfluss und Wasserhaushalt), Topographie und Geologie sind wichtige Teilaspekte. Die im Zusammenspiel aller genannten Einflussfaktoren resultierenden Naturgefahren sind bei einem Gletscher von grosser Bedeutung. Im ersten Teil der MortAlive Vorstudie werden die relevanten natürlichen Rahmenbedingungen aufgezeigt.

## Planung, Bau und Ausrüstung

Im zweiten Teil der Studie werden wichtige Vorarbeiten für die Bauplanung erörtert. Insbesondere der Schmelzwasserrückhalt und die davon abhängende Wasserlogistik sind von zentralem Interesse. Die Schneiseile werden ab Höhe der Bovalhütte über den Gletscher gespannt und würden auf einer Fläche von ca. 1 km² den Gletscher mit Schnee zudecken. Für die Bauplanung bedeutet dies, dass die Anordnung der Schneiseile, die dazu notwendigen Fundationen und die Wasserzuleitung geplant werden müssen.

Im dritten Teil geht es nun um die Spezifikation der Anlage selbst. Wasserund Luftleitungen müssen dimensioniert, Druckluft muss damit erzeugt und die Schneiseile auf die zu ermittelnde Anzahl Düsen ausgelegt werden. Gleichzeitig müssen auch die Schnittstellen zwischen allen Teilsystemen definiert werden.

Kosten und Bewilligungsverfahren

Auch hinsichtlich Kosten gilt es besondere Herausforderungen zu meistern, denn das MortAlive-Projekt macht nur Sinn, wenn man es von Anfang an auf eine Projektdauer von mindestens 30 Jahren auslegt. Sowohl Finanzierung wie auch Betrieb müssen deshalb sorgfältig überlegt werden. Im Bewilligungsverfahren muss dem hohen Schutzgrad der einmaligen Gletscherlandschaft rund um den Piz Bernina Rechnung getragen werden. Dies kann nur gelingen, wenn auch sämtliche Aspekte zur Nachhaltigkeit miteinbezogen werden.

## 5 Technische Machbarkeit

## 5.1 Grundlagen

### 5.1.1 Meteorologische Verhältnisse

Die ersten automatischen Wetterstationen wurden 1995 von der Universität Utrecht auf dem Morteratschgletscher installiert. Seitdem werden kontinuierlich meteorologische Daten erhoben, welche einen guten Überblick über die klimatischen Bedingungen der Ablationszone und das durch die schmelzende Gletscheroberfläche induzierte Mikroklima geben. Im Juni 2016 wurde die MortAlive-Wetterstation in dem Bereich des Morteratschgletschers installiert, in dem die Produktion von Kunstschnee einen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung des Gletschers haben soll (Oerlemans, et al., 2017). Die Abbildung 26 zeigt den Standort der Wetterstation im Jahr 2020. Es werden Wind, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Strahlung sowie Schneehöhe und Eisablation mit dieser Station gemessen.

Zusätzlich sind in unmittelbarer Umgebung des Morteratschgletschers auch weitere, sehr lange meteorologische Messreihen der MeteoSchweiz verfügbar, welche es erlauben Analysen über einen Zeitraum von über einem Jahrhundert zu machen. Im Rahmen der Vorstudie wurden die homogenisierte Datenreihe von Temperatur und Niederschlag von Sils-Maria seit 1864, sowie die stündlichen Daten verschiedener Energieflüsse auf dem Piz Corvatsch seit 1984 verwendet.

Im Bericht (Oerlemans, 2019) wurden diese Daten sehr detailliert ausgewertet. Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst.

Die Schneehöhen unterliegen starken saisonalen Schwankungen. Im schneereichen Jahr 2019 gab es zum Beispiel einen starken Schneefall vom 27. bis 28. Oktober (1.1 m). Dieses Ergebnis ist einzigartig im gesamten Zeitraum der Schneehöhenmessungen auf dem Morteratschgletscher. Die Eisablation zeigt ein konsistentes Bild mit der Schneehöhenbilanz: Sobald die Gletscheroberfläche schneefrei ist (meist ab Ende Juni), beginnt das darunterliegende Eis zu schmelzen. Ab Oktober oder November gibt es die ersten Schneefälle. Die Eisablationsraten zeigen aber auch

wetterbedingte Schwankungen. Sonnige Tage im Hochsommer verursachen die grössten Abschmelzraten, da die kurzwellige Sonnenstrahlung den größten Teil der Schmelzenergie liefert (Klok, et al., 2004).

Für die kurzwellige Strahlungsbilanz ist die Oberflächen-Albedo (das Rückstrahlungsvermögen) der entscheidende Faktor. Werden die Albedowerte aus den gemessenen einfallenden und reflektierten kurzwelligen Strahlungen an der Wetterstation berechnet, ergeben sich Werte von ca. 0,75 für eine schneebedeckte Gletscheroberfläche und 0.35 für blankes Eis. Die Albedo für Neuschnee beträgt ca. 0.9. Allgemein ist die Albedo sehr variabel und nimmt im Verlauf der Staubablagerungen und Algenbildung ab.

Es gibt einen starken Kompensationseffekt zwischen der einfallenden kurzwelligen Sonnenstrahlung und der einfallenden langwelligen Strahlung: Ist es bedeckt, fällt weniger kurzwellige und mehr langwellige Sonnenstrahlung ein. Auf dem Gletscher ist die meiste Zeit die emittierte langwellige Strahlung höher als die einfallende, denn um eine positive langwellige Strahlungsbilanz zu erzielen, müsste die Lufttemperatur weit über dem Schmelzpunkt liegen.

Das Mikroklima von Talgletschern ist häufig durch das regelmässige Auftreten von katabatischen Fallwinden gekennzeichnet. Weil die Gletscheroberfläche auch im Winter fast immer kälter ist als die darüber liegende Luft, verdichtet sich die Luft knapp über der Oberfläche und beginnt talwärts zu fliessen. So zeigen auch die Messungen auf dem Morteratschgletscher eine deutliche Vorzugswindrichtung talabwärts (ca. 180°). Es gibt eine schwache sekundäre Vorzugswindrichtung talaufwärts (nördliche Winde). Diese tritt auf, wenn die großräumige atmosphärische Zirkulation stark ist und aus Nordwest oder Norden kommt. Windgeschwindigkeiten grösser als 7 m/s sind selten. Ausserdem besteht für Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes eine klare Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur: Bei höheren Temperaturen steigen auch die Windgeschwindigkeiten weil die Abkühlung der Luft stärker ist.

Die Lufttemperaturen zeigen einen ausgeprägten jahreszeitlichen Zyklus. Die mittleren sommerlichen Lufttemperaturen liegen zwischen 7 und 8 °C. An warmen Sommertagen können die Temperaturen Werte von über 15 °C erreichen, dies führt zu vertikalen Temperaturgradienten in der Größenordnung von mehreren Grad Celsius pro Meter über dem Gletscher. Im Winter sind sehr tiefe Temperaturen von weniger als -15 °C auf dem Gletscher viel seltener als an der nahe gelegenen Station Samedan. Auf Grund des katabatischen Windes auf dem Gletscher wird dort die Luft mit wärmerer Luft von oben durchmischt, während in der Ebene in Samedan häufig kein Wind und eine starke Abkühlung infolge der Abstrahlung auftreten. Deshalb ist im Sommerhalbjahr die Korrelation zwischen der Temperatur über dem Gletscher und in Samedan hoch, im Winterhalbjahr niedrig (Klok, et al., 2004). Hingegen ist die Korrelation mit der am Piz Corvatsch gemessenen Temperatur gross.

Die relative Luftfeuchtigkeit zeigt keinen ausgeprägten jahreszeitlichen Zyklus, obwohl niedrige Werte hauptsächlich im Winter auftreten. Allerdings ist die Variabilität von Tag zu Tag groß. Untersucht man den Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur, zeigt sich, dass hohe Lufttemperaturen mit niedriger relativer Feuchtigkeit einhergehen. Dies ist eine direkte Folge des bekannten Zusammenhangs zwischen

der relativen Luftfeuchtigkeit und der Lufttemperatur an einem warmen Sommertag mit einem starken Tageszyklus.

Abschliessend lässt sich sagen, dass die MortAlive-Wetterstation einen sehr nützlichen mehrjährigen Datensatz über das Mikroklima in der Ablationszone des Morteratschgletschers liefert. Die Daten können für die Simulation der Schneeproduktion oder für eine Auswertung der Oberflächenenrgiebilanz verwendet werden.

Mit Hilfe dieser Daten wurde berechnet, in welchen Zeiträumen Schnee auf dem Gletscher produziert werden kann. Die Bedingungen für eine erfolgreiche Schneeproduktion umfassen eine Feuchtkugeltemperatur von höchstens -2 °C und minimale Windgeschwindigkeiten von 0.1 m/s. Die Ergebnisse für die einzelnen Monate sind in Abbildung 3 dargestellt. Es zeigt sich, dass in den Sommermonaten (Juni bis August) praktisch kein Schnee produziert werden kann, in den Wintermonaten dagegen ist eine fast durchgängige Schneeproduktion möglich.

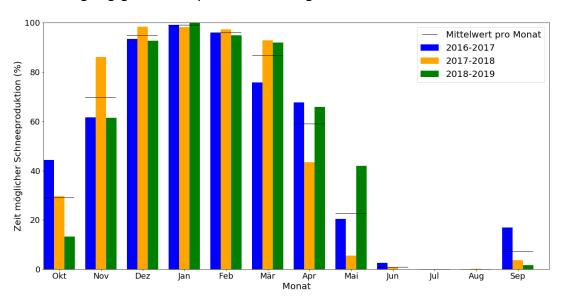


Abbildung 3: Zeit in Prozent, in der auf dem Morteratschgletscher an der Lokation der Wetterstation Schnee produziert werden kann für drei hydrologische Jahre.

#### 5.1.2 Wissenschaftliche MortAlive Vorstudie

Am Anfang des MortAlive Projektes wurde eine Studie durchgeführt, die mit Hilfe eines kalibrierten 2-dimensionalen Fliessmodells die Auswirkungen der Abdeckung des Morteratschgletschers mit künstlichem Schnee modelliert (Oerlemans, et al., 2017). Das Fliesslinienmodell basiert auf der «Shallow Ice Approximation» z.B. (Van der Veen, 2013). Dabei wird die Eisdicke und Geschwindigkeit entlang einer zentralen Fliesslinie berechnet. Die dreidimensionale Geometrie wird anhand von trapezoiden Querschnitten parametrisiert, wobei die Parameter mit der Entfernung entlang der Fliesslinien variieren. Für die Kalibrierung des Modells wurden historische Längendaten von Morteratsch- und Persgletscher genutzt, welche bis ins Jahr 1860 zurückgehen. Mit Hilfe der Messreihen der automatischen Wetterstationen auf dem Morteratschgletscher konnte gezeigt werden, dass eine ausreichende Schneeproduktion in der Ablationszone für eine Fläche von 0,8 km² möglich ist. Die Bedingungen für die Schneeproduktion liegen

im gleichen Bereich wie wir sie in dieser Studie ermittelt haben (Feuchtkugeltemperaturen höchstens -2 °C, Windgeschwindigkeiten mindestens 0.5 m/s).

Um das Modell zu kalibrieren, wurde die Gleichgewichtslinienhöhe (ELA) alle fünf Jahre so angepasst, dass der RMS-Fehler zwischen modellierter und beobachteter ELA minimal ist, dies im Zeitraum von 1860 bis 2015. Gemäss dieser Modellierung ist ein Anstieg der ELA um 200 m seit der kleinen Eiszeit notwendig, um den beobachteten Rückzug des Morteratschgletschers zu erklären. Dies steht in Übereinstimmung mit früheren Studien, wie beispielsweise (Huss, 2010) und (Zekollari, 2014).

Oerlemans modellierte nach der Kalibrierung die Gletscherlänge für die Zukunft unter der Annahme eines «konstanten» Klimas. Dazu wurde der Mittelwert der ELA der Jahre 2001 – 2015 verwendet. Dieses Ergebnis dient für die weiteren Berechnungen mit künstlichem Schnee als Referenz und kann weiterhin zur Bestimmung des Ungleichgewichtes des heutigen Zustandes des Gletschers genutzt werden.

Es wurden Modellierungen für verschiedene Klimawandelszenarien berechnet:

- (i)  $ELA_{ref} = Mittelwert der ELA von 2001 2015 (Referenzszenario)$
- (ii) ELA =  $ELA_{ref}$  + 1 m /a (die Höhe der Gleichgewichtslinie steigt einen Meter pro Jahr an)
- (iii)  $ELA = ELA_{ref} + 2 \text{ m /a}$
- (iv)  $ELA = ELA_{ref} + 4 \text{ m /a}$

Szenario (iii) ist optimistisch, d.h. das Pariser Abkommen wird eingehalten. Es korrespondiert mit einem Anstieg der Temperaturen um 0.022 °C/Jahr und des Niederschlags um 0.08 %/a. Szenario (iv) ist pessimistischer, es korrespondiert mit einem Temperaturanstieg von 3.5 °C in den nächsten 80 Jahren und tritt wahrscheinlich auf, wenn die Kohlenstoffdioxidemission auf dem heutigen Level bleibt. Bei diesem Temperaturanstieg würde auch die Produktion des Kunstschnees in einigen Jahrzehnten unmöglich werden. Allgemein sind die Unsicherheiten für die modellierten Klimaänderungen in den Alpen sehr gross. «Die jüngste Erwärmung in Mitteleuropa war wesentlich größer als der globale oder sogar europäische Mittelwert, und dies könnte teilweise mit der internen Variabilität des Ozean-Atmosphären-Systems zusammenhängen, die keine direkte Folge der globalen Treibhaus-Erwärmung ist. Es bleibt daher unklar, ob die verstärkte Erwärmung (im Vergleich zum globalen Mittelwert) in den kommenden Jahrzehnten anhalten wird» (Oerlemans, et al., 2017).

Wenn ein Gletscherteil (0.8 km²) ab dem Sommer 2017 kontinuierlich mit Schnee bedeckt ist, dauert es 10 Jahre, bis diese Massenbilanzänderung einen Effekt auf die Position der Gletscherzunge hat. Weitere Details zum zeitlichen Längenverlauf des Gletschers sind im Anhang A.1 gegeben.

Abbildung 4 zeigt die Längsprofile des Morteratschgletschers für die Szenarien (i), (ii) und (iii) im Jahr 2100. Der Längenunterschied des Gletschers im Jahr 2100 für die gleichen Szenarien mit oder ohne künstlichen Schnee beträgt ca. 0.8 km. Nur die Szenarien ohne Klimawandel oder mit künstlichem Schnee ermöglichen es, dass die Gletscherzunge im Jahr

2100 unter einer steilen Felsstufe endet. Dies zeigt einmal mehr, wie gross das aktuelle Ungleichgewicht des Gletschers mit den heutigen Klimabedingungen ist.

Das Klimawandelszenario (iv) hat einen weitaus dramatischeren Einfluss auf die Entwicklung des Morteratschgletschers (Abbildung 6). Dieses Szenario führt zu einem starken Rückgang des Gletschers. Ohne Beschneiung wird sich der Gletscher im Jahr 2050 über einen Felsbuckel im Bereich der Bovalhütte zurückziehen. In der Übertiefung wird sich ein Gletschersee bilden, welcher den Gletscherrückgang noch beschleunigt. Das Modell prognostiziert, das sich die Gletscherfront im Jahr 2090 an einer steilen Felsfront befindet und der komplette flache Teil des Gletschers geschmolzen ist. Befindet sich der Gletscher einmal in der Übertiefung, ist der Rückzug praktisch nicht mehr aufzuhalten. Dieser wird durch das Kalben der Gletscherfront noch beschleunigt (welches im Modell nicht berücksichtigt wurde).

Deckt man den Gletscher mit künstlichem Schnee ab, kann die Rate des Gletscherrückzuges halbiert werden. Im Jahr 2070 befindet sich der Gletscher auf dem Felsbuckel und es entsteht kein See. Im Jahr 2090 wird sich der Gletscher in zwei Teile aufspalten, ein oberer Hängegletscher und ein entkoppelter unterer Gletscher, welcher durch den künstlichen Schnee genährt wird.

Es gibt verschiedene Modelle und Szenarien, um den zukünftigen Gletscherrückzug abzuschätzen. Rechnet man mit einem Temperaturanstiegs-Szenario im 21. Jahrhundert von +3 °C, liegt im Jahr 2100 die Gletscherzunge Morteratsch im steilen Gelände und es werden sich im Gletschervorfeld Morteratsch und Pers diverse Seen gebildet haben (Abbildung 5) (Rothenbühler, 2006).

Solche Seen unterhalb von ungestützten Hängegletschern und degradierendem Permafrost bringen ein grosses Risiko von Flutwellen, welche durch Sturzprozesse verursacht werden können. Diese könnten sowohl den Bahnhof Morteratsch wie auch die Infrastruktur weiter unten im Tal beeinträchtigen. Die Modellierungen von (Oerlemans, et al., 2017) haben gezeigt, dass durch die Abdeckung des Gletschers mit künstlichem Schnee die Entstehung eines solchen Sees um Jahrzehnte in die Zukunft verschoben werden kann. Die grösste Unsicherheit bei diesen Modellierungen der Gletscherlänge werden durch die grosse Bandbreite von Klimaszenarien verursacht.

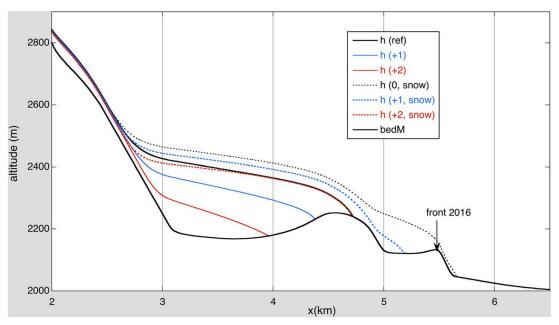


Abbildung 4: Längsprofile des Morteratschgletschers im Jahr 2100 für die verschiedenen Szenarien. Gestrichelte Linien zeigen die Berechnung mit, durchgezogene Linien ohne künstlichen Schnee (Oerlemans, et al., 2017).

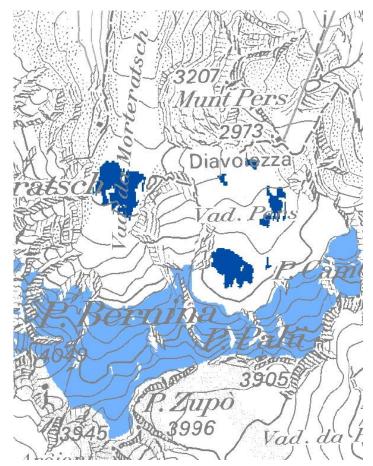


Abbildung 5: Mögliche Seen (dunkelblau) die sich nach dem Abschmelzen des Morteratsch- und Persgletschers bilden werden. Die im Jahr 2100 noch verbleibende Gletscherfläche gemäss der Arbeit von (Rothenbühler, 2006) ist hellblau eingezeichnet.

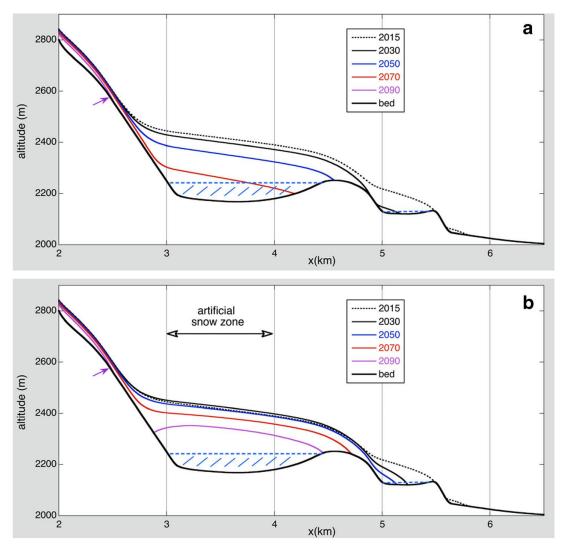


Abbildung 6: Längsprofile des Morteratschgletschers für Szenario (iv) für den Fall mit (a) und ohne künstlichen Schnee (b). Die blauen gestrichelten Linien markieren die Pegel von potenziellen Gletscherseen. Die Gletscherfront von 2090 ist mit einem kleinen Pfeil markiert (Oerlemans, et al., 2017).

## 5.1.3 Topographie (Gletscher)

Der Morteratschgletscher und der Persgletscher liegen in einem Höhenbereich von ca. 2200 m bis 4000 m ü. M. Eine Verbindung zwischen den beiden Gletschern besteht seit dem Jahr 2016 nicht mehr. Abbildung 7 zeigt die hypsometrischen Kurven von Pers- und Morteratschgletscher. Die Verteilung der Fläche des Morteratschgletschers bezogen auf die Höhe ist nahezu linear. Im Gegensatz dazu liegt der grösste Flächenanteil des Persgletschers auf einer Höhe von ca. 3000 m (± 200 m). Diese Unterschiede in der Hypsometrie lassen darauf schliessen, dass die beiden Gletscher wahrscheinlich mit verschiedenen Sensitivitäten auf Klimaänderungen reagieren werden bzw. die Änderungen ihrer Massenbilanzen unterschiedlich ausfallen dürften.

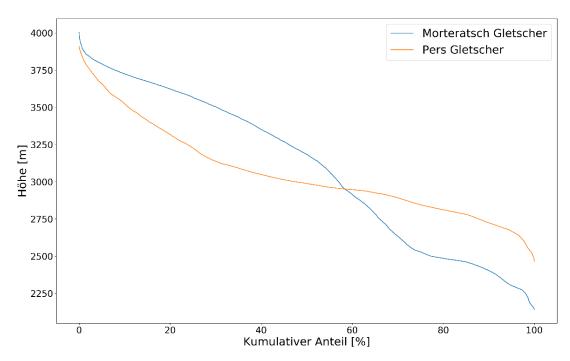


Abbildung 7: Hypsometrie des Pers- und Morteratschtgletschers (Datengrundlage DHM25)

Für die Wasserlogistik des MortAlive Projektes sind Kenntnisse über die Gletscherbett-Topographie des Persgletschers von grosser Bedeutung. Mit diesem Wissen lassen sich Rückschlüsse auf die Fliesswege unter dem Gletscher sowie die Bildung von natürlichen Gletscherseen in einigen Jahren ziehen.

Die Studie von (Grab, et al., 2021) liefert genau diese Daten. In dieser Datensammlung sind Punktdaten zur Eisdicke, welche mit dem Georadar mittels Helikopterflug im gesamten Schweizer Alpenraum gemessen wurden, sowie Rasterdaten der Eisdickenverteilung und der Gletscherbetthöhe enthalten. Aus den Radardaten wurden in Kombination mit glaziologischen Modellierungen mit zwei unabhängigen Algorithmen das Höhenmodell in Rasterform berechnet. Die Eisdickenverteilung bezieht sich auf die Aufnahmejahre des Gletscher-Inventars und des Höhenmodells von swisstopo (swissALTI<sup>3D</sup>) was für den Morteratschgletscher dem Jahr 2015 entspricht (Grab, et al., 2021).

Abbildung 8 zeigt die Gletscherbett-Topographie von Morteratsch- und Persgletscher nach (Grab, et al., 2021). Das rote Kästchen markiert den Ort für einen möglichen Speichersee. Die Gletscherbett-Topographie weist in diesem Bereich eine starke Vertiefung bzw. eine steil nach NO abfallende Rinne auf. Aus eismechanischen Überlegungen erscheint dies unglaubwürdig. Es kann sich dabei aber auch um ein Artefakt der Interpolation handeln, da die landesweite Messkampagne mit dem Helikopter nicht auf eine Detailbeurteilung des Gletscherbettes ausgerichtet war. Die Datenqualität der Radarprofile an dieser Stelle ist schlecht und so konnte das Gletscherbett nicht eindeutig in den Daten erkannt werden. Um diesem Problem nachzugehen und detailliertere Informationen über die Gletscherbett-Topographie im Bereich des zukünftigen Schmelzwassersees zu sammeln, wurden am 4. Februar 2021 mit dem Georadar der Universität Fribourg bodengestützte Messungen durchgeführt.



Abbildung 8: Gletscherbett-Topographie des Morteratsch- und Persgletschers nach (Grab, et al., 2021) Die Höhendifferenz zwischen den Höhenlinien beträgt 200 m. Das rote Kästchen markiert den Bereich für einen möglichen Speichersee.

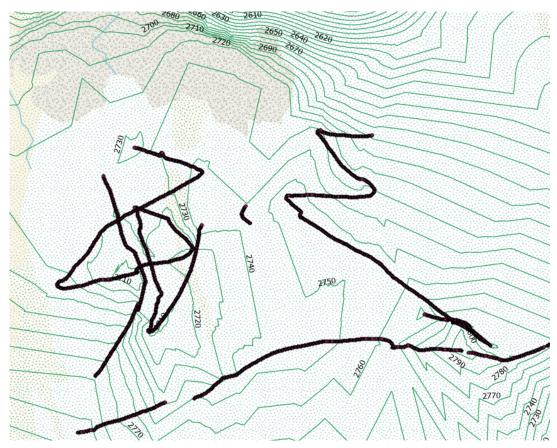


Abbildung 9: Auf der Grundlage der Radarmessungen (schwarze Linien) vom 4. Februar 2021 interpolierte Höhenlinien des Gletscherbettes im Bereich des zukünftigen Schmelzwassersees.

In der Abbildung 9 ist das Höhenkurvenbild, welches auf der Auswertung der Radarmessungen vom 4. Februar 2021 basiert, ersichtlich. Die schwarzen Linienstücke beinhalten die Punkte, an denen die Messungen einigermassen zuverlässig interpretiert werden konnten. Demnach kann im linken Kartenausschnitt mit einer 10 bis 20 m tiefen glazial geprägten Mulde gerechnet werden. Dies würde bedeuten, dass nach dem Gletscherrückzug ein natürlicher Schmelzwassersee entstehen wird. Im zentralen Bereich des Untersuchungsperimeters war eine eindeutige Interpretation der Radarmessungen nicht möglich. Obwohl die Radarmessungen vom 4. Februar 2021 die Vorstellungen über den Verlauf des Gletscherbettes verbessern konnten, muss immer noch mit grösseren Unsicherheiten gerechnet werden. So könnte auch die Mulde im östlichen Bereich des Ausschnittes noch ausgeprägter sein. Der nun vorliegende Verlauf der Bett-Topographie wurde im Kapitel 5.3 für die Dimensionierung des Speichersee verwendet.

#### 5.1.4 Permafrost

Permafrost- und Bodeneiskarte des SLF

Zitat aus: <a href="https://www.slf.ch/de/permafrost/bauen-im-permafrost/permafrost-und-bodeneiskarte.html">https://www.slf.ch/de/permafrost/bauen-im-permafrost/permafrost-und-bodeneiskarte.html</a> :

Die neue Permafrost- und Bodeneiskarte des SLF (PGIM) hilft bei der Evaluierung lokaler und regionaler Permafrost Verbreitung. Dabei wurde erstmals eine Kartierungsmethode gewählt, welche eisreichen Permafrost und eisarmen Permafrost unterscheidet. Eisreicher Permafrost umfasst permanent gefrorenes Lockergestein, dessen Eisgehalt den Porenraum im Boden übersteigt. Das sind beispielsweise Blockgletscher oder eisreiche Schutthalden, welche oftmals Eisschichten von mehreren Metern Mächtigkeit enthalten. Der übrige Permafrost wird in der Karte als eisarm klassifiziert, dies betrifft Permafrost in Felswänden oder in trockenen Lockergesteinen.

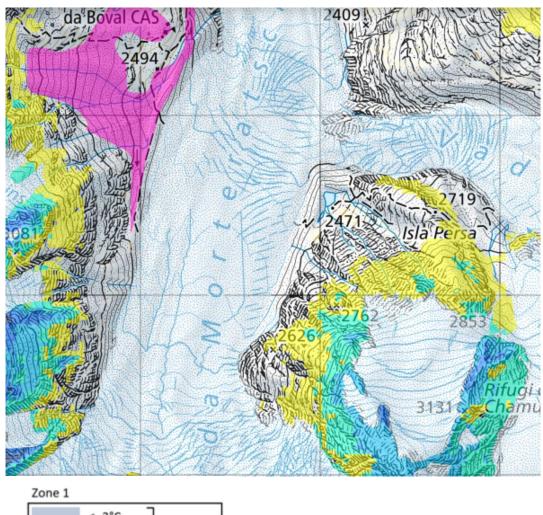
#### Zone 1: eisarmer Permafrost

Die Jahresdurchschnittstemperatur von eisarmem Permafrost ist hauptsächlich durch die Höhenlage und die Exposition vorgegeben. Es ist daher möglich, neben der Verbreitung im Raum auch die Temperatur des eisarmen Permafrostes abzuschätzen. Diese Informationen finden sich in Zone 1 der PGIM, in der negative Bodentemperaturen mit blauen Farben kartiert sind - und eine Übergangszone mit Temperaturen zwischen 0° C und +1° C gelb eingefärbt ist.

#### Zone 2: eisreicher Permafrost

Eisreicher Permafrost entsteht häufig durch Eissedimentation, das heisst zum Beispiel aus Lawinenschnee oder alten Gletscherresten, welche von Fels- und Schuttablagerungen überdeckt werden. Eisreicher Permafrost befindet sich daher vor allem an Orten, an denen solche Prozesse stattfinden können. Dies betrifft vor allem Hangfusslagen. Permafrost mit hohen Eisgehalten braucht viel Energie, um sich zu erwärmen oder um zu schmelzen. Dies liegt an den physikalischen Eigenschaften von Eis, welches eine hohe Wärmekapazität hat. Deshalb kann eisreicher Permafrost in deutlich tieferen und wärmeren Regionen existieren als eisarmer Permafrost. Der Eisgehalt ist also mitentscheidend, ob Permafrost an einem Ort vorkommt oder nicht. Eisreicher Permafrost kann daher bei ganz unterschiedlichen klimatischen Bedingungen existieren.

Die Deformation von eisreichem Boden (z.B. in Blockgletschern) beeinflusst die Verteilung von eisreichem Permafrost zusätzlich. Die Kartierung von eisreichem Permafrost ist deshalb deutlich schwieriger als bei eisarmem Permafrost. Zone 2 der PGIM umfasst daher alle Geländebereiche, in denen eisreicher Permafrost möglich ist (rosarote Flächen). Sie kann aber ebenso Permafrost freie Flächen enthalten. Ausserdem wurde der eisreiche Permafrost nur ausserhalb von Zone 1 kartiert. Das heisst, die Karte zeigt nur den eisreichen Permafrost, welcher sich unterhalb der Zone mit eisarmem Permafrost befindet. In diesen Bereichen liegt die Temperatur des eisreichen Permafrostes meistens nahe bei 0° C. Eisreicher Permafrost kann also auch innerhalb von Zone 1 auftreten, wo er nicht separat ausgeschieden ist.



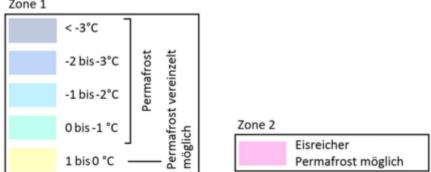


Abbildung 10: Permafrost- und Bodeneiskarte des SLF (PGIM) im Gebiet Bovalhütte – Isla Persa (Quelle: https://www.slf.ch/de/permafrost/bauen-im-permafrost/permafrost-und-bodeneiskarte.html).

Achtung: Bei der Permafrost- und Bodeneiskarte des SLF handelt es sich um eine Hinweiskarte. Für lokale Beurteilungen der Permafrostverteilung müssen zusätzlich detaillierte Abklärungen im Gelände durchgeführt werden.

Gemäss der computerberechneten Permafrostverbreitung (vgl. Abbildung 10) liegen die höher gelegenen Felsflanken orographisch rechts vom Morteratschgletscher mehrheitlich im Permafrostgebiet. Insbesondere die Nordflanken sind eindeutig von Permafrost betroffen. Die linke Seitenmoräne könnte eisarmen Permafrost enthalten, während die darüber sich be-

findenden Felsgebiete sich im Übergangsbereich befinden. Die orographisch rechte Seitenmoräne befindet sich klar unterhalb der Permafrostuntergrenze. Demnach ist nicht mit flächendeckendem Permafrost zu rechnen, doch einzelne Permafrostkörper auch mit eishaltigen Eislinsen können trotzdem nicht ausgeschlossen werden.

### BTS- Messungen

Temperaturschwankungen in der Schneedecke werden mit zunehmender Tiefe gedämpft und durch die Wärmeleitfähigkeit der Schneedecke bestimmt. Ab einer hochwinterlichen Schneehöhe von ungefähr 0.8 m sind tägliche Temperaturschwankungen und mehrere Tage andauernde Kälteeinbrüche an der Basis der Schneedecke so stark abgeschwächt, dass die Basis Temperatur der Schneedecke (BTS) nur noch wenige Zehntelgrade schwankt. In solchen Situationen wird die BTS in erster Linie durch die Untergrundtemperaturen bestimmt und kann deshalb als zuverlässiger Indikator für die Existenz von oberflächennahem Permafrost verwendet werden (Haeberli, 1973).

Aufgrund der vorliegenden Hinweise wurde die Permafrostsituation genauer abgeklärt. Am 18. März 2021 konnten hierzu insgesamt 73 BTS-Messungen durchgeführt und anschliessend interpretiert und kartographisch dargestellt werden. Von besonderem Interesse sind die Messungen auf den Seitenmoränen, da diese allenfalls für den Bau der Schneiseile von Bedeutung sind.

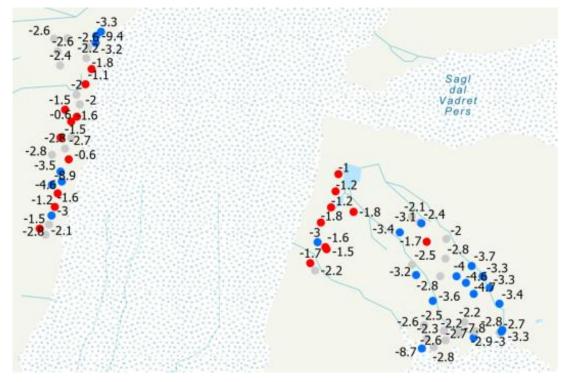


Abbildung 11: BTS-Kartierung (Temperatur in °C) vom 19. März 2021 (Legende: rot: kein Permafrost, grau: Unsicherheitsbereich, blau: Permafrost wahrscheinlich)

Die Resultate der BTS-Messungen stimmen mit den Aussagen der Computerberechnungen grösstenteils überein. Die Messstandorte im höher gele-

genen Teil des Untersuchungsgebietes (blau eingefärbt, Abbildung 11) haben Werte unter -3 °C und müssen als Permafroststandorte interpretiert werden. Der Temperaturwert der grau dargestellten Messpunkte liegt im Unsicherheitsbereich, welcher sich zwischen -2 und -3 °C befindet. Die übrigen rot eingefärbten Messungen insbesondere im Gebiet der geplanten Bauarbeiten auf den Seitenmoränen zeigen nur vereinzelt Permafrost an. Demanch kann nicht ausgeschlossen werden, dass an vereinzelten Stellen kleinere Permafrostkörper vorkommen, da sich das ganze Gebiet im Bereich der Permafrostgrenze befindet und die BTS-Messungen nur Einzelsondierungen darstellen, welche keine Auskunft über den Eisgehalt im Boden enthalten. Für die Stabilität der Bauwerke ist jedoch der Eisgehalt entscheidend. Solange keine grösseren Eislinsen aus reinem Eis vorliegen, dürften bei den geplanten Bauwerken kaum Probleme entstehen. Für detaillierte Baugrundabklärungen sind deshalb differenziertere Untersuchungen wie z.B. geoelektrische Sondierungen, die Aussagen über den Eisgehalt zulassen, notwendig.

### 5.1.5 Geologie

Den Erläuterungen zum Geologischen Atlas der Schweiz, Kartenblatt 1277 Bernina kann Folgendes entnommen werden (Spillmann, et al., 2007):

«Tektonisch gesehen liegt das Bernina-Gebirge im südlichsten Abschnitt der Penninikum/Ostalpin-Grenze der östlichen Zentralalpen (Rhätische Alpen). Der Deckenstapel des Bernina-Gebirges umfasst oberpenninische und unterostalpine Einheiten. Entsprechend dem allgemeinen Einfallen der tektonischen Elemente nach NE sind die tektonisch tiefsten Einheiten im Westen und Süden des Kartenblattes aufgeschlossen. Im Bereich der Aufschlüsse der tiefsten unterostalpinen Decke, der Margna-Decke, sind zwischen Monte dell'Oro und Piz Tremoggia Gipfel zwischen 3000 und 3400 m anzutreffen. Die nächsthöhere tektonische Einheit, die Sella-Teildecke, baut die Gipfelreihe der Sella-Gruppe mit Höhen um 3500 m auf. Die Corvatsch-Teildecke, die im Rosegtal (Val Roseg) auf die Sella-Teildecke sowie im Norden auf die Platta-Decke überschoben ist, ist am N-S orientierten Grat zwischen Val Fex und Val Roseg aufgeschlossen. Das Kerngebiet des Bernina-Massivs wird von Gesteinen der Bernina-Decke s. str. aufgebaut. Der Hauptkamm zwischen Piz Roseg und Piz Palü umfasst sieben über 3900 m hohe Gipfel. Der sich vom Piz Bernina über den Piz Morteratsch nach Norden erstreckende Grat gliedert das Bernina-Gebirge in die Täler Morteratsch und Roseg. Die hauptsächlich aus wenig deformierten, spät und postvariskischen Intrusivgesteinen aufgebaute Bernina-Decke s. str. wird durch diese Täler weiträumig gegliedert und tief eingeschnitten.

...

Gegen Süden fällt der Hauptkamm des Bernina-Massivs steil in die Valmalenco ab. Unterbrochen wird dieser Steilabfall durch ausgedehnte Gletscherflächen, die zum Teil den Deckenstapel morphologisch nachzeichnen. So liegt z.B. die Vedretta di Scerscen inferiore im Niveau der Tremoggia-Mulde, welche als Deckentrenner zwischen Margna-Decke und Bernina-Decke s. I. fungiert und die Vedretta di Scerscen superiore folgt der Fortsetzung der mylonitischen Sedimentzonen der tieferen Bernina-Decke s. I., welche die Sella- und die Corvatsch-Teildecke abgrenzen.»

Die Val Morteratsch zählt also geologisch zu den ostalpinen Decken. Diese sind aus dem Grundgebirge des afrikanischen Kontinents sowie Sedimenten der adriatischen Platte aufgebaut, wobei die Sedimente in der Val Morteratsch fehlen. Da es sich um die höchste Deckeneinheit der Alpen handelt, sind die Steine kaum oder nur schwach metamorph.

Die ostalpinen Decken werden weiter unterteilt in die ober- und unterostalpinen Einheiten. Die sogenannte Berninadecke gehört zum Unterostalpin und setzt sich im Bereich der Val Morteratsch ausschliesslich aus kristallinen Gesteinen zusammen. Sie beinhaltet Granodiorite, Diorite, Granite, Gneise und Schiefer.

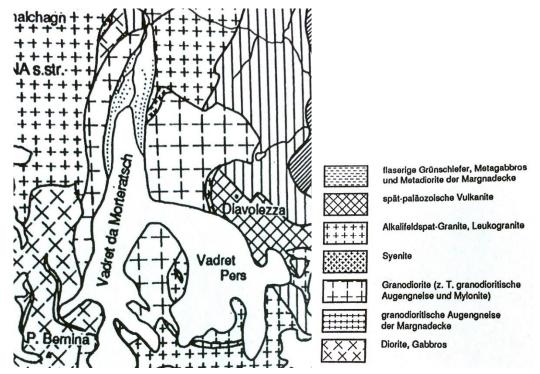


Abbildung 12: Geologische Karte des Berninamassivs, Ausschnitt der Val Morteratsch (Spillmann, 1993).

Wie Abbildung 12 zeigt, wird der Talschluss vom Piz Palü über die Bellavista und Crast' Agüzza bis zum Piz Bernina geprägt von Gabbros und Dioriten, dies sind dunkelgrüne bis braun-schwarze, magmatische Gesteine.

Auf der orographisch rechten Talflanke finden sich Alkaligranit (rot-weisse Granite), Granodiorite (blaue Berninagranite, 334 Mio. Jahre alt) sowie im Bereich der Diavolezza Rhyolite (288 Mio. Jahre alt). Auf der orographisch linken Talflanke kommen Gabbrodiorite, Diorite (dunkelgrün bis braunschwarz, magmatisch), Granodiorite (weiss bis grünlich) sowie Alkaligranite (rot-weisse Granite) vor (Bearth, et al., 1987), (Labhart, 1995), (Spillmann, 1993).

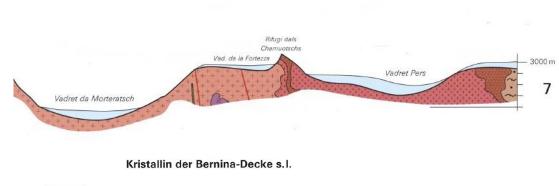




Abbildung 13: Geologisches Profil Persgletscher-Gemsfreiheit-Fortezza Gletscher – Morteratschgletscher (Spillmann, et al., 2007))

In der Abbildung 13 ist das geologische Profil zwischen dem Gebiet des Speichersee (Persgletscher) und der zu beschneienden Fläche des Morteratschgletschers ersichtlich. So befindet sich der Persgletscher im Bereich von granitischen Gesteinen, während der Untergrund des Fortezza- und Morteratschgletschers durch Granodiorit geprägt ist. Das Gestein der Gemsfreiheit (Rifugi dals Chamuotschs) besteht aus Gang- Vulkanitgesteinen (Metarhyolithe). Die Charakterisierung der im obigen Profil vorkommenden geologischen Schichten wurde direkt aus den Erläuterungen zum geologischen Kartenblatt Bernina entnommen:

#### Granodiorit

Die Hornblende-Biotitgranodiorite der Bernina-Decke s. str. wurden auch als «blaue Bernina-Granite» bezeichnet (STAUB 1946). Tatsächlich zeigen die grobkörnigen, massigen Gesteine eine typisch weissblaue bis stahlblau-graue Farbe. Makroskopisch auffällig sind im Weiteren Biotitplättchen und bis 5mm lange Hornblendestängel sowie mehr oder weniger zahlreiche, meist gerundete Dioriteinschlüsse. In den bis 5 mm grossen Quarzkristallen konzentrieren sich die Flüssigkeitseinschlüsse entlang von geradlinigen Bahnen. Die Körner sind stark undulös auslöschend. Randlich ist die Bildung von Subkörnern zu beobachten. Die Alkalifeldspäte sind perthitisch entmischt, z.T. ist eine Mikroklingitterung zu erkennen. Die Körner sind häufig zerbrochen, aber nur leicht serizitisiert. Die Plagioklase hingegen zeigen eine starke saussuritische Zersetzung und albitische Anwachsränder.

#### Granit, Aplit

STAUB (1946) bezeichnete diese Gesteine als «rote und weisse Alkaligranite » oder allgemeiner als «bunte Bernina-Granite». Es handelt sich um sehr helle, fein- bis mittelkörnige Aplitgranite sowie um stark rot oder grün verfärbte, grobkörnige Granite, die praktisch frei von mafischen Mineralien sind.

. . .

Mafische Mineralien sind nur sehr untergeordnet vertreten. Mikroskopisch fällt ein alpin wenig überprägtes, eutektisches Gefüge auf. Quarz ist undulös auslöschend und bildet randlich Subkörner. Bei den Kalifeldspäten handelt es sich meistens um xenomorphe, selten verzwillingte Perthite. Plagioklas bildet xenomorphe, polysynthetisch verzwillingte Leisten. Die sauren Plagioklase (Albit-Oligoklas) zeigen keine saussuritische Zersetzung, sondern lediglich eine leichte Bestäubung. Quarz, Kalifeldspat und Plagioklas sind eutektisch eng verwachsen.

#### Metarhyolith

Massige Metarhyolithe des Piz-Trovat-Typs sind beim Diavolezza-Berghotel und am Piz Trovat aufgeschlossen (RAGETH 1982, 1984). In unmittelbarer Umgebung der Diavolezza sind grosse Altkristallineinschlüsse zu beobachten. Der Kontakt zum Granit südlich des Munt Pers ist durch Sprödbrüche gestört. Daneben existieren kleinere Metarhyolithkörper, so z.B. im Altkristallin nördlich des Lej da Diavolezza, im Granodiorit nordöstlich des Munt Pers, im Granit der Rifugi dals Chamuotschs («Gemsfreiheit») oder als isoliertes Vorkommen südlich des Piz Tschierva. Am Piz Mandra ist der südlichste Abschnitt eines ca. 3 m mächtigen Rhyolithganges, der sich in nördlicher Richtung ca. 2 km in das Gebiet des Piz Chalchagn verfolgen lässt, aufgeschlossen (BÜCHI 1987). Weitere rhyolithische Gänge wurden am SW-Grat des Sasso Rosso beobachtet. Bei diesen handelt es sich um westliche Ausläufer der mächtigen, alpin deformierten Rhyolithgänge des Piz Varuna (SPILLMANN 1993; siehe tekt. Übersichtskärtchen).

Die vorliegende geologische Beschreibung des Projektperimeters bietet eine gute Grundlage für weitere Differenzierungen. So fehlen z.B. noch die geotechnischen Beurteilungen, die bei einem Vorprojekt erhoben werden müssen, sobald die genauen Standorte der zu errichtenden Bauwerke bekannt sind.

### 5.1.6 Naturgefahren

#### Lawinen

Damit eine Lawine anreissen kann, ist eine Hangneigung von mindestens 30 Grad erforderlich. Statistisch gesehen lösen sich die meisten Lawinen ab einer Hangneigung von 35 Grad. In Schattenlagen ist infolge der kälteren Temperaturen der Schneedeckenaufbau ungünstiger, sodass sich hier während dem Hochwinter eher Lawinen lösen können als an sonnigen Stellen. Dafür sind Südexpositionen gefährdeter für Nassschneelawinen im Frühling. In felsdurchsetztem Gelände ist die Lawinenbildung günstiger, da der Schneedeckenaufbau durch die geringere Schneehöhe ungünstig ist und im Frühling Schmelzwasser aus den Felsflächen in die Schneedecke eindringen kann. In den steilen Felswänden bilden sich kaum Lawinen, da

der Schnee fortlaufend abrutscht und es gar nie genug Schnee hat, damit sich eine Lawine bilden kann (Harvey, et al., 2013).

Die Abbildung 14 zeigt die Flächen mit einer Hangneigung von 30 Grad oder mehr sowie die wahrscheinlichsten Lawinenanrisszonen (rote Linien) mit den möglichen Sturzbahnen (rote Pfeile).

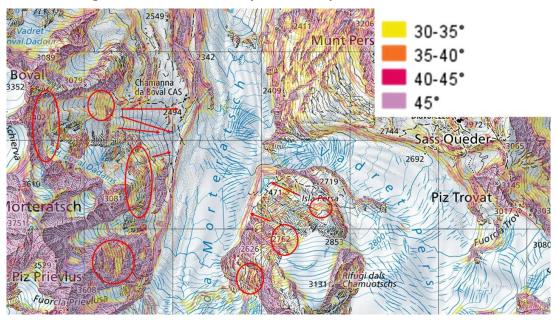


Abbildung 14: Flächen mit einer Hangneigung von 30° oder mehr (swisstopo). Rot eingekreist sind mögliche Lawinenanrisszonen, die roten Pfeile zeigen die Lawinenzugbahnen aufgrund des Geländes (Rinnen).

Vor allem im Bereich unterhalb des Vadret Boval Dadains bis zur Bovalhütte wirkt die Ufermoräne wie ein Auffangdamm, der verhindert, dass Lawinen die Gletscheroberfläche erreichen.

Insbesondere die lange Schutthalde «Gianda Boval» (Abbildung 15) ist häufig von Lawinen betroffen, da sie bis hinauf zum Felsgrat ein grosses Einzugsgebiet hat.



Abbildung 15: Diverse Nassschneelawinen auf der orographisch linken Seite, blau umkreist ist das Gebiet «Gianda Boval» (Foto: 1.6.2019).

Unterhalb des Piz Prievlus dominieren steile Felsgebiete. Hier bilden sich keine grossen Lawinen, da an diesen Stellen nie viel Schnee liegenbleibt.

Die orographisch rechte Seite ist weniger von Lawinen betroffen, da die Höhenunterschiede kleiner sind und viel weniger Fläche im Bereich einer Hangneigung von über 30° ist.

#### Eislawinen

Wenn Eis von einem steilen Gletscher abbricht, spricht man von einer Eislawine. Hängegletscher produzieren immer wieder Eislawinen; für sie ist es die normale Form der Ablation. Aber auch Gletscher, deren Zungen auf einer markanten Geländekante oder einer steilen Rampe liegen, produzieren Eislawinen, die sich zu jeder Jahreszeit ereignen können (Alean, 1984).

Auf der orographisch linken Seite im Gebiet unterhalb des Piz Prievlus und Piz Morteratsch gibt es mehrere potentielle Anrissgebiete für Eislawinen, diese sind in Abbildung 16 mit roten Rechtecken markiert, während die roten Ovale die möglichen Ablagerungsbereiche kennzeichnen.

Unterhalb des Piz Prievlus sind, insbesondere in den Sommermonaten, häufig kleinere Eisabbrüche zu beobachten. Sie können die Gletscheroberfläche erreichen. Die Eislawinen, die aus den beiden Anrissgebieten unterhalb des Piz Morteratsch starten können, treffen am Ende ihrer Auslaufbahn auf die Ufermoräne, welche wie ein Auffangdamm wirkt.

Auf der orographisch rechten Seite des Morteratschgletschers besteht keine Gefahr durch Eislawinen.

Auf dem Persgletscher im Bereich des zur Diskussion stehenden Schmelzwassersees besteht keine Gefährdung durch Eislawinen. Zwar ereignen sich am Piz Palü häufige Abbrüche aus den Hängegletschern, die jedoch nicht über den sehr flachen Bereich auf dem Persgletscher hinauskommen.

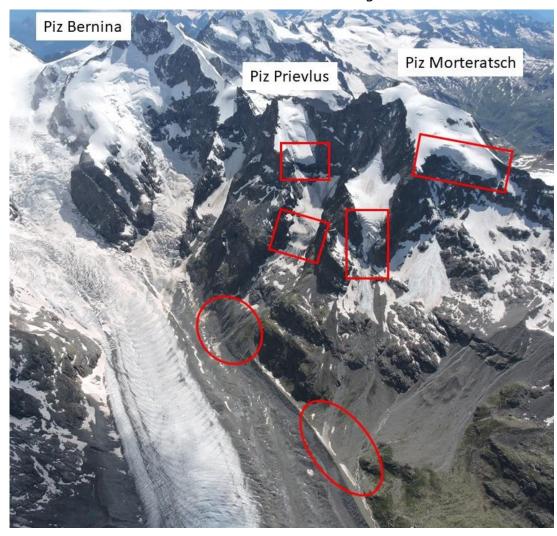


Abbildung 16: Potentielle Anrissgebiete von Eislawinen (rote Rechtecke) sowie die möglichen Ablagerungsgebiete (rote Kreise; Foto: 23.6.2018).

#### Murgänge

Ein Murgang ist ein schnellfliessendes Gemisch aus unterschiedlichen Anteilen an Lockermaterial und Wasser. Er kann viel Material und grosse Blöcke transportieren und hat ein grosses lokales Erosionspotential (Zimmermann, 1990).

Die meisten Murgang-Anrisse im Oberengadin befinden sich in Hangneigungen zwischen 30 und 45° im Lockermaterial und innerhalb der geschätzten Permafrostverbreitung. Unkonsolidierter Schutt, wie er in glazialen oder periglazialen Gebieten vorkommt, ist murganganfälliger als verfestigtes oder mit Vegetation bewachsenes Lockermaterial (Hürlimann, 1994) (Patterson, 2003). Neben vegetationsfreien Schutthalden, Moränenbastionen, Gletschervorfeldern oder Blockgletscherstirnen sind auch

die Kontaktbereiche zwischen Felswand und Schutthalden sowie mit Schutt aufgefüllte Couloirs oder Gerinneabschnitte typische Murgang-Anrisszonen (Zimmermann, et al., 1997). Ausgelöst wird ein Murgang durch ein Ereignis wie ein Starkniederschlag, eine langandauernde Regenperiode, intensive Schneeschmelze, einer Kombination dieser Faktoren oder durch den Ausbruch von Wassertaschen oder Gletscherseen (Evans, et al., 1994) (Zimmermann, et al., 1997).

Insbesondere Schutthalden im Bereich, wo Permafrostdegradation statt-findet, sind besonders prädestiniert für Murganganrisse, denn auftauender Permafrost hat einen negativen Einfluss auf die Stabilität einer Schutthalde. So verändert der Eisverlust die geotechnischen Eigenschaften, da das Eis die Steine nicht mehr zusammenhält und Wasser eindringen kann. Bei eisübersättigten Schuttkörpern führt dies sogar zu Setzungsbewegungen (Zimmermann, et al., 1992) (Zimmermann, et al., 1997). Diese Bereiche sind in Abbildung 10 ersichtlich und kommen auf beiden Talseiten des Gletschers verbreitet vor, wobei in dieser Abbildung auf Felsgebiete miteingeschlossen sind. Aber auch der Permafrostkörper selber kann murgangfördernd sein, indem er als Wasserstauer wirkt und so eine verstärkte Murgangaktivität in der Auftauschicht erzeugen kann (Zimmermann, 1990) (Zimmermann, et al., 1992).

Auf beiden Seiten des Morteratschgletschers ist Lockermaterial in Form der steilen Ufermoränen vorhanden. Jedoch sind aus der Moräne nur kleinere Ereignisse zu erwarten, da der Höhenunterschied sehr gering ist. Am mächtigsten ist die Moräne im Bereich des Lej da l'Isla mit rund 50 m.

Auf der linken Talseite befinden sich im Bereich «Gianda Boval» jedoch grosse Lockermaterialflächen, die sich bis auf eine Höhe von 3200 m ü. M. unterhalb der Felswand erstrecken und ein potentielles Anrissgebiet für Murgänge bilden. Im oberen Teil befindet sich eine Moränenbastion, welche ein Lappen des Vadret Boval Dadains aufgeschüttet hat (Abbildung 17). Ein Blick auf die Permafrostverbreitung (Abbildung 10) zeigt, dass hier auch mit Permafrost als Wasserstauer und mit den Folgen von degradierendem Permafrost gerechnet werden muss. Wie die geomorphologische Karte zeigt, sind aus der Moränenbastion auch schon Murgänge gestartet (Abbildung 17). Auch wurden Murgänge unterhalb des Vadret Boval Dadains sowie unterhalb des Vadret Prievlus kartiert. Insbesondere Murgänge, die unterhalb des Vadret Prievlus starten, können die Gletscheroberfläche erreichen, die Murgänge unterhalb des Vadret Boval Dadains sowie im Bereich «Gianda Boval» werden von der Ufermoräne aufgehalten.

Im Bereich der «Gianda Boval» überschneiden sich die von Murgängen und Lawinen potentiell betroffenen Flächen. Wie schon bei den Lawinen beschrieben, wirkt auch bei den Murgängen in diesem Bereich die Ufermoräne als Auffangdamm. Unterhalb des Vadret Prievlus jedoch reicht die Schutthalde und somit die potentielle Murgangbahn bis auf die Gletscheroberfläche.

Auf der orographisch rechten Seite sind die Lockermaterialflächen viel kleiner und beschränken sich auf tieferliegende Höhenbereiche, insbesondere auf die Ufermoräne. Somit muss hier nur mit relativ kleinen Ereignissen gerechnet werden, die jedoch die Gletscheroberfläche erreichen.

### Steinschlag, Felssturz, Bergsturz

Aufgrund der Permafrostsituation und der instabilen Schichtungen der Moränen muss der ganze Projektperimeter als Fläche mit erhöhtem Steinschlag sowie grösserer Felssturzgefährdung bezeichnet werden.

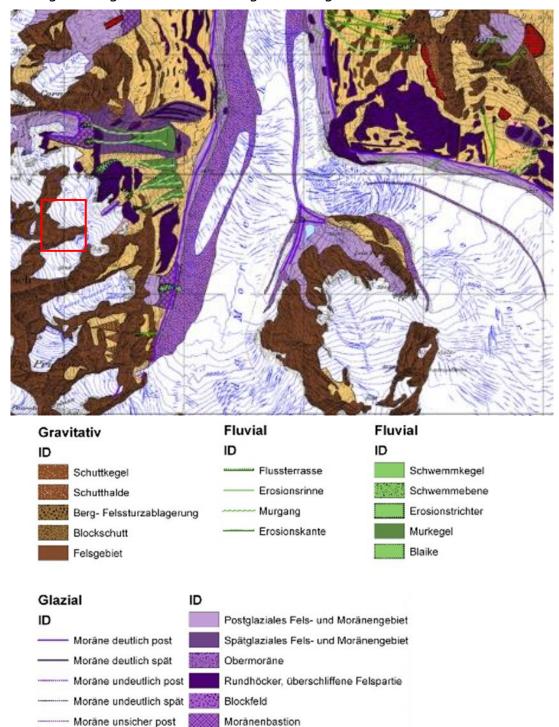


Abbildung 17: Ausschnitt aus der geomorphologischen Karte. Das rote Rechteck markiert die Moränenbastion, welche bereits zwei Murgang-Anrisse aufweist (Koch, 2003).

Firnfeld

Gletscher

Morane unsicher spät

-- Flutes

## 5.1.7 Abflussmessungen

Um die Menge des Schmelzwassers abzuschätzen und diese mit den Modellierungen zu vergleichen konnten am 15. und 21. August 2020 sowie am 2. September 2020 Abflussmessungen am Persgletscher durchgeführt werden. Mit der Salzverdünnungs-Methode wurde die Menge des abfliessenden Schmelzwassers an der Stelle des geplanten Speichersees bestimmt. Die ersten Messungen (15.8.2020) dienten zur Bestimmung der Eingabemenge des Salzes sowie der Standorte für die Injektion der Salzlösung als auch Positionierung der Leitfähigkeitssonden (Abbildung 18).



Abbildung 18: Lage der Punkte für die Eingabe der Salzlösung sowie der Messpunkte (Orthophoto: (swisstopo, 2021))

In der Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Abflussmessungen. Es ist der Mittelwert des Abflusses vom 21.8.2021 und 2.9.2021 aufgeführt. Im Anhang B.1 sind alle Messwerte sowie Informationen zur Methodik der Abflussmessungen angegeben. Der 21. August 2020 war ein sonniger Tag, weshalb die gemessenen Abflüsse deutlich höher sind als am 2. September 2020 mit leichtem Schneefall. Bei den Messungen am 21. August konnte visuell eine deutliche Zunahme des Abflusses für die zweite Messung um 12:36 Uhr beobachtet werden. Dieser spiegelt sich aber nicht in den Daten der Abflussmessungen wider, da der Unsicherheitsbereich bei Abflussmessungen mit der Salzverdünnungsmethode in hochalpiner Umgebung sehr hoch ist. In der Masterarbeit von (Hubacher, 2007), welcher 25 Messungen an einem vergletscherten Einzugsgebiet in Schweden durchführte, wurde ein Unsicherheitsbereich für direkt aufeinanderfolgende Messungen von ca. 10 % festgestellt. Bei den beiden Messungen am Persgletscher, welche unter ähnlichen Bedingungen durchgeführt wurden, überschneiden sich somit die Unsicherheitsbereiche der beiden Messungen.

Tabelle 1: Ergebnisse der Abflussmessungen vom 21.8.2020 und 02.09.2020 mit Werten die an den jeweiligen Sonden gemessen wurden.

| Nr. | Datum & Zeit   | Messpunkt | Mittelwert Abfluss [I/s] |  |
|-----|----------------|-----------|--------------------------|--|
| 6   | 21.08.20 11:20 | 1         | 834                      |  |
| 7   | 21.08.20 12:36 | 1         | 768                      |  |
| 8   | 02.09.20 13:15 | 2         | 512                      |  |

Aus den am Persgletscher gemessen Abflüssen kann eine grobe Abschätzung des Einzugsgebietes vorgenommen werden. Abbildung 19 und Tabelle 2 zeigen die Abflüsse pro Quadratkilometer für die Einzugsgebiete Rosegbach und Massa. Die Daten von Massa wurden hinzugezogen, da dieses Einzugsgebiet eine deutliche höhere Vergletscherung (56 %) als die des Rosegbaches (21.7 %) aufweist. Die mittlere monatliche Abflussspende in den einzelnen Jahren kann im Massa-Gebiet im Sommer bis zu 300 l/s\*km² betragen. Wird dieser Wert auf die Abflussmessungen am Persgletscher bezogen (mit einem Abfluss von ca. 800 l/s im Sommer), wäre das Einzugsgebiet ca. 2.66 km² gross.

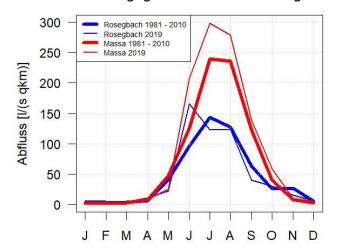


Abbildung 19: Abflussspenden für den Rosegbach und die Massa (Daten: BAFU).

In Abbildung 20 wurden zwei mögliche Einzugsgebiete anhand der Oberflächentopographie des Persgletschers definiert. Die rote Linie zeigt ein kleines Einzugsgebiet mit einer Grösse von ca. 1.6 km². Auch ein grösseres Einzugsgebiet wäre plausibel (rote Linie plus die gestrichelte blaue Linie). Dieses hat eine Grösse von ca. 2.6 km². Diese Berechnung gibt aber nur einen groben Einblick, denn einerseits hängt die Lage und Grösse des Einzugsgebietes stark von der Gletschertopographie ab. Andererseits ist die Vergletscherung in diesem Bereich des Persgletschers höher als 56 %, weshalb sich die Abflussspende des Massa-Einzugsgebietes nicht eins zu eins übertragen lässt.

Tabelle 2: Kenndaten für die Stationen am Rosegbach und Massa (Daten: BAFU).

|                                   | Rosegbach            | Massa   |
|-----------------------------------|----------------------|---------|
| Stationshöhe                      | 1766 m               | 1446 m  |
| Grösse des Einzugsgebietes        | 66,5 km <sup>2</sup> | 196 km² |
| Mittlere Höhe des Einzugsgebietes | 2704 m               | 2937 m  |
| Vergletscherung                   | 21,7 %               | 56,5 %  |

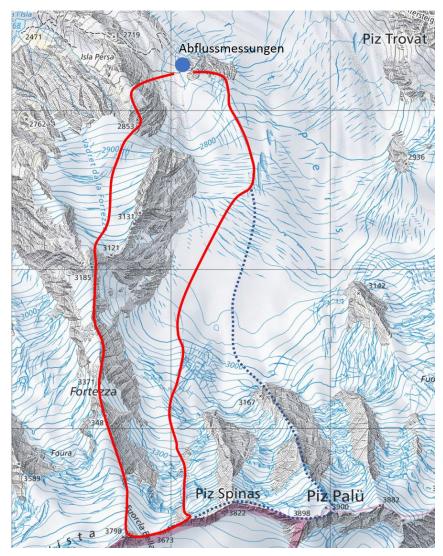


Abbildung 20: Mögliche Einzugsgebiete der Abflussmessungen am Persgletscher (blauer Punkt). Einzugsgebiet 1 wird durch die rote Linie markiert. Einzugsgebiet 2 beinhaltet die Fläche von Einzugsgebiet 1 (rote Linie) und der blauen gestrichelten Linie.

# 5.1.8 Verfügbarkeit von Beschneiungswasser

Für die Beschneiung ist es ein primäres Ziel, das Wasser ohne zusätzliche Energie und mit genügendem Druck zur Beschneiungsanlage zu bringen. Es konnte mit Hilfe einer Modellierung (Anhang C.1 und C.2) gezeigt werden, dass aus dem Teileinzugsgebiet 1 des Persgletschers (Abbildung 20) jährlich ca. 1.6 bis 2.2 Mio. m³ Schmelzwasser aus der eisbedeckten Fläche anfallen. Zusätzlich fallen in diesem Einzugsgebiet noch Niederschläge aus der unvereisten Fläche an, die in der Modellierung nicht berücksichtigt wurden. Wenn dieses Wasser rund 200 m oberhalb der Schneiseile gefasst wird, kann es für eine Beschneiung des Morteratschgletschers ohne zusätzliche elektrische Energie genutzt werden. Dazu bietet sich eine topographische Mulde ca. 1.2 km oberhalb des heutigen Gletschertors im Südosten des Persgletschers an (siehe Kapitel 5.1.3 und Abbildung 21).



Abbildung 21: Möglicher Standort eines Speichers beim Gletschertor Pers Südwest.

Die Speisung des Speichers erfolgt einerseits durch das natürlich anfallende Schmelz- und Regenwasser des Persgletschers von rund 1.6 bis 2.2 Mio. m³ und anderseits durch den Niederschlag (Regen und Schnee) für den nicht eisbedeckten Teil im Einzugsgebiet (Abbildung 20), der gemäss der Modellierung ca. 1.1 Mio. m³/Jahr beträgt (Anhang C.2). Die heute noch vorhandene Eismasse in diesem relevanten Einzugsgebiet beträgt ca. 36 Mio. m³. Es sollte daher auch unter der Bedingung, dass das Wasser der Eisschmelze in Zukunft abnimmt, genügend Wasser zur ausreichenden Beschneiung des Morterartschgletschers über eine längere Zeitperiode (mind. 30 Jahre) vorhanden sein.

Weitere Optionen zur Sicherstellung des Beschneiungswasser sind (i) die Nutzung des Niederschlags- und Schmelzwassers vom Persgletscher ausserhalb des Teileinzugebietes 1; (ii) die Nutzung des Schmelzwassers vom Morteratschgletscher oder (iii) eine Zuleitung von Fliessgewässern oder (künstlichen/natürlichen) Seen. Dazu kommen theoretisch der Lago Bianco (2230 m ü. M.), der Lej da Vadret (2160 m ü. M.) oder die Ova da Bernina bei Bernina Suot (2040 m ü. M.) in Frage. Solche Zuleitungen über ein Stollensystem wären aber im Detail zu klären, da dieses Wasser aus tieferen topographischen Lagen stammt und somit gepumpt werden müsste.

Interessant scheint auch die Möglichkeit, allenfalls überschüssig anfallendes Schmelzwasser im Lago Bianco zwischenzuspeichern. Damit könnte der Speicher am Persgletscher klein gehalten werden. Eine möglichst effiziente Nutzung wäre mit einem Pumpspeicherkraftwerk zwischen dem Speicher Pers und dem Lago Bianco denkbar. Dies würde zudem die Wirtschaftlichkeit der Anlage zusätzlich verbessern.

Neben der Wassermenge spielt auch die Qualität des Wassers für eine effiziente Beschneiung eine wesentliche Rolle:

- Wassertemperatur: Die Abflussmessungen (siehe Kapitel 5.1.7) haben gezeigt, dass das Schmelzwasser Temperaturen zwischen 0.3-0.5 °C aufweist. Mit einer Zwischenspeicherung im Speicher Pers oder Lago Bianco können etwas höhere Werte erwartet werden.
- Schwebstoffe: Diese können die Schneidüsen verstopfen. Basierend auf den aktuell vorgesehenen Schneidüsen sind Partikel grösser als ca. 0.15 mm auszuscheiden. Es ist somit eine Entsandung/Filterung des Schmelzwassers notwendig. Ein Entsander nach der Fassung des Schmelzwassers kann Partikel bis 0.2 mm ausscheiden. Eine zusätzliche Filterung bis zu Partikelgrössen von 0.15 mm soll zudem vor den Schneileitungen erfolgen.

#### 5.1.9 Klimaszenarien CH2018

Neben den in der ersten MortAlive Studie verwendeten Klimaszenarien (Kapitel 5.1.2) mit unterschiedlichem Anstieg der Gleichgewichtslinie des Gletschers stehen heute auch die sogenannten CH2018 Szenarien des Nationalen Zentrums für Klima Services zur Verfügung (CH2018, 2018). Bei diesen Szenarien wurden mit insgesamt 21 verschiedenen Computermodellen, die an Europäischen Forschungsinstitutionen betrieben werden, eine Regionalisierung der globalen Klimasimulationen vorgenommen. Die Analyse mehrerer Simulationen erlaubt eine Abschätzung der Unsicherheiten, die mit den Klimaszenarien verbunden sind.

Bei der Gestaltung des am 10.10.2020 eröffneten VR-Glacier Experience Centers wurden die CH2018 Szenarien miteinbezogen. Unter der Leitung von Prof. M. Hoelzle (Uni Fribourg) prognostizierten Dr. M. Huss, Dr. A. Linsbauer und E. Matea das zukünftige Verhalten des Morteratschgletschers mit und ohne Beschneiung und visualisierten die Ergebnisse zusammen mit der Zürcher Hochschule der Künste (Prof. N. Heeb) sehr eindrücklich auf verschiedene Art und Weise. Damit erhält jeder Besucher die Möglichkeit, sich der Chancen und insbesondere auch der Grenzen von MortAlive bewusst zu werden. So wird der Bau der hier geplanten Beschneiungsanlage das Verschwinden des Morteratschgletschers in einer noch nicht genau vorhersagbaren Zeitspanne nach 2050 ohne markanten Projekterweiterung nicht verhindern können. Angesichts der nach wie vor bestehenden Unsicherheiten insbesondere von lokalen Klimaprognosen darf festgehalten werden, dass die auf den CH2018 basierenden Berechnungen mit denjenigen der ersten wissenschaftlichen MortAlive Studie ziemlich gut übereinstimmen. Klimaveränderungen können sich also stark auf den Nutzen einer Gletscherschutzanlage (Sicherung Wasserversorgung/Bewässerung) auswirken und müssen bei der Planung berücksichtigt werden. Das in dieser Vorstudie untersuchte Projekt leistet aus heutiger Sicht für das Oberengadin keinen Beitrag weder zur Sicherung der Wasserversorgung noch zur Bewässerung.

## 5.2 Vorbemessung Beschneiung

Erste Abklärungen mit einem Fliessmodell (Oerlemans, et al., 2017) zeigten, dass eine vollständige mit Schnee bedeckte Gletscheroberfläche von ca. 0.8 km² in der Ablationszone des Morteratschgletschers notwendig ist, um die Abnahme der Gletscherlänge zu stoppen.

Als Vorgabe für die vorliegende Studie wurde eine zu beschneiende Fläche von ca. 0.8 km² festgelegt. In einer Studienarbeit wurden mit einem hypsometrisches Energiebilanzmodell verschiedene Szenarien mit künstlicher Beschneiung auf dem Morteratschgletscher simuliert (Veenhoven, 2021). Die Resultate zeigen, dass bei einer künstlichen Beschneiung von 0.81 km² (Höhenlage 2415 bis 2505 m ü. M.) ein Wasservolumen von 1 Mio. m³ unter heutigen Klimabedingungen keine ganzjährige Schneebedeckung der Beschneiungsfläche ermöglicht und daher die Massenbilanz negativ bleibt. Bei unlimitiert verfügbarem Wasservolumen kann theoretisch ca. 4.38 Mio. m³ Wasser verschneit werden. Damit würde eine ganzjährige Schneebedeckung auf der beschneiten Fläche möglich mit einer resultierenden positiven Massenbilanz. Ungefähr die Hälfte dieses Schnees schmilzt, womit davon ausgegangen werden kann, dass mit ungefähr der Hälfte des Wasservolumens (2.19 Mio. m³) eine ständige Schneebedeckung möglich ist.

Die im Rahmen des Innosuisse-Projekts erarbeiteten Modelle (COSIPY (Sauter, 2020), FHNW, 2020/2021)) haben für das Fallbeispiel Morteratsch folgende Resultate geliefert:

- Modellierungsresultate FHNW (Anhang D.1): Für die Beschneiung einer Fläche von ca. 0.96 km² des Morteratschgletschers zwischen 2440 m ü. M. und 2540 m ü. M. sind 2.5 Mio. m³ Wasser nötig, damit keine negative Massenbilanz resultiert. Die Modellierung (Abbildung 22 und Abbildung 23) zeigt, dass unter den optimierten Randbedingungen die Gletscherfläche immer mit Schnee bedeckt bleibt und pro Jahr werden im Durchschnitt ungefähr 5 Mio. Tonnen weniger Eis abschmelzen. Detaillierte Abklärungen haben ergeben, dass durch die Position und Wahl der Anzahl Schneiseile/Düsen eine Flexibilität betreffend diverser Klimaentwicklungen möglich ist. Weitere Resultate sind im Anhang D.1 dokumentiert.

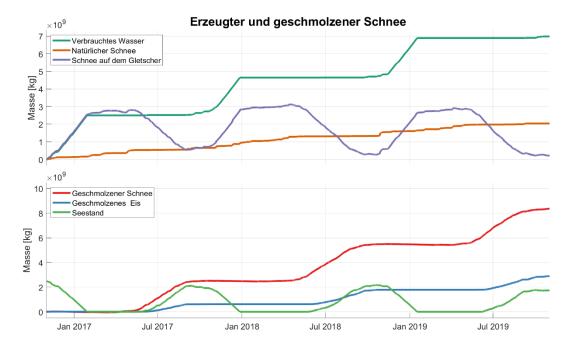


Abbildung 22: Modellierung der Beschneiung Morteratsch (CONFIG\_KW22\_Basl) für folgende Randbedingungen: 8 Schneiseile, je 100 Düsen pro Schneiseil, Speichervolumen Pers von 2.5 Mio. m³ Wasser.

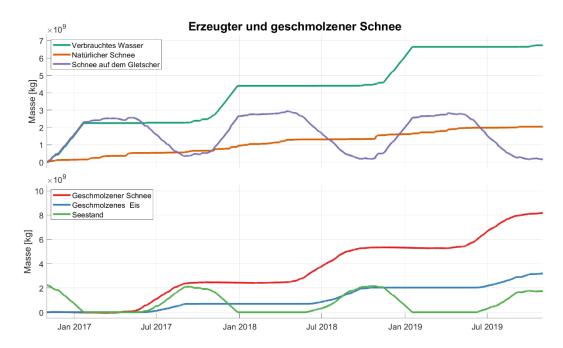


Abbildung 23: Modellierung der Beschneiung Morteratsch (CONFIG\_KW22\_Basline.csv) für folgende Randbedingungen:8 Schneiseile, je 100 Düsen pro Schneiseil, Speichervolumen Pers von 2.25 Mio. m³ Wasser.

Modellierungsresultate COSIPY (Anhang D.2): Für eine Beschneiung einer Fläche von ca. 0.86 km² des Morteratschgletschers zwischen 2420 m ü. M und 2540 m ü. M. sind 1.5 Mio. m³ Wasser in allen modellierten Jahren nicht ausreichend, um eine durchgängige Schneebedeckung zu gewährleisten. Mit einem Wasservolumen von 2.5 Mio. m³ wäre eine durchgängige Schneeabdeckung grösstenteils möglich, mit Ausnahme des sehr warmen Sommers 2018 (Abbildung 24).

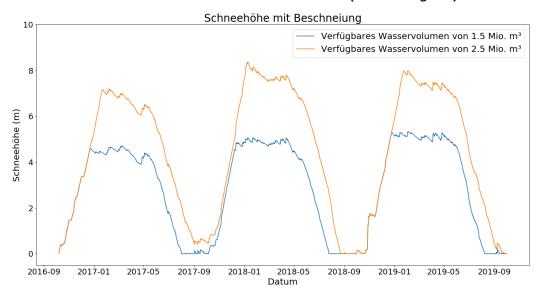


Abbildung 24: Modellierte Schneehöhen mit COSIPY mit Beschneiung für ein verfügbares Wasservolumen von 1.5 Mio. m³ und 2.5 Mio. m³ an der Lokation der Wetterstation für drei hydrologische Jahre.

Das jährlich anfallende Schmelz- und Regenwasser am Persgletscher auf einer Höhe von 2700 m ü. M. im Bereich des Einzugsgebietes 1 ist ca. 2.7 bis 3.3 Mio. m<sup>3</sup>.

Das Schmelz- und Regenwasser fällt vorwiegend in der Zeit vom Juni bis September/Oktober an (Abbildung 25). Eine Beschneiung ist aufgrund der meteorologischen Bedingungen aber grundsätzlich nur in den Monaten Oktober/November bis April/Mai möglich (Abbildung 3). Will heissen: das notwendige Schmelzwasser kann nicht direkt verschneit werden, sondern muss zwischengespeichert werden.

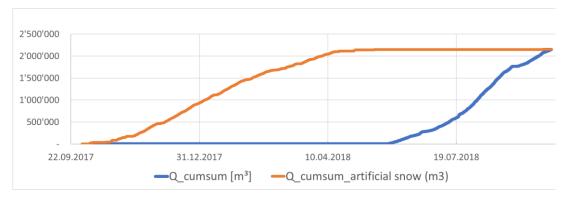


Abbildung 25: Summenkurven (in m³) des anfallenden Schmelzwassers (blau) und des verbrauchten Beschneiungswassers (rot) für das hydrologische Jahr 2017/2018.

Auf den Grundlagen dieser diversen Modellierungen gehen wir davon aus, dass mit einer Beschneiungswassermenge von ca. 2.5 Mio. m<sup>3</sup> die beschneite Fläche von 0.8 km<sup>2</sup> des Morteratschgletschers ganzjährig mit Schnee bedeckt wird und somit den Abschmelzprozess effektiv verzögert.

## 5.3 Bau - Planung

Wasserlogistik

Das Schmelzwasser aus dem Gletschergebiet Pers soll zur Beschneiung des Morteratschgletschers genutzt werden. Damit ist eine Beschneiung ohne zusätzliche Energie möglich.

Dieses Schmelzwasser soll im Bereich der Isla Persa in einem Speichersee gefasst, von Schwebstoffen geklärt (Entsanderanlage) und von dort mit einer in einem Stollen verlegten Druckleitung zur Beschneiungsanlage transportiert werden. In einer Verteilkammer wird das Wasser via Verteilleitungen auf die Schneilseile geführt (Abbildung 26 und Anhang E.2).

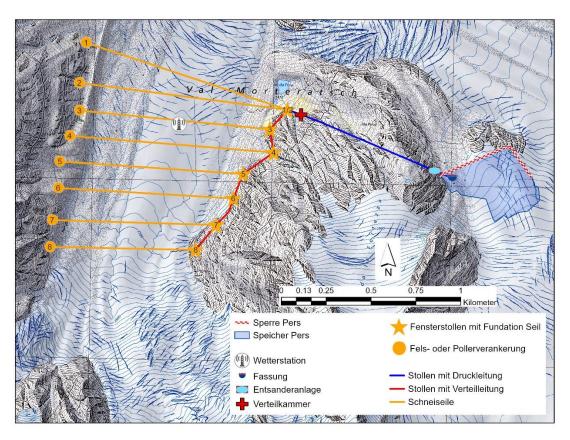


Abbildung 26: Übersicht der möglichen Anordnung der notwendigen Bauten

### Speicher Pers

Der Speicher Pers soll das Schmelz- und Niederschlagswasser während den Sommermonaten speichern, damit es während der Schneitage in der Periode Oktober bis Mai für die Beschneiung des Morteratschgletschers genutzt werden kann. Die natürliche Eintiefung (Abbildung 8 und Abbildung 9) kann mit einer Betonsperre (Schwergewichtsmauer mit Betonvolumen von ca. 130'000 m³) abgeschlossen und volumenmässig erweitert werden. Die Mauer mit einer Kronenläge von ca. 650 m wird maximal ungefähr 31 m hoch mit einer Mauerkrone auf ca. 2756 m ü. M.. Das Nutzvolumen zwischen 2755 m ü. M. und 2730 m ü. M. beträgt ca. 2.2 Mio. m³. Die Mauer wird aufgrund des Stauvolumens und der Höhe unter die Talsperrenverordnung der Sicherheitsaufsicht des Bundes fallen (Stauanlagenklasse I).

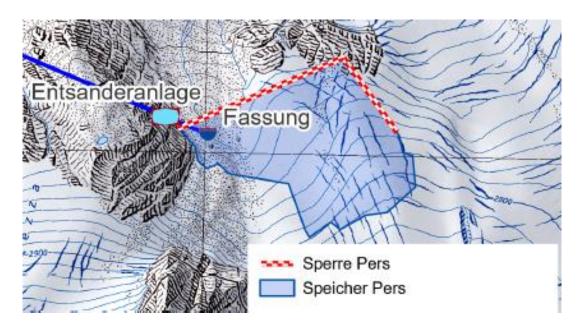


Abbildung 27: Situationsplan des Speichers Pers (blau) inkl. Sperrenachse (rot/weiss).

### Fassung

Über ein unter dem Seespiegel liegendes Fassungsbauwerk, das am linken Widerlager der Sperre angeordnet wird, wird das Wasser aus dem See gefasst. Die Fassung soll auf eine Zuflussmenge von ca. 0.6 m³/s ausgelegt werden und besteht aus einem Betonbauwerk, das mit Dammbalken trockengelegt werden kann. Zudem ist die Fassungshöhe so angeordnet, dass ein Geschiebeeintrag verhindert wird und eine Spülung des Einlaufbereiches möglich ist.

### Entsanderanlage

Das Schmelzwasser enthält Schwebstoffanteil. Eine Entsanderanlage soll die Feinanteile/Schwebstoffe > 0.2 mm aus dem Schmelzwassers ausscheiden, sodass die Düsen der Schneianlage nicht verstopfen. Dazu ist eine Verlangsamung der Strömung nötig. Eine Vorbemessung geht bei einem Bemessungsabfluss von max. 0.6 m³/s von einem Langsandfang von ca. 30 m Länge (ohne Einlauf und Auslaufstrecke), 2 m Breite und einer Tiefe von 3 m aus. Dieser wird unterirdisch angeordnet. Die periodische Spülung des Sandfanges erfolgt mit dem Schmelzwasser in den bestehenden natürlichen Gewässerlauf.

# Stollen mit Druckleitung

Über die Fassung und den Entsander gelangt das Wasser in die Druckleitung (Durchmesser ca. 0.6 m, Länge ca. 0.9 km), die in einem Stollen verläuft. Unmittelbar nach dem Einlauf in die Druckleitung wird eine Drosselklappe angeordnet, damit die Leitung im Notfall und für den Unterhalt aus dem Betrieb genommen werden kann. Der Stollen von einer Länge von ca. 900 m wird in einem Sprengvortrieb vom Installationsplatz 1 her in Richtung Speicher Pers und in Richtung Schneiseil 8 ausgebrochen. Die horizontale Linienführung wird durch den Standort der Fassung, die Verteilkammer, die Lage des Schneiseils 8 und die Geologie bestimmt. Die vertikale Linienführung orientiert sich an der Höhenlage der Fassung/Ent-

sanderanlage und der Verteilkammer und an den geologischen Verhältnissen. Das Gefälle des Stollens von der Entsanderanlage bis zur Verteilkammer beträgt so ca. 20 %. Ein Sprengvortrieb vom Installationsplatz 1 aus ist somit realisierbar.

Der Stollen enthält die Druckleitung und gewährt den Zugang zur Fassung/Entsanderanlage. Die Begeh- und Befahrbarkeit mit einem Kleinfahrzeug für den Unterhalt und die Montage soll garantiert werden. Zudem sind aus baubetrieblichen Bedingungen (Lüftung, Abmessungen Geräte, Arbeitsraum, Fluchtwege) minimale Abmessungen einzuhalten, sodass eine ungefähre Querschnittsfläche von 12-15 m² resultiert (Abbildung 28). Es werden aus logistischen und sicherheitstechnischen Gründen auch 3-4 Ausweichnischen von ca. 20 m notwendig.

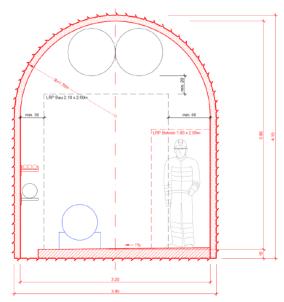


Abbildung 28: Stollenprofil mit Druckleitung

### Verteilkammer und -leitung

Von der Verteilkammer aus wird das Wasser über eine Verteilleitung (Länge ca. 1.2 km) im Stollen (Länge ca. 900 m) zu den Verankerungen der Schneiseile geführt. Die rechtsseitigen Ankerpunkte der Schneiseile werden aus Gründen des Schutzes vor Naturgefahren (Lawinen/Steinschlag/Murgang) und dem Betrieb/Unterhalt mittels eines Stollens und über Fensterstollen erschlossen. Über eine Bypassleitung wird das Wasser zum jeweiligen Schneiseil geführt. Die Verteilkammer wird frostsicher erstellt und enthält die Drucklufterzeugung, die Steuerung der Anlage sowie das notwendige Betriebs- und Unterhaltsmaterial. Die notwendige Energie zur Steuerung und Beleuchtung soll mit Solarenergie vor Ort erzeugt und gespeichert werden.

### Fundation Seile

Die Schneiseile werden beidseits des Gletschers verankert (Abbildung 26, Anhang E.2) und sind lokal vor Lawinen/Steinschlag und Eisstürzen zu schützen. Gemäss ersten Abklärungen sind folgende Verankerungsmöglichkeiten vorgesehen:

- Felsanker: Die Verankerung erfolgt mittels permanenten Ankern im vorhandenen Felsen. Die Kraftübertragung zwischen Anker und Tragseile erfolgt über einen Betonriegel. Es muss damit gerechnet werden, dass ein Teil der Anker im Permafrost zu liegen kommt. Entsprechende Massnahmen sind zu berücksichtigen. Alle rechtsseitig liegenden Anker werden im Felsen der Fensterstollen gesetzt.
- Pollerverankerung: Eine Verankerung im Bereich der Seitenmoränen (Lockermaterial) und des örtlich zu erwartendem Permafrost ist mit einer Schwergewichtsverankerung möglich. Diese besteht aus einem Ortsbetonaufbau («Betonkiste»), welcher mit dem anfallenden Aushubmaterial wieder verfüllt wird. Der überwiegende Teil der Verankerung wird demnach nicht sichtbar, sondern im Boden verbleiben. Die Konstruktion ist so geplant, dass die Spann- und Umlenkvorrichtungen der Schneiseile vor der Witterung und vor Steinschlag und Lawinen bestmöglich geschützt werden können. Vor der Abspannvorrichtung wird eine Umlenkstütze mit Betonfundament benötigt.

### Anordnung Schneiseile

Die jeweiligen Schneiseile bestehen aus zwei Tragseilen, an denen mittels Seilreiter die Schneirohre (Wasserleitungen, Luftdruckrohre) mit den Schneeerzeugern aufgehängt werden. Die Vorbemessung der Beschneiung geht aufgrund der aktuellen Kenntnisse von 8 Schneiseilen aus, die quer zur Gletscherhauptrichtung und längs zur Hauptwindrichtung angeordnet werden. Die ca. 850 m bis 1200 m langen Seile werden in einem Abstand von ca. 120 m (Abbildung 26, Anhang E.2) angeordnet. Die Schneiseile überspannen den Gletscher in einer Höhe von ca. 20-60 m. Die Planskizze zum Schneiseil 8 ist im Anhang E.3 ersichtlich.

### Logistik

Die Erschliessung der diversen Baustellen (Sperre, Stollen, Beschneiungsanlage) im Bereich der Isla Persa ist nicht nur technisch, sondern vor allem auch seitens der Umwelteingriffe anspruchsvoll. Es wurden folgende Erschliessungsmöglichkeiten geprüft (Abbildung 29, Anhang E.1):

- Erschliessung mit provisorischer/temporärer Baupiste inkl. Materialseilbahn vom Gletschervorfeld Morteratsch (grün): Diese Variante stellt einen schweren Eingriff in die Landschaft des Gletschervorfeldes dar. Zudem ist aufgrund der potentiellen Naturgefahren (Steinschlag, Lawinen) ein Betrieb mit einer Materialseilbahn mit einem grossen Risiko verbunden. Diese Variante stellt aus heutiger Sicht keine Lösung dar.
- Erschliessung ab Bergstation Diavolezza (rot): Diese Variante hat minimale Eingriffe in der Landschaft zur Folge und baut auf vorhandener Infrastruktur auf. Lager- und Umschlagplätze an der Talstation Diavolezza sind vorhanden. Mit der Diavolezza-Bahn lassen sich Materialtransporte bis 10 t vornehmen. An der Bergstation wäre ein Umladen auf eine temporäre Materialseilbahn (Länge ca. 2.2 km), die zum Installationsplatz 1 führt, möglich.
- Unterirdische Erschliessung (schwarz): Eine Erschliessung mit einem Stollen stellt den geringsten Eingriff in die sensible Landschaft dar und ermöglicht auch einen permanenten Zugang für allfällige Wartungsar-

beiten in den Wintermonaten und den Schutz vor Naturgefahren. Mögliche Zugangsportale sind einerseits bei der Station Bernina Suot (Stollenlänge ca. 4.7 km) und Bernina Diavolezza (Stollenlänge ca. 5.0 km) möglich, aber auch beim Lago Bianco (Stollenlänge ca. 4.6 km). Der Erschliessungstollen muss einen Querschnitt von mind. ca. 15 m² aufweisen, damit er für den Bau, die Montage und den Betrieb mit Fahrzeugen nutzbar ist. Aufgrund der langen Bauzeit mit Sprengvortrieb ist in einer späteren Planungsphase eine Option mit einer TBM zu prüfen.

Es sind im Baugebiet zwei Installationsplätze vorgesehen, die in den Sommermonaten genutzt werden: einer im Bereich der Verteilkammer (Installationsplatz 1) und einer im Bereich der Gewichtsmauer (Installationsplatz 2). Beim Installationsplatz 2 soll u.a. die Betonproduktion für die Gewichtsmauer erfolgen.

Für das Ausbruchsmaterial sind ortsnahe Deponien zu definieren.

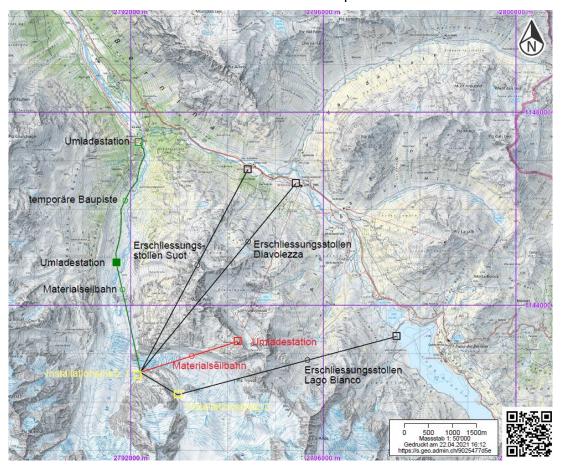


Abbildung 29: Übersicht der Baustellenerschliessungsmöglichkeiten.

## 5.4 Ausrüstung – Auslegung

Wasser- und Luftleitungen

Die Verteilleitungen bringen das Wasser unter einem Druck von ca. 20-25 bar und die Druckluft via Stollen/Fensterstollen zu den Ankerpunkten der Schneiseile. Danach wird das Wasser und die Druckluft über flexible Leitungen mit den Beschneiungsrohren verbunden. Das sogenannte Schneiseil besteht aus Aluminium-Rohrelementen mit integrierter Schneitechno-

logie. Diese werden miteinander verschraubt und an den Tragseilen aufgehängt (Abbildung 30). Das System kann sich nach dem Abschalten vollständig entleeren.



Abbildung 30: Die Wasser- und Druckluftleitung werden an den Tragseilen aufgehängt.

### Drucklufterzeugung

Um den Gefrierprozess der Wassertropfen zu starten, braucht es Eiskeime. Diese werden über spezielle Düsen mit Druckluft und Wasser erzeugt. Die Aufbereitung der Druckluft wird über eine direktgekoppelte Turbinen-Kompressor-Kombination angestrebt (Abbildung 31).



Abbildung 31: Drucklufterzeugung mit Turbine und Kompressor.

Dabei wird ein Teil des Wasserdrucks in der Wasserturbine abgebaut und mit der gewonnenen Energie der Druckluft-Kompressor angetrieben. Dieses Konzept hat den Vorteil, dass die Energieumwandlung von Wasserdruck in Druckluft effizienter vollzogen werden kann als mit der heutigen "Zero-E" Technologie, wo ein Wasserstrahl-Gasverdichter eingesetzt wird. Die Drucklufterzeugung für alle Schneiseile ist in der Verteilkammer stationiert. Alternativ ist in der nächsten Projektierungsphase auch eine Anordnung in den Fensterstollen denkbar.

Als Kompressor kann ein handelsübliches Modell, wie es heute schon für die Beschneiung eingesetzt wird, verwendet werden. Die Turbine hingegen muss genau auf die Anforderungen des Schneiseils ausgelegt werden. Eine besondere Herausforderung stellt dabei der Anfahrprozess dar, die Prozedur für einen sicheren Anlauf muss im Detail noch untersucht werden.

#### Schneidüsen

Die Modellierung hat gezeigt, dass für eine permanente Schneedecke auf dem beschneiten Gletscherfeld ca. 80-100 Schneidüsen pro Schneiseil notwendig sind. Dieses werden ca. alle 12 m entlang der Schneirohre angeordnet.

### Dimensionierung Schneiseile

Bei den Schneiseilen handelt es sich um eine Tragstruktur aus Seilen und der Schneileitung. Die Geometrie und Anordnung ist so gewählt, dass ein Befahren mit einem Wartungsfahrzeug möglich ist.

Jedes Schneiseil besteht aus zwei Tragseilen (VVS mit mit 2 Z-Lagen) von einem Durchmesser von ca. 50-60 mm und Längen von 850 bis 1200 m, an denen alle 6-12 m mittels Seilreiter (Abbildung 32) die Schneirohre (Wasser-/Luftdruckrohre) mit den Schneerzeugern aufgehängt werden. Ein Längsschnitt durch ein Schneiseil ist im Anhang E.3 dokumentiert.

Für den Unterhalt der Schneitechnologie an den Seilen ist eine seilgezogene Wartungsbahn (Abbildung 33) vorgesehen. Die erforderlichen Komponenten wie Seilführungsrollen werden ebenfalls in die Schneiseil-Struktur integriert.

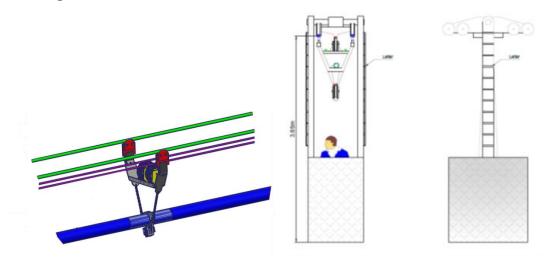


Abbildung 32: Seilreiter

Abbildung 33: Wartungsbahn

### 5.5 Betrieb und Unterhalt

Die Kosten für den Betrieb und Unterhalt hängen u.a. entscheidend von der Ausgestaltung der sich in Entwicklung befindenden Schneiseile ab (Innosuisse-Projekt). Die im Winter 2020/21 im Innosuisse-Projekt durchgeführten Versuche zeigen, dass Eisbildungen im Bereich der Düsen den Wartungsaufwand massiv erhöhen können. Bei grossen Windgeschwindigkeiten war der Betrieb teilweise nicht möglich. Aus diesen Gründen wird im Winter 2021/22 ein neuer Prototyp entwickelt und getestet. Im darauffolgenden Winter soll auf dem Piz Corvatsch ein erstes grösseres, ca. 550 m langes Schneiseil erstellt werden, bei welchem das Vorgehen bei

normalen Wartungen, aber auch der Umgang mit Störungen studiert werden kann. Dabei muss auch die Frage beantwortet werden, ob der Betrieb der Anlage bei Grenzbedingungen angestrebt werden soll oder nicht. Sobald diese Fragen beantwortet sind, können verlässliche Kostenberechnungen für den Betrieb und Unterhalt der Anlage erstellt werden.

# 6 Nachhaltigkeit

### 6.1 Umwelteinflüsse

Ein Bauvorhaben in dieser Grössenordnung erfordert einen Umweltverträglichkeits-Bericht (UVB), eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) sowie den Einsatz einer Umwelt-Baubegleitung (UBB) mit mehreren Fachpersonen. Auch sind Ersatzmassnahmen zu definieren.

Als grösster Einfluss auf die Umwelt müssen die baulichen Eingriffe in eine bisher völlig unberührte Landschaft erwähnt werden. Dazu zählen die Eingriffe für die Erschliessung, die Baustelleninstallationen (Kapitel 5.3), aber auch die Anlage selbst. Die Schneiseile werden vom vielbegangenen Wanderweg durch das Vorfeld des Morteratschgletschers aus sichtbar sein, auch müssten die Seile aus Sicherheitsgründen für die Luftfahrt mit orangen Markierungen ausgestattet werden. Insbesondere der Speichersee beim Persgletscher mit der Betonmauer wird markant in der bisher unberührten Gletscherlandschaft in Erscheinung treten und befindet sich unmittelbar unterhalb der Aussichtsplattform der Diavolezza Bergstation. Während der Bauphase sind beide Installationsplätze von der Diavolezza aus sichtbar. Mit dem Baugesuch ist deshalb eine Sichtbarkeitsanalyse einzureichen und es sind allfällige Massnahmen zu definieren, welche die Sichtbarkeit der Infrastruktur vermindern (Erschliessung mit Stollen).

Auch sind eine allfällige Rückbaubarkeit und die Herstellung des ursprünglichen Zustandes nicht vollständig möglich, insbesondere im Bereich des Speichersees.

Der Speichersee und die Beschneiungsanlage stellen einen Eingriff in den natürlichen Wasserhaushalt dar. Hierzu muss aber erwähnt werden, dass dies ja genau das Ziel des Projektes ist.

Der Betrieb der Anlage ist ohne Strom und somit CO₂-neutral möglich, nicht aber die Erstellung und die Wartung. Über die Wartungsintensität, die Störanfälligkeit, die Langlebigkeit sowie die Reparaturfähigkeit der Anlage können im Moment noch keine genauen Aussagen gemacht werden, doch auch diese Punkte müssen in die Abschätzung der Umwelteinflüsse einfliessen.

Der Einfluss der Erstellung und Inbetriebnahme der Anlage auf verschiedene Faktoren wurde in einer möglichen Relevanzmatrix (Tabelle 3) grob skizziert.

| Faktoren                       | Ausgangs-<br>zustand | Bauphase | Betriebs-<br>phase |
|--------------------------------|----------------------|----------|--------------------|
| Energie                        |                      | •        |                    |
| Gewässerschutz / Quellgewässer |                      |          |                    |
| Offene Gewässer                |                      |          | 0                  |
| Luft                           |                      | •        |                    |
| Lärm                           |                      | •        | •                  |
| Boden                          |                      | •        |                    |
| Flora / Fauna                  |                      | •        | •                  |
| Landschaftsattraktivität       |                      | •        | 0                  |
| Infrastruktur                  |                      | •        | •                  |
| Tourismus                      | 0                    | 0        | 0                  |
| Gesellschaft                   | 0                    | 0        | 0                  |
| Bauabfälle                     |                      | •        | •                  |
| Umweltgefährdende Stoffe       |                      | •        | •                  |

Tabelle 3: Prototyp einer möglichen Relevanzmatrix als Bestandteil eines Umweltverträglichkeitsberichts.

♦: mit Vorbelastung, □: unerheblich, •: mässige Belastung für die Umwelt, •: bedeutende Belastung für die Umwelt, 0: Entlastung/Verbesserung für die Umwelt

# 6.2 Relevanzanalyse zur Nachhaltigkeit

Im Einklang mit der Bundesverfassung (Artikel 2 und 73) ist die Nachhaltige Entwicklung eine zentrale Leitidee der Schweizer Bundespolitik. Daher stellt sich auch immer wieder die Frage: Stehen grosse Vorhaben des Bundes im Einklang mit den Zielen einer nachhaltigen Entwicklung?

Diese Frage kann mit einer Nachhaltigkeitsbeurteilung (NHB) geklärt werden. Der Bundesrat hat in der Strategie Nachhaltige Entwicklung festgelegt, dass eine NHB "insbesondere bei neuen bedeutsamen und nachhaltigkeitsrelevanten Vorhaben legislatorischer, planerisch-konzeptioneller oder baulicher Natur vorzunehmen" ist.

Damit eine NHB möglichst effizient und nach einheitlichen Grundsätzen durchgeführt werden kann, wurde ein Leitfaden erarbeitet und in dieser Studie eingesetzt. Er zeigt ein Vorgehen in neun Arbeitsschritten und erleichtert die Arbeit mit einem Excel-Tool NHB, mit dem die Relevanz eines Vorhabens aus Sicht der nachhaltigen Entwicklung geprüft und auch die Auswirkungen grob erfasst werden können.

In diesem Kapitel wird nun mit Hilfe des Excel-Tools in Form einer ersten Relevanzanalyse eine grobe Einschätzung der möglichen Wirkungen anhand der Bundesratskriterien und Zusatzkriterien durchgeführt. Dabei musste ein wichtiger Entscheid getroffen werden: Geht es um die Beurteilung der Nachhaltigkeit der Konkretisierung des MortAlive-Projektes auf dem Morteratschgletscher oder geht es um den Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung in trockenen Gebirgsregionen, falls es gelingen sollte, die MortAlive-Idee praktisch umzusetzen, unabhängig davon, ob je ein Schneiseil über den Morteratschgletscher gespannt wird. Wir entschieden uns für Letzteres, denn der Fokus dieser Studie liegt klar auf diesem Fall.

Die Ergebnisse der Relevanzanalyse sind in der Tabelle 4 dargestellt. Bereits auf den ersten Blick fällt auf, dass sich alle Kriterien ausser W4 im grünen Bereich befinden. Einerseits ist es gut nachvollziehbar, dass mit Marktmechanismen und Kostenwahrheit eine derartig heftige Auswirkung des Klimawandels nicht bewältigbar ist. Hingegen erstaunt es, dass sowohl im Umwelt- als auch im Gesellschaftsbereich in der Nachhaltigkeitsoptik die positiven Wirkungen dominieren. Damit soll jedoch in keiner Weise die Grössenordnung des Umwelteingriffs in Frage gestellt werden, denn es sind vor allem Opportunitätswirkungen, welche im Umweltbereich den Ausschlag geben. Interessant ist hingegen, dass gemäss den gewichteten Wirkungen, der wirtschaftliche Effekt am geringsten ist, was wohl damit zusammenhängt, dass Gletscherschutz, wie bereits erwähnt, mit Marktmechanismen kaum realisierbar sein wird.

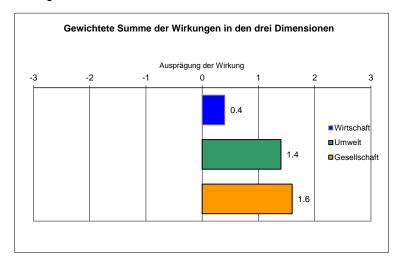
Tabelle 4: Relevanzananalyse zur ersten Einschätzung der möglichen Wirkungen anhand der Bundesratskriterien zur Nachhaltigkeitsbeurteilung

| Beurteilungskriterien (Bundesratskrite                       | rien) |    | Λ., | onröd | auna.   | dor M | /irkun | ~              | ۱ -        | l Pow | ertung de | r I Incich | orhoit | Bemerkungen  |
|--|-------|----|-----|-------|---------|-------|--------|----------------|------------|-------|-----------|------------|--------|--|
| Nr. Bezeichnung<br>Wirtschaft                                | -3    | -2 |     |       | gurig ( |       | 3      | g<br>unbekannt | Gewichtung |       | kleine    |            |        |  |
| W1 Einkommen und Beschäftigung                               |       |    |     |       |         |       |        |                | 20%        | Х     |           |            |        |  |
| W2 Produktivkapital  |       |    |     |       |         |       |        |                | 20%        |       |           |            | Х      | Nur eine gesicherte Wasserversorgung kann die Landwirtschaftliche Produktivität siche                                  |
| W3 Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft                 |       |    |     |       |         |       |        |                | 20%        | Х     |           |            |        |  |
| W4 Marktmechanismen und Kostenwahrheit                       |       |    |     |       |         |       |        |                | 20%        |       | х         |            |        | Nur über Internationale Unterstützung (Green Climate Fund) realisierbar.   |
| W5 Wirtschaften der öffentlichen Hand                        |       |    |     |       |         |       |        |                | 20%        | Х     |           |            |        |  |
|  |       | 1  | 1   |       |         | ı     | 1      | 1              |            | ı     |           |            |        | '  |
| Umwelt U1 Naturräume und Artenvielfalt                       |       |    |     |       |         |       |        |                | 20%        |       | х         |            |        | Ein minimaler sommerlicher Abfluss hilft trägt auch für den Erhalt von Naturräumen und der Artenvielfalt bei.          |
| U2 Erneuerbare Ressourcen                                    |       |    |     |       |         |       |        |                | 20%        | х     |           |            |        | Durch den Erhalt von bestehenden Strukturen wird der Verbrauch von erneuerbaren Ressourcen gedrosselt.                 |
| U3 Nicht erneuerbare Ressourcen                              |       |    |     |       |         |       |        |                | 20%        |       | Х         |            |        | Erfahrungsgemäss erhöht Landflucht den Verbrauch von fossilen Brennstoffen.  |
| Belastung der natürlichen Umwelt und des Menschen            |       |    |     |       |         |       |        |                | 20%        |       |           | х          |        | Indirekte Wirkung, da traditionelle Landwirtschaft z.B. in Ladakh zu sehr begrenzten<br>Schadstoffen führt.            |
| U5 Umweltkatastrophen und Unfallrisiko                       |       |    |     |       |         |       |        |                | 20%        | х     |           |            |        | Reduktion des Risikos von Gletscherseeausbrüchen durch die gezielte Nutzung von Schmelzwasser.                         |
| Gesellschaft   |       |    |     |       |         |       |        |                |            |       |           |            |        |  |
| G1 Gesundheit und Sicherheit                                 |       |    |     |       |         |       |        |                | 20%        | Х     |           |            |        | Sicherung der Wasserversorgung erhöht die Gesundheit und Sicherheit der ländlichen Bevölkerung                         |
| G2 Bildung, Entfaltung und Identität des Einzelnen           |       |    |     |       |         |       |        |                | 20%        |       | Х         |            |        | Landwirtschft als Teil der Grundversorgung bildet eine unverzichtbare Grundlage für de<br>Aufbau eines Bildungssystems |
| G3 Kultur und gesellschaftliche Werte                        |       |    |     |       |         |       |        |                | 20%        |       |           | х          |        | Erhalt von Kultur und gesellschaftlicher Werte in ländlichen Gegenden.   |
| G4 Rechtsgleichheit, Rechtssicherheit und Gleichberechtigung |       |    |     |       |         |       |        |                | 20%        | х     |           |            |        |  |
| G5 Solidarität   |       |    |     |       |         | _     |        |                | 20%        |       | х         |            |        | Mit Eisspeichern können innergenerationale und intragenerationale Ungleichheiten ausgeglichen werden.                  |

| 3 Irreversibilität                 |  |  | х | Schneiseile können jederzeit zurückgebaut werden.   |
|------------------------------------|--|--|---|---|
| 4 Belastung künftiger Generationen |  |  | х | Höchstens, wenn die durch den Gletscherschutz erzielte Verschnaufspause nicht für den Klimaschutz genutzt wird. |
| 5 Risiken/Unsicherheiten           |  |  | х | kaum abschätzbar, es gehen vom Verfahren keine direkten Gefahren aus.   |
| 6 Minimalanforderungen             |  |  | х |   |
| 7 Räumlicher Wirkungsperimeter     |  |  | х |   |
| 8 Zielkonflikte                    |  |  | х |   |

### Gewichtete Wirkungen

#### Wirkungen:



Anzahl unsichere Wirkungsbewertungen (mittlere und grosse Unsicherheit):

Wirtschaft 1 Umwelt 1 Gesellschaft 1

Anzahl Kriterien ohne Wirkungsbewertung (Wirkungsbewertung unbekannt):

Wirtschaft 0 Umwelt 0 Gesellschaft 0

# 7 Risiken

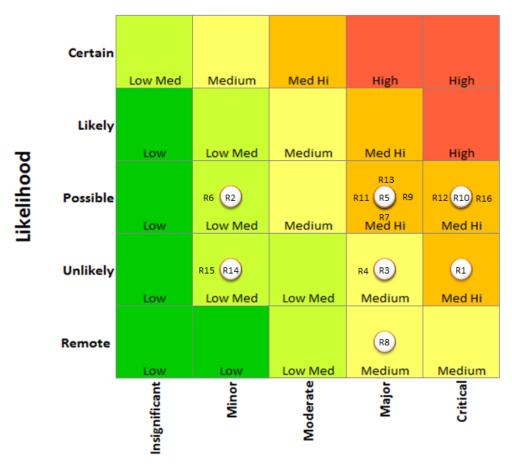
In der folgenden Analyse setzen wir uns bewusst mit möglichen Risiken auseinander, indem wir sie einerseits identifizieren und nach einer kurzen Beschreibung charakterisieren (Tabelle 5). Dabei wird die Wirkung eines Risikos auf den Projekterfolg und deren Eintretenswahrscheinlichkeit abgeschätzt.

Tabelle 5: Identifizierte Risiken mit Kurzbeschreibung und Indikatoren beim Eintreffen des Risikos (Farbkodierung gemäss Abbildung 34

| Nr  | Risiko                                      | Beschreibung   | Indikatoren   |
|-----|---|--|---|
| R1  | Schneiseil nicht<br>realisierbar            | Innosuisse-Projekt ist ein Misserfolg  | Projektziele werden nicht erreicht                              |
| R2  | Verzögerungen<br>beim Bau                   | Bauliche Probleme (Geologie) bei Stollen und Fundation Sperre  | Geologische Abklärungen, Verlängerung Bauzeit, Erhöhung Kosten  |
| R3  | Beschneiungs-<br>kapazität                  | Gewünschte tägliche Schneemengen sind nicht produzierbar   | Versuchsanlagen funktionieren nicht zufriedenstellend           |
| R4  | Technische<br>Störfälle                     | Gefrierprobleme, Probleme mit der Verankerung, Sturmschäden, Einwirkung von Naturgefahren (Steinschlag, Felssturz, Eislawinen)   | Gebaute Anlage hat ständig Betriebsprobleme und/oder Schäden.   |
| R5  | Beschneiungs-<br>leistung                   | Ungünstige Klimaentwicklung reduziert Anzahl<br>Schneitage (zu warme Wintertemperaturen, zu<br>viele windstille Tage), Gletschermodellierungen<br>gingen von falschen Annahmen aus | Schneemenge und -qualität sind kritisch.                        |
| R6  | Wasserlogistik                              | Zu wenig Wasser, kalte Wassertemperaturen, zu hohe Sedimentfracht  | Vorabklärungen erweisen sich als falsch oder ungenügend.        |
| R7  | Worst Case Kli-<br>mawandel                 | Temperaturen nehmen wesentlich stärker zu als<br>prognostiziert, massiv reduzierte Massenbilanz<br>schränkt die Wirkung des Gletscherschutzes ein.                                 | Worst Case IPCC-Szenarien treten ein.                           |
| R8  | Hersteller feh-<br>len                      | Bächler oder Bartholet verschwinden vom<br>Markt.  | Es existieren keine Hersteller für den Bau der Anlage.          |
| R9  | Bewilligungen                               | Baubewilligung (inkl. UVP) wird im BLN-Gebiet nicht erteilt.   | Gemeinde Pontresina darf keine<br>Baubewilligung erteilen.      |
| R10 | Gesellschaftli-<br>che Akzeptanz            | Gemeinde Pontresina, Kanton Graubünden oder Eidgenossenschaft stellen sich dem Projekt entgegen.   | Medienarbeit und politische Prozesse laufen ungünstig.          |
| R11 | Widerstand<br>von Umweltor-<br>ganisationen | Umweltorganisationen bekämpfen das Projekt   | Einsprachen, Gerichtsfälle und im Extremfall Sabotageakte.      |
| R12 | Finanzierung<br>Bau                         | Weder staatliche noch private Unterstützung er-<br>möglicht die Planung und den Bau der Anlage.  | Verzögerung bei Finanzierungszusagen, Probleme mit Finanzierung |

| Nr  | Risiko                   | Beschreibung   | Indikatoren   |
|-----|--------------------------|--|---|
| R13 | Finanzierung<br>Betrieb  | Es gelingt nicht, den Betrieb während 30 Jahren zu finanzieren.  | Projekt bleibt stehen oder muss sogar zurückgebaut werden.  |
| R14 | Konkurrenzlö-<br>sungen  | Politik, Wirtschaft und Gesellschaft setzen auf eine andere Lösung.  | Kein weiteres Interesse an Mort-<br>Alive vorhanden.  |
| R15 | Neue Gefah-<br>renquelle | Geschützte Gletscherfläche führt zu neuen Gefahren wie z.B. Seebildung.  | Beobachtbare geomorphologische Indizien   |
| R16 | Rückbau der<br>Anlage    | Die Anlage muss zurückgebaut werden, da sie zu<br>wenig Nutzen bringt oder gesellschaftlich nicht<br>mehr akzeptiert wird oder deren Betrieb nicht<br>mehr sichergestellt werden kann. | Politischer Entscheid, Betreiberge-<br>sellschaft geht Konkurs, ungünstige<br>klimatische Bedingungen |

Diese Beurteilung wird in einer Risikomatrix zur Beurteilung der gesamthaften Risikosituation visualisiert (Abbildung 34). Demnach kann insgesamt von einem mittleren bis höheres Risiko für das ganze Projekt gesprochen werden, wobei weder ein hohes noch ein geringes Risiko identifiziert werden.



# **Impact**

Abbildung 34: Risikomatrix aus Wirkung und Eintreffenswahrscheinlichkeit der identifizierten Risiken ohne Risikoprävention und Korrekturmassnahmen

Auf der obigen Grundlage werden nun Überlegungen angestellt, wie die verschiedenen Risiken sowohl präventiv als auch nach deren allfälligem Eintreten minimiert werden können (Tabelle 6).

Tabelle 6: Präventions- und Korrekturmassnahmen zu den identifizierten Risiken und zugehörige Erfolgsfaktoren

| ID  | Risiko                                      | Präventive Massnah-<br>men   | Korrekturmassnah-<br>men                                       | Erfolgsfaktoren   |
|-----|---|--|--|---|
| R1  | Schneiseil nicht re-<br>alisierbar          | Regelmässige Reflexion in der Projektleitung   | Mediation, Ressourcen auswechseln                              | Starkes Team  |
| R2  | Verzögerungen<br>beim Bau                   | Zusätzliche Investitionen in<br>Vorabklärungen, Zweitmei-<br>nungen                    | Zusätzliche Baumassnah-<br>men und Projektanpassun-<br>gen     | Hohes Qualitätsver-<br>ständnis                                       |
| R3  | Beschneiungskapa-<br>zität                  | Tests auf Versuchsanlage   | Evaluation von Alternativen                                    | fachlich einwandfreie<br>und kreative Arbeit,<br>Zusatzprojekt        |
| R4  | Technische Stör-<br>fälle                   | Vorabklärungen der Haupt-<br>punkte (Fundation, Trags-<br>truktur, Leitungen, Betrieb) | Workaround   | Gute Testbedingungen, genügend Zeit                                   |
| R5  | Beschneiungsleis-<br>tung                   | Tests auf Versuchsanlage   | Konstruktive Änderungen<br>Konzeptänderung                     | Prüfung von Extremer-<br>eignissen                                    |
| R6  | Wasserlogistik                              | Abflussmessungen und<br>Massenbilanzberechnun-<br>gen                                  | Anpassung Technik und Lösung                                   | Gute Untersuchungen   |
| R7  | Worst Case Klima-<br>wandel                 | Projektanpassungen (Versch<br>sätzliche Speicher)                                      | niebung in höhere Lagen, zu-                                   | Globale Klimaschutz-<br>massnahmen                                    |
| R8  | Hersteller fehlen                           | Unterstützung bei der Vermarktung der Schneiseile                                      | Suchen von Ersatzpartner                                       | Wirtschaftslage   |
| R9  | Bewilligungen                               | Transparent informieren, regelmässig das Gespräch suchen                               | Politische Unterstützung<br>suchen, Ersatzstandort su-<br>chen | Networking und Zu-<br>sammenarbeit mit Po-<br>litiker und Amtsstellen |
| R10 | Gesellschaftliche<br>Akzeptanz              | Zusammenarbeit mit Medien, Bereitschaft für öffentliche Vorträge                       | Kommunikationskam-<br>pagne starten                            | Medienpräsenz   |
| R11 | Widerstand von<br>Umweltorganisati-<br>onen | Sachlicher Umgang mit Kritik, Diskussionsbereitschaft, pers. Umweltengagement          | Konstruktive Zusammenar-<br>beit                               | Überzeugende Diskussionen   |
| R12 | Finanzierung Bau                            | Zusammenarbeit privaten<br>Organisationen/Verei-<br>nen/Stiftungen, Medienar-<br>beit  | Alternativen suchen  | Positive Wahrneh-<br>mung des Projektes in<br>der Gesellschaft        |

| ID  | Risiko                    | Präventive Massnah-<br>men  | Korrekturmassnah-<br>men                             | Erfolgsfaktoren                          |
|-----|---------------------------|---|--|--|
| R13 | Finanzierung Be-<br>trieb | Zusammenarbeit privaten<br>Organisationen/Verei-<br>nen/Stiftungen, Medienar-<br>beit | Alternativen suchen                                  | Finanzielle Unterstützung                |
| R14 | Konkurrenzlösun-<br>gen   | Beobachtung der Konkur-<br>renz   | Vergleiche anstreben, Optimierung der eigenen Lösung | Nachfrage bei Be-<br>troffenen           |
| R15 | Neue Gefahren-<br>quelle  | Überwachungsdispositiv  | Ausdehnung der beschneiten Fläche                    | Sensibilisierung der<br>Verantwortlichen |
| R16 | Rückbau der An-<br>lage   | Breitabgestützter Len-<br>kungsausschuss  | Projektanpassung                                     | Qualität der strategi-<br>schen Gremien  |

Diese Risikooptimierung wird wiederum in einer Risikomatrix visualisiert (Abbildung 35). Dabei wird ersichtlich, dass das resultierende Gesamtrisiko klar gesenkt werden kann und nur noch zwei Risiken (R10 Gesellschaftliche Akzeptanz und R7 Worst Case Klimawandel) ein mittleres bis höheres Risiko darstellen. Diese beiden Risiken hängen gegenseitig voneinander ab, denn wenn der Klimawandel heftiger zuschlägt als erwartet, dürfte die gesellschaftliche Akzeptanz kaum ein Problem darstellen, weil es klar sein sollte, dass Menschen in Bedrängnis geholfen werden sollte. Hingegen stellt das Ausmass des Klimawandels ein ernsthaftes Risiko dar, da dieser die Möglichkeiten des Verfahrens in Frage stellt.

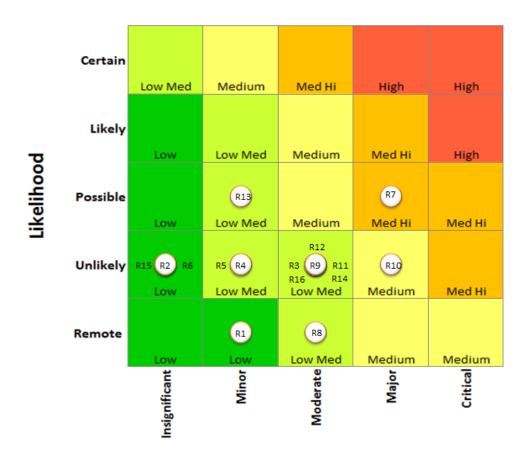


Abbildung 35: Risikomatrix aus Wirkung und Eintreffwahrscheinlichkeit der identifizierten Risiken mit Risikooptimierung durch Risikoprävention und Korrekturmassnahmen

**Impact** 

Dank der Risikobeurteilung konnten die vorstellbaren Risiken identifiziert und bewertet werden, wodurch Transparenz über Art und Umfang der Risiken geschaffen wird und die Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie durch Präventions- und Korrekturmaßnahmen die Situation verbessert werden kann. Diese Ergebnisse können auch für die Risikokommunikation verwendet werden, um beispielsweise gegenüber Geldgebern Transparenz zu schaffen. Zu beachten ist jedoch, dass die ganze Analyse entscheidend von unserer eigenen Risikowahrnehmung geprägt ist. Denn dass Risiken überhaupt erkannt werden, hängt auch davon ab, welche Beziehung und Erfahrungen zu bisherigen Risiken vorliegen. So werden sehr seltene oder noch gar nie eingetretene Risikosituation eher fehlerhaft beurteilt, als solche die mehr oder weniger regelmässig in unterschiedlichsten Ausprägungen auftreten.

### 8 Kosten

Aufgrund des Projektierungsstandes kann eine Grobkostenschätzung vorgenommen werden. Die Preise (exkl. Mwst) basieren auf Erfahrungswerten aus ähnlichen Bauten im Hochgebirge. Grössere Unsicherheiten bestehen bei den Kosten der Untertagebauten und der Verankerungen, da noch

keine detaillierten geologischen Untersuchungen vorliegen. Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Die Kosten für Bewilligungen, Entschädigungen, Versicherungen und Öffentlichkeitsarbeit werden mit 3% der Baukosten berücksichtigt.
- Die Installationspauschale wird mit 15% des baulichen Teils angenommen.
- Die Honorare für Ingenieure und Spezialisten sind mit 15% (und zusätzlich die Umweltbaubegleitung mit 1%) der Baukosten veranschlagt.
- Für die ökologischen Ausgleichsmassnahmen werden 10% der Kosten der Bauten angenommen.
- Unvorhergesehenes und nicht erfasste Positionen werden mit 15% des baulichen Teils und der Ausrüstung angenommen.
- Die Kapitalkosten werden mit 1% der Gesamtsumme berücksichtigt.

Die Genauigkeit der Grobkostenschätzung beträgt ± 30%.

Die Erstellungskosten belaufen sich auf rund 156 Mio. CHF (Tabelle 7 und Anhang G.1).

Tabelle 7: Übersicht über die Erstellungskosten

| Pos. | Bezeichnung                          | Kosten (CHF) | Anteil (%) |
|------|--------------------------------------|--------------|------------|
| 1    | Vorarbeiten                          | 26'341'000   | 17%        |
| 2    | Baulicher Teil                       | 64'190'000   | 41%        |
| 3    | Seiltechnik                          | 22'560'000   | 14%        |
| 4    | Beschneiungstechnik                  | 5'352'000    | 3%         |
| 5    | Umgebungskosten                      | 6'419'000    | 4%         |
| 6    | Allgemeine Kosten                    | 13'744'000   | 9%         |
| 7    | Unvorhergesehenes                    | 17'766'000   | 11%        |
|      | Total Erstellungskosten (exkl. Mwst) | 156'372'000  | 100%       |

# 9 Terminplanung

Die Gesamtbauzeit beträgt ca. 7 Jahre (Abbildung 36 Anhang F.1). Der kritische Weg ist durch den Erschliessungsstollen, die Stollen für die Leitungen und die Gewichtsmauer definiert.

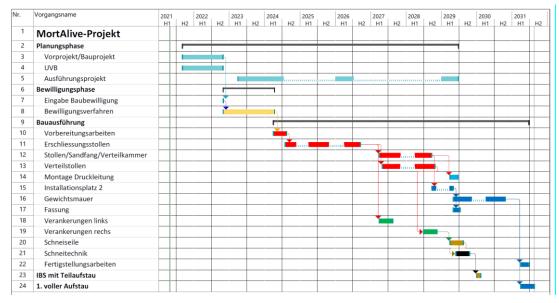
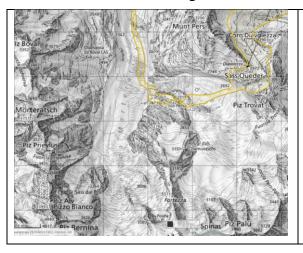


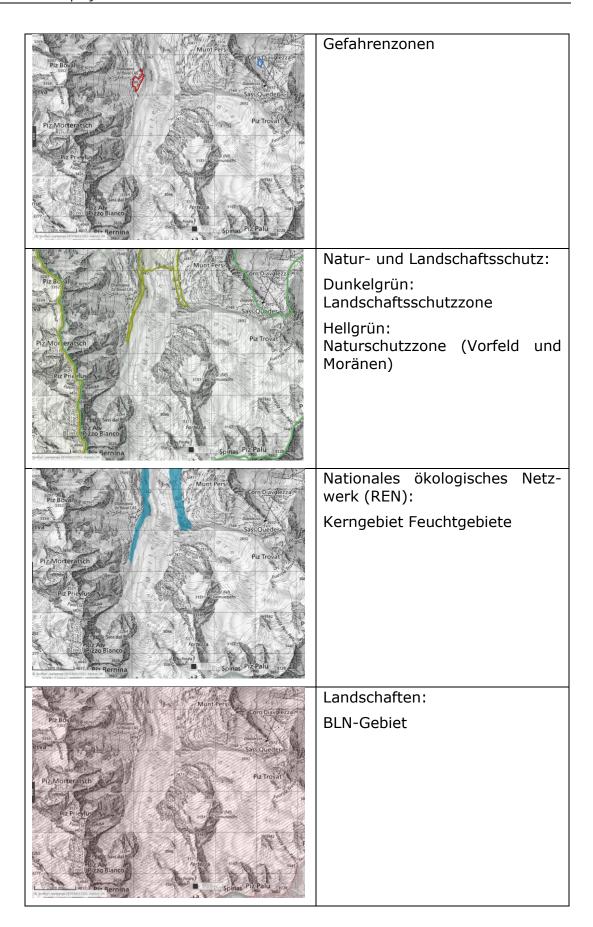
Abbildung 36: Entwurf Bauablauf und -programm.

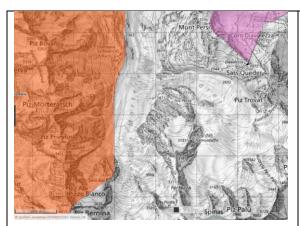
# 10 Rechtliche Grundlagen

Der Bereich der geplanten Anlage befindet ausserhalb der Bauzone in unerschlossenem Gelände, in einer bisher praktisch unberührten Hochgebirgslandschaft und komplett innerhalb des BLN-Gebiets Nr. 1908 «Oberengadiner Seenlandschaft und Berninagruppe» sowie innerhalb der Landschaftsschutzzone. Die ganze orographisch linke Talseite liegt im Wildtierschutzgebiet sowie in der Wildruhezone. Die Moräne auf der orographisch linken Seite zählt zur Naturschutzzone und ist im Aueninventar von nationaler Bedeutung enthalten.



Tourismus und Freizeit: Wintersportzone





Wild:

Orange: Wildschutzgebiet



Gewässerschutz:

Blau: Gewässerschutzzonen Roter Punkt: Gefasste Quelle Rotes Rechteck: See- oder Flusswasserfassung

## 10.1 BLN

Gemäss BAFU umfasst das Bundensinventar der Landschaften und Naturdenkmäler (BLN) die wertvollsten Landschaften der Schweiz. Diese sollen in ihrer landschaftlichen Vielfalt erhalten und ihre charakteristischen Eigenschaften sollen bewahrt werden.

Dabei wird die Berninagruppe als grossräumige Erholungslandschaft erwähnt, die als solche zum Wohlbefinden und zur Gesundheit der Menschen beiträgt. Auch die Identitätsbildung wird erwähnt.

In der Begründung des BLN-Gebietes steht unter Punkt 1.4: «Stark vergletscherte, weitgehend unberührte Hochgebirgslandschaft...».

Zu den Schutzzielen sind die folgenden Punkte zu erwähnen:

Punkt 3.3: «Die Hochgebirgslandschaft in ihrer Natürlichkeit und weitgehenden Unberührtheit erhalten»

Punkt 3.4: «Die Gebirgstäler mit ihren Talgletschern und von Bächen durchflossenen Gletschervorfelder in ihrer Natürlichkeit und natürlichen Dynamik erhalten»

Punkt 3.16: «Die Ruhe und Abgeschiedenheit im Hochgebirge und in den Seitentälern erhalten».

Im Natur- und Heimatschutzgesetz (NHG) wird in Art. 6 auf die Bedeutung des Inventars eingegangen:

- «1 Durch die Aufnahme eines Objektes von nationaler Bedeutung in ein Inventar des Bundes wird dargetan, dass es in besonderem Masse die ungeschmälerte Erhaltung, jedenfalls aber unter Einbezug von Wiederherstellungs- oder angemessenen Ersatzmassnahmen die grösstmögliche Schonung verdient.
- 2 Ein Abweichen von der ungeschmälerten Erhaltung im Sinne der Inventare darf bei Erfüllung einer Bundesaufgabe nur in Erwägung gezogen werden, wenn ihr bestimmte gleich- oder höherwertige Interessen von ebenfalls nationaler Bedeutung entgegenstehen.»

Die Verordnung über das Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler hält unter Art. 5 folgende Grundsätze fest:

- «1 Die Objekte müssen in ihrer natur- und kulturlandschaftlichen Eigenart und mit ihren prägenden Elementen ungeschmälert erhalten bleiben.
- 2 Bei der Festlegung der objektspezifischen Schutzziele sind insbesondere zu berücksichtigen:
- b. die natürliche Dynamik der Landschaft, namentlich der Gewässer;
- d. die Unberührtheit der Objekte und die Ruhe in den Objekten, soweit sie eine spezifische Eigenart darstellen;»
- Art. 6 NHG regelt Eingriffe bei Erfüllung von Bundesaufgaben:
- «1 Eingriffe, die keine Auswirkungen auf die Erreichung der objektspezifischen Schutzziele haben, stellen keine Beeinträchtigung der Objekte dar und sind zulässig. Ebenfalls zulässig sind geringfügige Beeinträchtigungen eines Objektes, wenn sie sich durch ein Interesse rechtfertigen lassen, das gewichtiger ist als das Interesse am Schutz des Objektes.
- 2 Schwerwiegende Beeinträchtigungen eines Objektes im Sinne von Artikel 6 Absatz 2 NHG sind nur zulässig, wenn sie sich durch ein Interesse von nationaler Bedeutung rechtfertigen lassen, das gewichtiger ist als das Interesse am Schutz des Objektes.
- 4 Erweist sich eine Beeinträchtigung aufgrund der Interessenabwägung als zulässig, so hat der Verursacher oder die Verursacherin im Hinblick auf das Gebot der grösstmöglichen Schonung für besondere Massnahmen zum bestmöglichen Schutz des Objektes, für Wiederherstellung oder ansonsten für angemessenen Ersatz, wenn möglich im gleichen Objekt, zu sorgen.»

Die Gesetzesartikel lassen einige Fragezeichen bezüglich der Interpretation zurück. So lässt sich darüber diskutieren, wie ein leichter Eingriff definiert wird, ab wann ein Interesse gewichtiger ist als das Interesse am Schutz des Objektes, welche Interessen solche von nationaler Bedeutung sind und was unter Bundesaufgaben verstanden wird. Mit diesen Fragen haben sich (Tschannen, et al., 2012) befasst.

Die beiden Autoren bezeichnen einen Eingriff als sogenannt leichter Eingriff, falls von der ungeschmälerten Erhaltung des Schutzzieles nicht abgewichen werden muss. Als Beispiel nennen sie die Wasserentnahme eines Kleinkraftwerkes während den Sommermonaten. Somit können leichte Eingriffe durch ein öffentliches Interesse, das nicht zwingend von nationaler Bedeutung sein muss, gerechtfertigt werden. Aber auch hier muss das Interesse ein erhebliches Gewicht haben und muss grösser sein als das

Interesse an der Erhaltung des geschützten Objektes. In jedem Fall muss auch auf eine grösstmögliche Schonung geachtet werden. Im Einzelfall muss ein Gutachten eingeholt werden, welches über die Schwere des Eingriffs entscheidet (gemäss Art. 7 Abs. 2 NHG).

In einem konkreten Fall wurde die ausreichende Wasserversorgung der Stadt Bern als Interesse von nationaler Bedeutung anerkannt und höher gewichtet als die Erhaltung einer relativ geringen Waldfläche.

(Tschannen, et al., 2012) definieren folgende Kriterien als geeignet zur Bestimmung der «nationalen Bedeutung»:

- Gewährleistung elementarer Infrastrukturnetze
- Gewährleistung elementarer Versorgungs- und Entsorgungsanlagen
- Gewährleistung elementarer Sicherheit (Landesverteidigung, Schutz vor Naturgefahren)
- Sicherstellung einer ausreichenden Versorgung mit elektrischer Energie (heisst aber nicht, dass ein Einzelvorhaben die nationale Bedeutung erfüllt).
- Standortgebundenheit innerhalb des BLN-Gebiets, keine Alternativstandorte ausserhalb des BLN-Gebiets möglich

Man kann nun argumentieren, dass die geplanten Eingriffe ein Interesse von nicht nur nationaler, sondern sogar globaler Bedeutung verfolgen, nämlich der Erhalt der Gletscher als Süsswasserspeicher, und dass die Eingriffe sogar ein Schutzziel des BLN-Gebiets unterstützen, nämlich der ungeschmälerte Erhalt der Objekte in ihrer natur- und kulturlandschaftlichen Eigenart und mit ihren prägenden Elementen, im konkreten Fall des Morteratschgletschers als zentrales Landschaftselement.

Abschliessend wird darüber wohl ein Gutachten entscheiden müssen.

### 10.2 Wildtierschutzgebiet

Im Wildtierschutzgebiet dürfen nur markierte Routen oder die in der Karte eingezeichneten erlaubten Routen begangen werden. Im Gegensatz zur Wildruhezone gelten diese Regeln im Wildtierschutzgebiet ganzjährig.

Dies betrifft auf der orographisch linken Talseite die Installationsarbeiten für die Seile und eventuell auch regelmässige Wartungsarbeiten.

### 10.3 Bundesgesetz über die Raumplanung

Das Bundesgesetz über die Raumplanung regelt das Erstellen von nichtzonenkonformen Neubauten. Dazu gehören sämtliche Bauten und Anlagen ausserhalb der Bauzone. Solche sind nur dann zulässig, wenn ihr Zweck einen Standort ausserhalb der Bauzonen erfordert (Standortgebundenheit), und wenn keine überwiegenden Interessen wie beispielsweise Natur- oder Landschaftsschutz entgegenstehen (Art. 24).

Gemäss Art. 22 Abs. 2 sind die Voraussetzungen für eine Bewilligung, dass die Bauten und Anlagen dem Zweck der Nutzungszone entsprechen und dass das Land erschlossen ist.

Für das Projekt MortAlive ist sicher die fehlende und äusserst schwierige Erschliessung ein Problem. Gemäss Art. 24 sind keine Ausnahmen erwähnt, falls die Erschliessung fehlt.

# 10.4 Bewilligungsverfahren (UVB/Termine/Baubewilligungen)

Da die Anlage ausserhalb der Bauzone geplant ist, wird neben der kommunalen auch eine kantonale Bewilligung (BaB-Bewilligung) benötigt. Diese ist auf dem kommunalen Bauamt einzureichen und wird von dort, mit einem Empfehlungsschreiben der Gemeinde, der kantonalen Behörde (Amt für Raumentwicklung ARE) weitergeleitet. Die kantonale Fachstelle kann über die Gemeinde um eine vorläufige Beurteilung ersucht werden.

Für grössere Bauvorhaben und insbesondere solche an Orten mit besonderer Bedeutung für das Landschaftsbild kann ein Modell oder eine vergleichbare Visualisierung verlangt werden.

Nach Eingang der erforderlichen Gesuchsunterlagen und Abschluss einer vorläufigen Prüfung legt die kommunale Baubehörde das Gesuch mit dem UVB öffentlich für 20 Tage auf und gibt die Publikation gleichzeitig auch im Kantonsamtsblatt bekannt. Während der Publikationszeit sind Einsprachen durch Privatpersonen oder Umweltschutzorganisationen möglich.

Gemäss der kantonalen Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung erfordert eine Beschneiungsanlage ein Verfahren zur Genehmigung der Grundordnung (Verfahren gemäss Art. 49 KRG).

Die Schneiseile gelten gemäss Art. 41 LFG und Art. 63 VIL als Luftfahrthindernis und dürfen laut Art. 64 VIL einer Bewilligung des Bundesamts für Zivilluftfahrt (BAZL).

Weiter muss beim Bundesamt für Verkehr (BAV) eine Genehmigung für den Betrieb einer Wartungsseilbahn eingeholt werden.

Für den Bau als auch für den Betrieb der Anlage sind folgende koordinierte Zusatzbewilligungen notwendig (Liste der zu koordinierenden Zusatzbewilligungen unter https://www.gr.ch/DE/publikationen/Verwaltungsverordnungen:

| Rechtsbereich                         | Zusatzbewilligung  | Rechtsgrundlage  | Zuständig-<br>keit | Bemerkung                                  |
|---------------------------------------|--|--|--------------------|--|
| Gewässerschutz-<br>gesetzgebung<br>A1 | Bewilligung für das<br>Einleiten<br>oder Versickern-<br>lassen von behan-<br>deltem ver-<br>schmutztem Ab-<br>wasser         | Art. 7 Abs. 1<br>GSchG Art. 7 Abs.<br>1 lit. a KGSchV                                    | ANU                | Bauphase: Bohrungen mit Bohr-<br>schlämmen |
| Gewässerschutz-<br>gesetzgebung<br>A5 | Bewilligung für<br>Bauvorhaben in<br>besonders gefähr-<br>deten Bereichen,<br>wenn sie die Ge-<br>wässer gefährden<br>können | Art. 19 Abs. 2<br>GSchG Art. 32<br>Abs. 2 GSchV Art.<br>7 Abs. 1 lit. d<br>KGSchV        | ANU                | Bauphase: Bauma-<br>schinen vor Ort        |
| Gewässerschutz-<br>gesetzgebung<br>A7 | Bewilligung von<br>Umschlagplätzen<br>für wassergefähr-<br>dende Flüssigkei-<br>ten  | Art. 19 Abs. 2<br>GSchG Art. 32<br>Abs. 2 lit. j GSchV<br>Art. 7 Abs. 1 lit. d<br>KGSchV | ANU                | Bauphase: Bauma-<br>schinen vor Ort        |

| Gewässerschutz-<br>gesetzgebung<br>A8              | Bewilligung für Be-<br>triebsanlagen und<br>Kreisläufen mit<br>wassergefährden-<br>den Flüssigkeiten     | Art. 28 KGSchG<br>Art. 7 Abs. 1 lit. h<br>KGSchV  | ANU   | Evt. Für den Betrieb<br>der Anlage |
|--|--|---|---|------------------------------------|
| Gewässerschutz-<br>gesetzgebung<br>A9              | Bewilligung für<br>Wasserentnahmen   | Art. 29 GSchG Art.<br>5 Abs. 1 lit. a<br>KGSchV bzw. Art.<br>6 Abs. 1 lit. b<br>KGSchV                | Regierung<br>bzw. EKUD  | Bohrung und Stau-<br>see           |
| Natur-und Hei-<br>matschutzgesetz-<br>gebung<br>C6 | Bewilligung (Zu-<br>stimmung) für Ein-<br>griffe in kantonal<br>oder eidgenössisch<br>geschützte Objekte | Art. 29 KNHG Art.<br>7 Abs. 1 lit. b NHV<br>Art. 2 Abs. 3<br>KNHG i.V.m. Art. 1<br>Abs. 2 lit. b KNHV | AfK   |                                    |
| Rohrleitungsge-<br>setzgebung<br>D1                | Bewilligung für den<br>Bau von Rohrlei-<br>tungsanlagen  | Art. 42 Abs. 1 RLG<br>RB 1679 vom 29.<br>06.1987  | ANU   |                                    |
| H1   | Brandschutzbewil-<br>ligung  | Art. 7 Abs. 1 lit. a-<br>e BSG Art. 8 Abs.<br>1 lit. a-e BSG Art.<br>10 BSG                           | Brand-<br>schutzor-<br>gan Ge-<br>meinde  | Falls es Elektroan-<br>lagen gibt  |
| H2   | Brandschutzbewil-<br>ligung  | Art. 7 Abs. 1 lit. a-<br>e BSG Art. 9 BSG   | GVG   | Falls es Elektroan-<br>lagen gibt  |
| J1   | Seilbahnrechtliche<br>Baubewilligung<br>Seilbahnrechtliche<br>Betriebsbewilli-<br>gung                   | Art. 3 Abs. 2 SebG<br>Art. 4 SebV Art. 3<br>Konkordat Art. 5<br>Konkordat                             | DVS (sofern<br>im Zusam-<br>menhang<br>mit BAB:<br>ARE Ge-<br>samtent-<br>scheid) |                                    |

Liste von Bewilligungen, die keiner spezifischen Koordination bedürfen:

4. Subventionsrechtliche Projektgenehmigung der Regierung für Pilot- und Demonstrationsanlagen (EnG)

# 11 Gesellschaftliche und Politische Aspekte

Der Klimaschutz hat heute in vielen Staaten hohe bis sehr hohe Priorität sowohl in Gesellschaftsdiskussionen wie auch in der Politik erhalten. Neben zahlreichen gut erkennbaren Naturphänomena und wissenschaftlichen Diskussionen leistet hierzu der Gletscherrückzug einen im wahrsten Sinne des Wortes einen unübersehbaren Beitrag. Insbesondere jüngere Leute sind besonders motiviert, sich in diversen Formen für eine gute Klima Zukunft zu engagieren. Aufgrund ihrer landschaftlichen Schönheit treten im Zusammenhang mit Gletschern auch relativ schnell positiv besetzte Emotionen auf. Dieser Umstand dürfte auch dafür verantwortlich sein, dass das MortAlive-Projekt bei unzähligen Vorträgen wie auch in den Medien stark beachtet wird. So wird die Frage, ob wir unsere Gletscher als Süsswasserspeicher für kommende Generationen erhalten sollen, dürfen oder müssen hoffentlich zu heftigen politischen und gesellschaftlichen Diskussionen führen. Dies führt vermutlich zum Abwägen zwischen Landschaftseingriff, Technologieeinsatz, Kosten und erwartetem Nutzen. Auf jeden Fall wird diese Diskussion aufzeigen, in welch grosser Abhängigkeit unsere

heutige Gesellschaft sowohl von den natürlichen als auch den menschgemachten Klimaveränderungen ist und dass es sich in diesem Fall lohnt, die Perspektive der zukünftigen Generationen im Auge zu behalten. Schade wäre hingegen, wenn aufgrund der technischen Machbarkeit von Gletscherschutzmassnahmen, die Notwendigkeit von Klimaschutz von der Gesellschaft und/oder Politik in den Hintergrund rücken würde, denn dies wäre sehr kontraproduktiv, da der von uns vorgeschlagene Gletscherschutz würde bei einem ungebremsten Klimawandel nicht wirken würde.

# 12 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Nach Durchführung der vorliegenden Studie gelangen wir zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Erstmals nach der Veröffentlichung der ersten glaziologischen Publikation über die MortAlive-Idee (Oerlemans, et al., 2017) liegt nun eine Vorstudie vor, welche die wichtigsten zu bewältigenden Herausforderungen für den Bau einer Anlage für den aktiven Schutz von Gletschermassen als Süsswasserspeicher für kommende Generationen mit Hilfe von künstlichem Schnee aufzeigt.
- 2. Die MortAlive-Studie zeigt, dass unter der Voraussetzung der erfolgreichen Entwicklung der Schneiseiltechnologie in einem laufenden Innosuisseprojekt der Erhalt von gefrorenen Süsswasserspeichern aus technischer Sicht als möglich bezeichnet werden kann. Dabei ist der Ausgewogenheit zwischen Einsatz von Technologie, Umwelteingriff und natürlichen Grenzen unbedingt Beachtung zu schenken.
- 3. Klimaveränderungen können sich stark auf den Nutzen einer Gletscherschutzanlage (Sicherung Wasserversorgung/Bewässerung) auswirken und müssen bei der Planung berücksichtigt werden. Das in dieser Vorstudie untersuchte Projekt leistet aus heutiger Sicht für das Oberengadin keinen Beitrag weder zur Sicherung der Wasserversorgung noch zur Bewässerung. Mittels Projektanpassungen (z.B. Standortverlegungen/Flexibilität der Ausrüstung der Schneiseile) können Klimaeffekte teilweise antizipiert werden.
- 4. Eine weitere wichtige Erkenntnis aus der Risikoanalyse besteht darin, dass für viele heute stark vom Gletscherschmelzwasser abhängige Siedlungen aufgrund der klar definierten Klimabedingungen, die für einen aktiven Gletscherschutz erfüllt sein müssen, zeitnahes Handeln entscheidend ist und der Klimawandel dessen Nutzen relativ rasch in Frage stellen kann.

Für das weitere Vorgehen gelangen wir zu folgenden Empfehlungen:

1. Die vorliegende Studie zeigt auch auf, welche technischen und baulichen Fragen noch gelöst werden müssen. Wir empfehlen deshalb, diese Punkte systematisch weiter zu verfolgen, damit sich das Pilotprojekt «MortAlive» zu einem international anerkannten Modellfall entwickeln kann.

- 2. Wir erachten es als wichtig, die Ergebnisse dieser Studie mit Entscheidungsträgern, Umweltorganisationen und interessierten Gruppen und Personen transparent und kritisch zu diskutieren und zu hinterfragen, denn dies bildet die Voraussetzung für ein gemeinsames Vorgehen.
- 3. Obwohl nun mit der Stiftung Cover Project Fundation (<a href="www.cover-projectfoundation.ch">www.cover-projectfoundation.ch</a>) eine Organisation besteht, die sich um die Finanzierung von Gletscherschutzprojekten kümmert, sind Projekte von der Grössenordnung und Projektdauer wie MortAlive nur im gemeinschaftlichen Rahmen möglich. Es sollte deshalb das Gespräch mit nationalen und internationalen Partnern hinsichtlich der Finanzierung und Weiterentwicklung gesucht werden.

Frei nach Steven Covey ist es im Umgang mit dem weltweit anerkannten Klimaproblem wichtig, neben der sorgfältigen Durchführung von Beobachtungen und Identifikation von Problemen, auch Lösungen zu entwickeln. Gletscherschutz kann für heute betroffene Menschen einen existenziellen Lösungsbeitrag leisten, der uns hoffentlich motiviert auch bei der Ursachenbekämpfung lösungsorientiert vorzugehen, denn diese benötigt einen deutlich grösseren Zeithorizont.

Samedan, den 30. Juni 2021

Academia Engiadina

Dr. sc. nat. ETH Felix Keller (Institutsleiter)

#### Sachbearbeiter:

Dr. sc. techn. Dipl. Bauingenieur ETH Dieter Müller,

Dr. sc. nat. ETH Felix Keller (Glaziologe),

Dr. sc. nat. Christine Levy (Geographin),

Christine Seupel (Geophysikerin/Geoinformatikerin)

### 13 Literaturverzeichnis

**Alean, J. 1984.** Untersuchungen über Entstehungsbedingungen und Reichweiten von Eislawinen. s.l.: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 1984.

**Bearth, Heierli und Roesli. 1987.** Geologischer Atlas der Schweiz. Blatt 1237: Albulapass. 1987.

**CH2018. 2018.** *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate.* 2018. S. 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0.

**Evans, S.G. und Clague, J.J. 1994.** Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments. *Geomorphology*. 10, 1994.

**GLAMOS. 1881-2020.** The Swiss Glaciers 1880-2018/19. s.l.: published since 1964 by VAW/ETH Zurich, 1881-2020. Glaciological Reports No 1-140, Yearboos of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences (SCNAT).

**Grab, M, et al. 2021.** Ice thickness distribution of the Swiss glaciers from helicopter-borne ground-penetrating radar and glaciological modeling. *Journal of Glaciology* 1-19. 2021, https://doi.org/10.1017/jog.2021.55.

**Haeberli, W. 1973.** Die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie.* 1973, 9(1-2).

**Harvey, S., Rhyner, H. und Schweizer, J. 2013.** *Lawinenkunde.* s.l.: Bruckmann, 2013.

**Hubacher, R. M. 2007.** Masterarbeit. - RHydrological Analyses and Model-ling in the glacierized Tarfala catchment, northern Sweden with em-phasis on the melt season 2005 and 2006. 2007.

**Hürlimann, M. 1994.** *Potentielle Murganganrisszonen in der periglazialen Stufe im Oberengadin.* ETH Zürich : s.n., 1994.

**Huss, M. and Usselmann, S. and Farinotti, D. and Bauder, A. 2010.** Glacier mass balance in the south-eastern Swiss Alps since 1900 and perspectives for the future. *Erdkunde.* 2010, S. 119 - 140.

**Innosuisse/FHGR. 2019-2022.** *Bodenunabhängiges Beschneiungssystem.* 2019-2022.

**Keller, F. 1998.** Glaziologische Karte Julier-Bernina. *Synthesekarte NFP31.* s.l.: vdf, 1998.

**Klok, E. J. (Lisette) und Oerlemans, Johannes. 2004.** Modelled climate sensitivity of the mass balance of Morteratschgletscher and its dependence on albedo parameterization. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society.* 2004.

**Koch, R. 2003.** Geomorphologische Kartierung im Berninagebiet sowie GIS-basierte Darstellung und Analyse der Geomorphologie im Gebiet Oberengadin. Geographisches Institut, Universität Zürich: s.n., 2003.

Labhart, T. 1995. Geologie der Schweiz. Thun: Ott Verlag, 1995.

**Oerlemans, J. 2019.** The Mortalive Weather Station: Analysis of data 30 June 2016 - 11 September 2019. 2019.

**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.* 2017.

**Patterson, A. 2003.** GIS-basierte Analyse von Murgängen im Gebiet Oberengadin. Geographisches Institut Universität Zürich: s.n., 2003.

**Pritchard, Hamish D. 2019.** Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress. *Nature.* 2019, Bd. 569, 7758, S. 649-654.

**Rothenbühler, C. 2006.** GISALP - Räumlich-zeitliche Modellierung der klimasensitiven Hochgebirgslandschaft des Oberengadins. 2006.

**Sauter, T., A. Arndt, and C. Schneider. 2020.** Sauter, Tobias, Anselm Arndt, COSIPY v1. 3-an open-source coupled snowpack and ice surface energy and mass balance model. *Geoscientific Model Development.* 2020, S. 5645-5662.

**Spillmann, P. 1993.** Die Geologie des penninisch-ostalpinen Grenzbereichs im südlichen Berninagebirge. 1993.

**Spillmann, P. und Trommsdorff, V. 2007.** 1277 Piz Bernina Erläuterungen. *Geologischer Atlas der Schweiz, Atlasblatt 119.* s.l.: Bundesamt für Landestopographie swisstopo, 2007.

**swisstopo, Bundesamt für Landestopografie. 2021.** https://map.geo.admin.ch/. [Online] 12. 03 2021. https://map.geo.admin.ch/.

**Tschannen, P. und Mösching, F. 2012.** *Nationale Bedeutung von Aufgaben-und Eingriffsinteressen im Sinne von Art. 6 Abs. 2 NHG.* Universität Bern: s.n., 2012.

**Van der Veen, C. J. 2013.** Fundamentals of glacier dynamics. s.l.: CRC press, 2013, S. 403.

**Veenhoven, J. 2021.** Efffects of artificial snow cover on the mass balance of the Morteratsch glacier (Bachelor Thesis). Netherland: University Utrecht, 2021.

**Zekollari, H. and Fürst, J. Jakob and Huybrechts, Ph. 2014.** Modelling the evolution of Vadret da Morteratsch, Switzerland, since the Little Ice Age and into the future. *Journal of Glaciology.* 2014, S. 1155-1168.

**Zimmermann, M. 1990.** Periglaziale Murgänge. *Schnee, Eis und Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre.* 108, 1990, Bde. Versuchanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.

**Zimmermann, M. und Haeberli, W. 1992.** Climatic change and debris flow activity in high-mountain areas - a case study in the Swiss Alps. *Greenhouse - impact on cold-climate ecosystems and landscapes.* Catena supplement, 1992.

**Zimmermann, M., et al. 1997.** Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz. s.l.: vdf, 1997.

## 14 Anhang

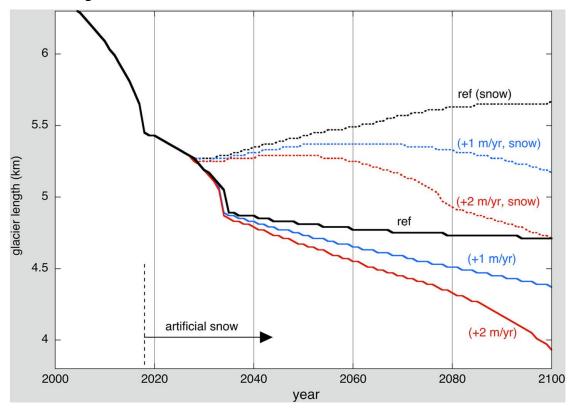
# **Anhang**

## Inhalt

| A.1 | Gletscherlängenänderungen und Klimaszenarien             | 1  |
|-----|--|----|
| B.1 | Abflussmessungen   | 2  |
| C.1 | Referenzmassenbilanz                                     | 4  |
| C.2 | Modellierung Abfluss                                     | 6  |
| D.1 | Vorbemessung Beschneiung: Modell FHNW                    | 9  |
| D.2 | Vorbemessung Beschneiung: Modell COSIPY                  | 17 |
| E.1 | Übersicht Baustellenerschliessungsmöglichkeiten          | 18 |
| E.2 | Übersicht der möglichen Anordnung der notwendigen Bauten | 19 |
| E.3 | Plan Schneiseil Nr. 8                                    | 20 |
| F.1 | Entwurf Planung-/Bauablauf und -programm                 | 21 |
| G.1 | Grobkostenschätzung                                      | 22 |

## A.1 Gletscherlängenänderungen und Klimaszenarien

Überblick über die Gletscherlängenänderung für die Klimawandelszenarien (i), (ii) und (iii) mit künstlichem Schnee (gestrichelte Linien) und ohne (durchgezogene Linien). Zahlen +1 und +2 m/yr stehen für den Anstieg der Gleichgewichtslinien

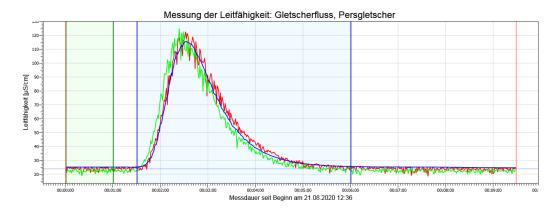


#### **B.1 Abflussmessungen**

Es wurde die Salzverdünnungsmethode genutzt, um die Menge des abfliessenden Schmelzwassers des Persgletschers an der Stelle des geplanten Speichersees zu bestimmen. Bei dieser Messmethode wird dem Fliessgewässer punktförmig eine bestimmte Menge Salz injiziert. Nach einer Fliessstrecke in deren Verlauf sich das Salz homogen mit dem Wasser durchmischen sollte, wird mittels Leitfähigkeitssonden die Gangkurve der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers bestimmt. Der Durchfluss wird aus diesen Daten mittels der Integrationsmethode bestimmt und mit folgender Formel berechnet:

$$Q = \frac{m}{k * A}$$

Dabei steht m für die eingegebene Menge des Salzes, k für den Kalibrierungsfaktor (welcher vor der Messung vor Ort bestimmt wird) und A für die Fläche unter der Leitfähigkeitskurve. Die untenstehende Abbildung zeigt die Leitfähigkeitskurven für eine Messung.



Leitfähigkeitskurven für Messung 7 am 21.08.2020 um 12:36. Die drei Farben stehen für die drei verschiedenen Sonden.

Das Wasser war mit ca. 0.3 °C sehr kalt, was das Auflösen des Salzes erschwert. Auf diesem Grund wurde das Salz in einer Tonne mit Wasser aus dem Fluss vermischt und erst danach in das Gewässer gegeben. Die Salzlösung wurde direkt unterhalb des Gletschertors injiziert und an den Messpunkten 1 (13.08.2020 und 21.08.2020) und 2 (02.09.2020) gemessen. Die Entfernung vom Gletschertor zu Messpunkt 1 beträgt ca. 150 m. Vor der Messung am 02.09.2020 ereigneten sich starke Niederschläge, welche den Wasserlauf veränderten. Diese Messungen wurden deshalb an Messpunkt 2 durchgeführt mit ca. 200 m Entfernung zur Eingabe der Salzlösung. Für die Messungen wurden jeweils drei Leitfähigkeitssonden verwendet, welche an beiden Seiten des Gerinnens positioniert wurden. Die folgende Tabelle zeigt die Werte aller Messungen. Die ersten Messungen (15.08.2020) wurden dazu genutzt, die Eingabemenge des Salzes zu bestimmen sowie die Standorte für die Injektion der Salzlösung also auch die der Leitfähigkeitssonden. Dabei sind die Abweichungen der Messwerte zwischen den einzelnen Sonden sehr hoch (bis zu 36 %), aus diesem Grund

## B Anhang < Abflussmessungen >

wurden diese Werte in der Interpretation nicht berücksichtigt. Für die Messungen am 21.08.2021 und 02.09.2021 sind die Abweichungen gering (2 % - 6 %) Diese geringen Unterschiede der Ergebnisse der einzelnen Sonden lässt auf eine gute Durchmischung von Salz und Wasser schliessen.

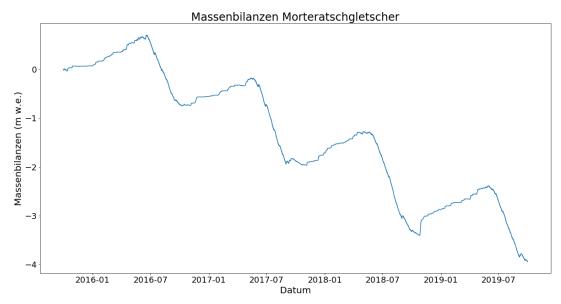
Ergebnisse der Abflussmessungen mit Werten, die an den jeweiligen Sonden gemessen wurden.

| Nr. | Datum    | Mess- | Salz | Abfluss | Abfluss | Abfluss | Mittel-             |
|-----|----------|-------|------|---------|---------|---------|---------------------|
|     | Zeit     | punkt | [kg] | [l/s]   | [l/s]   | [l/s]   | wert                |
|     |          |       |      | Sonde 1 | Sonde 2 | Sonde 3 | Abfluss             |
| 1   | 13.08.20 |       | 10   | 488     | 469     | 470     | [l/s]<br><i>476</i> |
|     | 13:11    |       | 10   | 400     | 403     | 470     | 470                 |
| 2   | 13.08.20 |       | 1    | 456     | 494     | 306     | 419                 |
|     | 13:38    |       |      |         |         |         |                     |
| 3   | 13.08.20 |       | 5    | 994     | 960     | 936     | 963                 |
|     | 13:40    |       |      |         |         |         |                     |
| 4   | 13.08.20 |       | 5    | 999     | 968     | 1445    | 1137                |
|     | 14:03    |       |      |         |         |         |                     |
| 5   | 13.08.20 |       | 9    | 735     | 1079    | 1505    | 1106                |
|     | 14:49    |       |      |         |         |         |                     |
| 6   | 21.08.20 | 1     | 3    | 836     | 810     | 857     | 834                 |
|     | 11:20    |       |      |         |         |         |                     |
| 7   | 21.08.20 | 1     | 3    | 736     | 753     | 816     | 768                 |
|     | 12:36    |       |      |         |         |         |                     |
| 8   | 02.09.20 | 2     | 3    | 512     | 503     | 522     | 512                 |
|     | 13:15    |       |      |         |         |         |                     |
|     | 13:15    |       |      |         |         |         |                     |

#### C.1 Referenzmassenbilanz

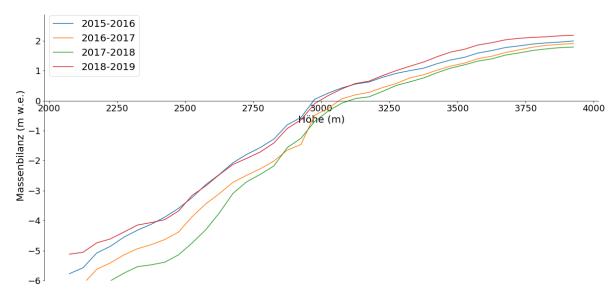
Das "open-source COupled Snowpack and Ice surface energy and mass balance model in Python" COSIPY von Sauter et al. wurde genutzt, um die Massenbilanz von Pers- und Morteratschgletscher zu modellieren (Sauter, 2020). Die meteorologischen Eingabedaten für das Modell wurden von den nahegelegenen Wetterstationen Samedan und Corvatsch bezogen, für die Berechnung des Niederschlags wurden auch Daten der Stationen Bernina-Curtinatsch und Pontresina verwendet. Es wurden die Massenbilanzen der beiden Gletscher für vier hydrologische Jahre modelliert (2015 – 2019), um den Abfluss der Persgletscher sowie die Änderungen der Massenbilanz des Morteratschgletschers mit Beschneiung zu berechnen. Das Modell wurde mit Hilfe der Daten der automatischen Wetterstation auf dem Morteratschgletscher evaluiert. Weiterhin wurden für die Evaluation die Höhe der Gleichgewichtslinie, sowie Rückschlüsse auf die Akkumulationsrate, die von einer Eiskernbohrung von Sodemann et al. im oberen Bereich der Akkumulationszone des Gletschers (3850 m) gezogen wurden, berücksichtigt (Sodemann, 2006). Ausserdem wurde die Modellierung mit Ergebnissen von früheren Studien wie (Klok & Oerlemans, 2004), (Van der Veen, 2013) und (Veenhoven, 2021) verglichen.

Die folgende Abbildung zeigt die kumulative Massenbilanz des Morteratschgletschers. Die durchschnittliche Nettomassenbilanz über diese vier Jahre liegt bei -0.99 m w.e./Jahr.



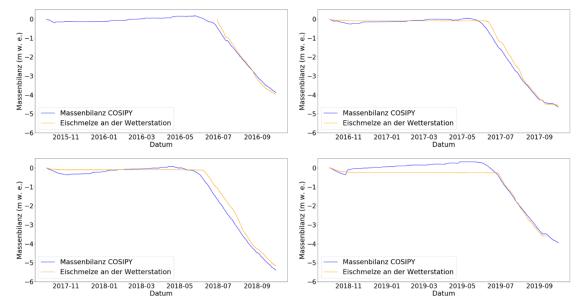
Kumulative Massenbilanz des Morteratschgletscher für vier hydrologische Jahre.

Gemäss der folgenden Abbildung mit den Massenbilanzprofilen für den Morteratschgletscher liegen die Gleichgewichtslinien der vier betrachteten Jahre auf ca. 3000 m +/- 100 m.



Massenbilanzprofile des Morteratschgletschers für vier hydrologischen Jahre.

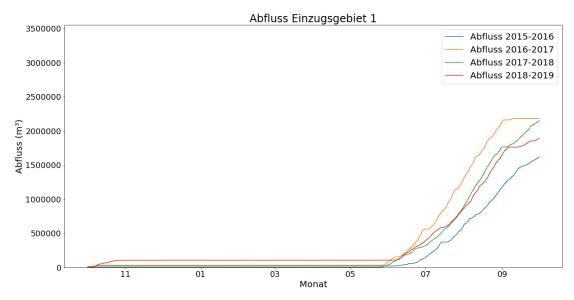
Die folgenden Abbildungen zeigen, dass das modellierte Abschmelzen der Referenzmassenbilanz sehr gut mit den gemessenen Werten an der automatischen Wetterstation übereinstimmt. Anschliessend wurde die Sensitivität des Modells auf Klimaänderungen (Temperatur und Niederschlag) getestet. Details zu den Eingabedaten, der Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse der Massenbilanz wurden im Innosuisseprojekt «Bodenunabhängiges Beschneiungssystem» näher betrachtet.



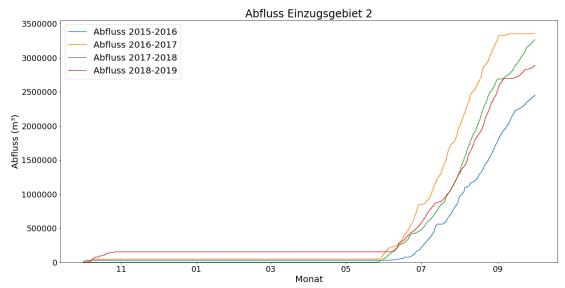
Mit COSIPY modellierte Massenbilanz (an der Lokation der Wetterstation) und gemessene Werte der Eisschmelze an der automatischen Wetterstation für vier Jahre.

#### **C.2 Modellierung Abfluss**

Die im Anhang C.1 beschriebene Massenbilanzmodellierung wurde genutzt, um den Abfluss des Persgletschers für vier hydrologische Jahre zu berechnen. Zu beachten ist, das mit COSIPY nur die eisbedeckten Flächen modelliert wurden. Die Ergebnisse des summierten Abflusses (Schmelzwasser und Regen) dieser Flächen für die Einzugsgebiete 1 und 2 sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Für das Einzugsgebiet 1 beträgt der durchschnittliche Abfluss ca. 2.0 Mio. m³ und für das Einzugsgebiet 2 ca. 3.2 Mio. m<sup>3</sup>. Der Abfluss der kompletten Einzugsgebiete wird um einiges grösser sein, da sich in den Einzugsgebieten auch unvergletscherte Flächen befinden (~46 % für Einzugsgebiet 1 und ~31 % für Einzugsgebiet 2). Aus der COSIPY Modellierung wurde der summierte durchschnittliche Jahresniederschlag dieser Flächen auf 1.1 Mio m<sup>3</sup> für die unvergletscherte Fläche von Einzugsgebiet 1 und 1.2 Mio m³ für Einzugsgebiet 2 abgeleitet. Vor allem im Frühsommer in der Zeit der Schneeschmelze wird der Eintrag aus dieser Fläche einen relevanten Beitrag zum gesamten Abfluss liefern. Die modellierten Niederschlagswerte sollten mit Vorsicht betrachtet werden, da wenig über den Niederschlagsgradienten in höheren Lagen bekannt ist. Es kann aber von einem starken Nord-Süd Niederschlagsgradienten im Berninagebiet ausgegangen werden (Oerlemans, Haag, & Keller, 2017).

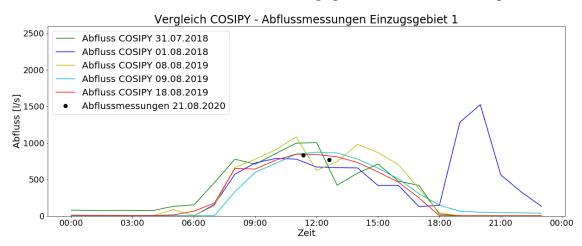


Mit COSIPY modellierter summierter Abfluss des vergletscherten Teils von Einzugsgebiet 1.

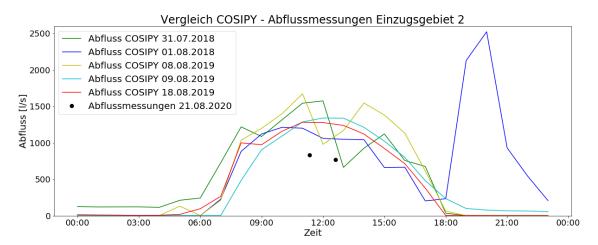


Mit COSIPY modellierter summierter Abfluss des vergletscherten Teils von Einzugsgebiet 2

Um die Ergebnisse der Modellierungen besser einschätzen zu können, wurden diese mit den Abflussmessungen verglichen. Bisher wurden noch keine COSIPY - Berechnungen für das Jahr 2020 durchgeführt, deshalb wurden aus den Jahren 2018 und 2019 Tage mit ähnlichem Wetter wie am 21.08.2021 (der Tag der Abflussmessungen) ausgewählt. Die modellierten Werte für das Einzugsgebiet 1 stimmen sehr gut mit den Messwerten überein, die modellierten Werte für das Einzugsgebiet 2 sind deutlich grösser.



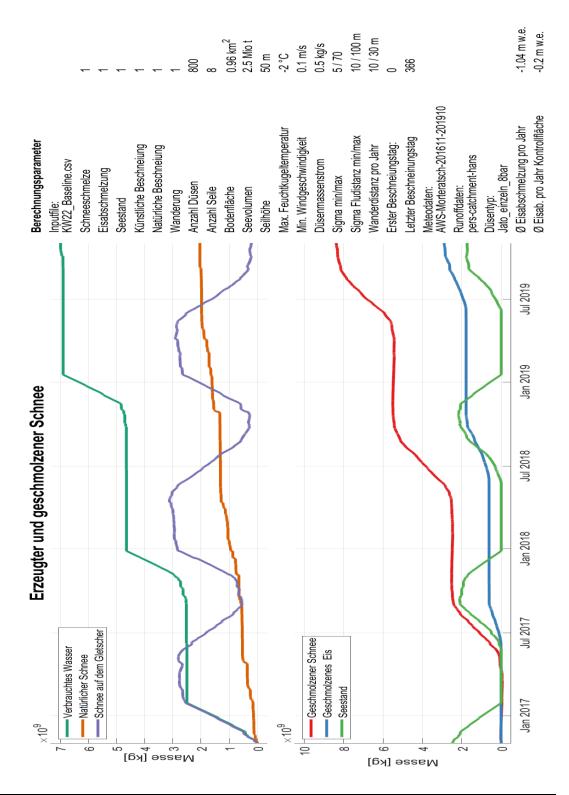
Gemessene Abflüsse am 21.08.2020 und modellierte Ergebnisse für das Einzugsgebiet 1 für fünf Tage mit ähnlichem Wetter

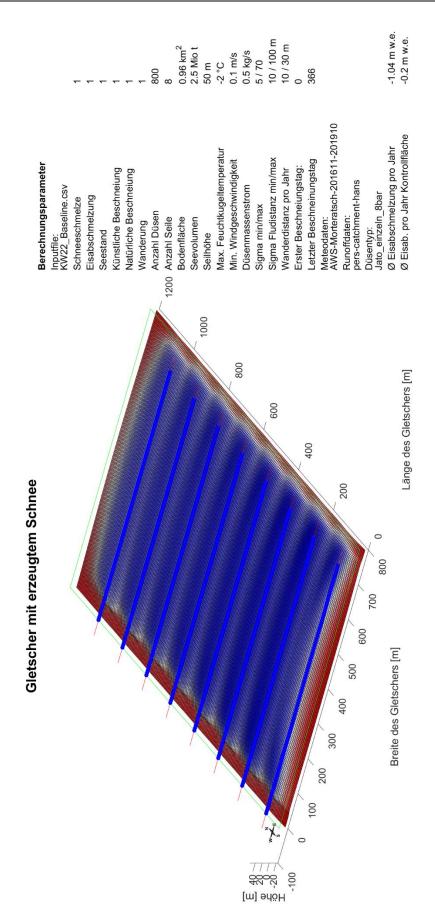


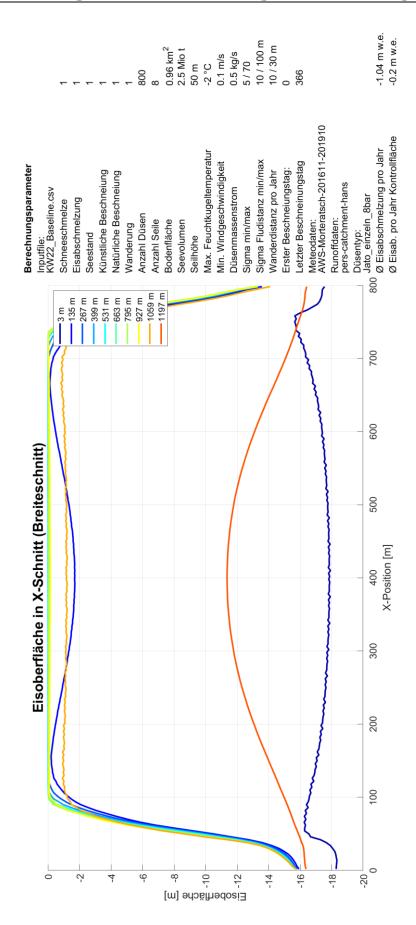
Gemessene Abflüsse am 21.08.2020 und modellierte Ergebnisse für das Einzugsgebiet 1 für fünf Tage mit ähnlichem Wetter

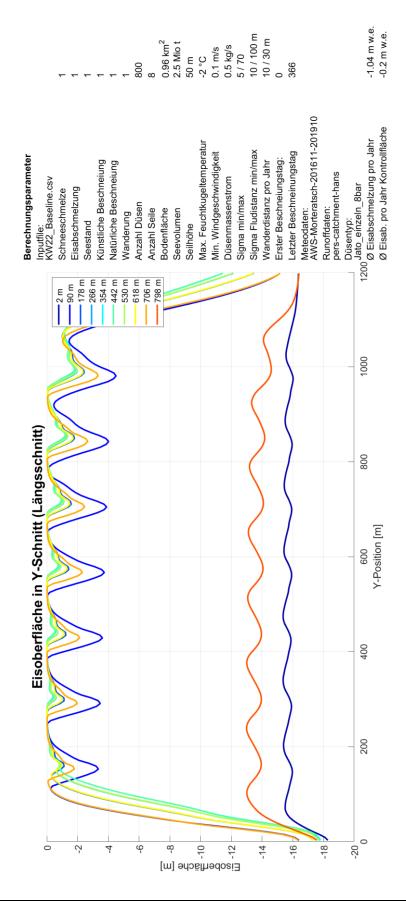
## **D.1 Vorbemessung Beschneiung: Modell FHNW**

Modellierung mit einem Nutzvolumen von  $2.5\ \text{Mio.}\ m^3\ \text{im}$  Speicher Pers



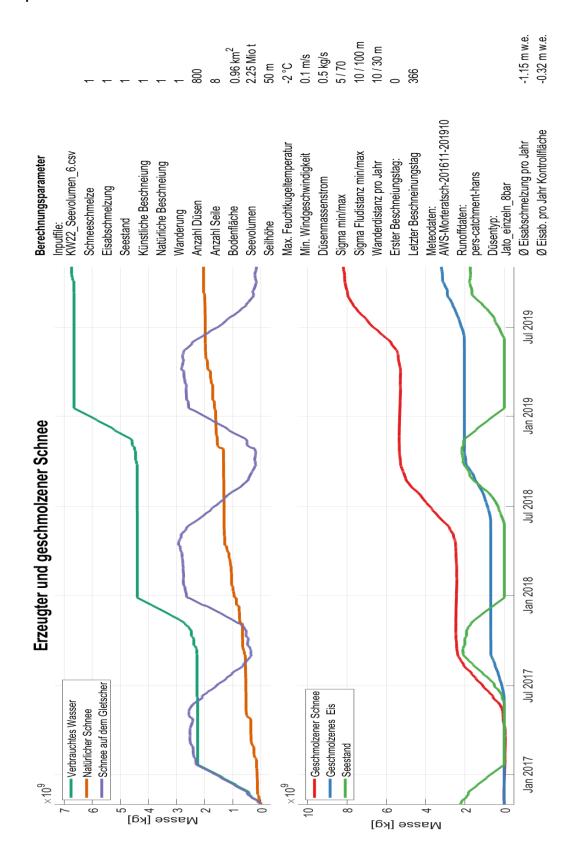


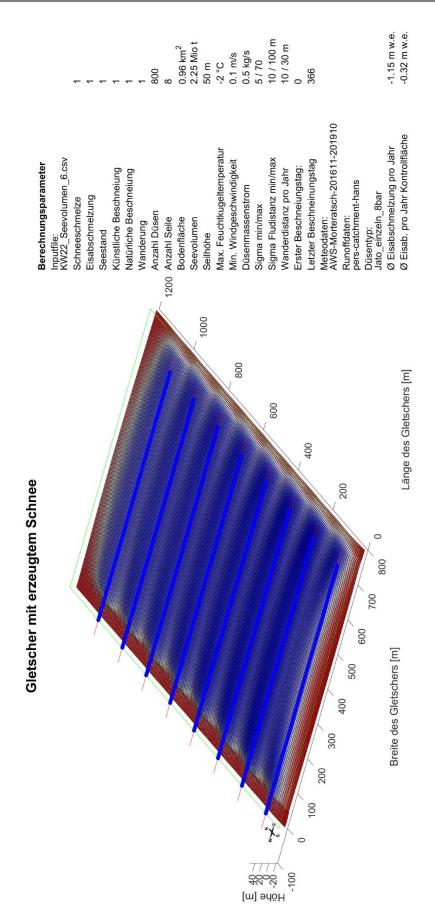


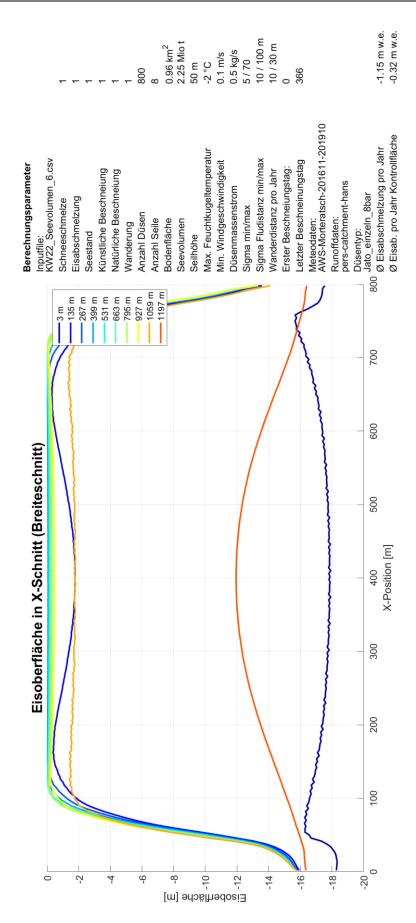


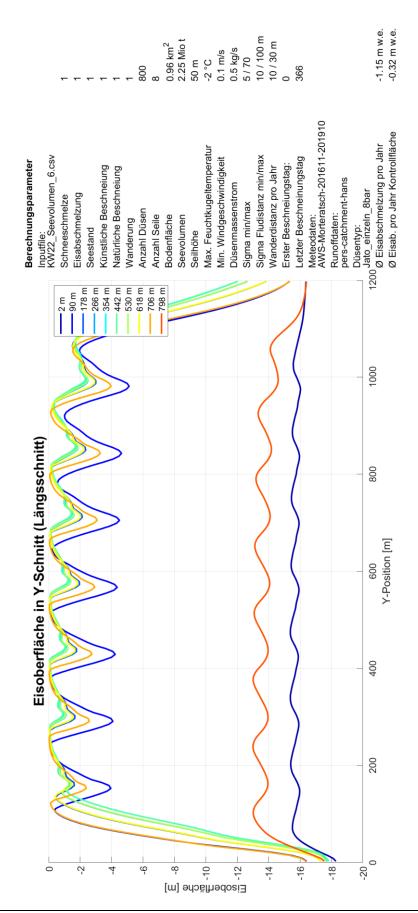
## D Anhang < Vorbemessung Beschneiung>

Modellierung mit einem Nutzvolumen von 2.25 Mio.  $m^3$  im Speicher Pers









#### **D.2 Vorbemessung Beschneiung: Modell COSIPY**

Es wurden Modellierungen für die Massenbilanz des Morteratschgletschers mit Beschneiung durchgeführt, um deren Änderung zu bestimmen und einen Vergleich mit dem Modell der FHNW zu ermöglichen. Die Modelle unterscheiden sich ihrer Implementierung, die Bedingungen zur Schneeproduktion wurden aber so gut wie möglich angeglichen. Die beschneite Fläche beträgt in beiden Modellen ca. 0.86 km<sup>2</sup>. Im COSIPY wird eine konstante Schneemenge von 1.67 kg/m<sup>2</sup>\*h auf den Gletscher addiert, wenn die Bedingungen für die Beschneiung erfüllt sind (Feuchtkugeltemperatur < -2 °C, Windgeschwindigkeit > 0.1 m/s). Der Wert der Schneemasse wurde mit Hilfe des Modells der FHNW bestimmt, welches zur Modellierung der Konfiguration der Beschneiungsanlage genutzt wurde. Es wurde die Massenbilanz jeweils mit einem verfügbaren Wasservolumen von 1.5 Mio. m<sup>3</sup> und 2.5 Mio. m<sup>3</sup> für die Beschneiung berechnet. Die Abbildung zeigt die Schneehöhen an der Lokation der Wetterstation für diese Szenarien. Die COSIPY Modellierungen zeigen, dass ein Wasservolumen von 1.5 Mio. m<sup>3</sup> nicht ausreicht, um den Gletscher das ganze Jahr über schneedeckt zu halten. Würde ein Wasservolumen von 2.5 Mio. m<sup>3</sup> zur Verfügung stehen, wäre eine durchgängige Schneeabdeckung grösstenteils möglich, mit Ausnahme des sehr warmen Sommers 2018. Wobei anzumerken ist, dass im September 2018 eine Schneeproduktion an ca. 26 Stunden möglich wäre, diese aber im Modell nicht mit beachtet wird, da das Wasservolumen nur jeweils zu Beginn des hydrologischen Jahres aufgefüllt wird.

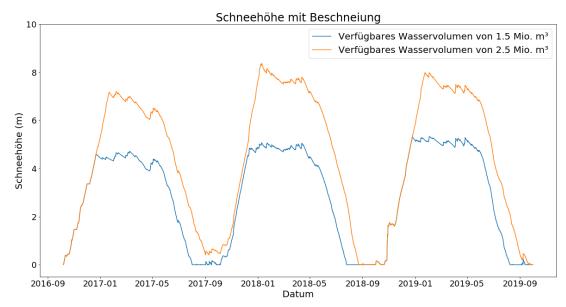
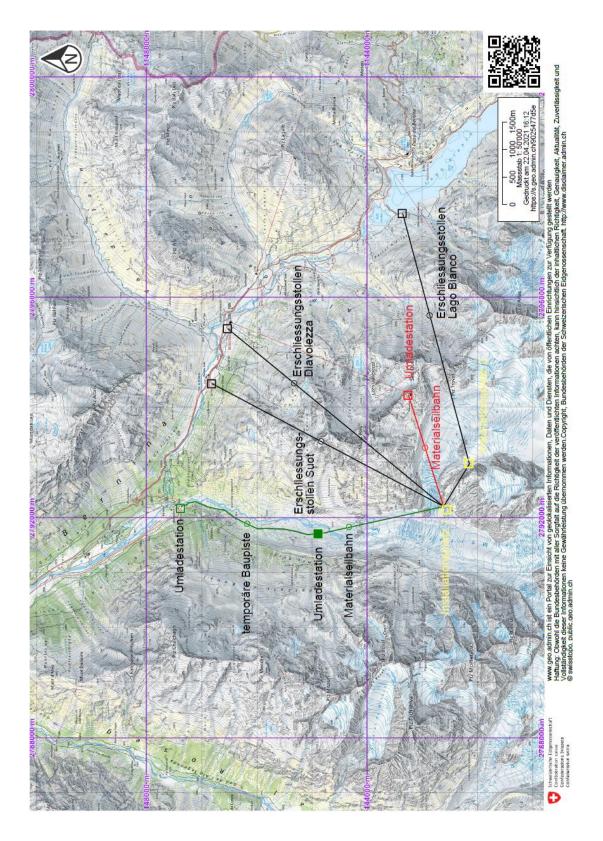


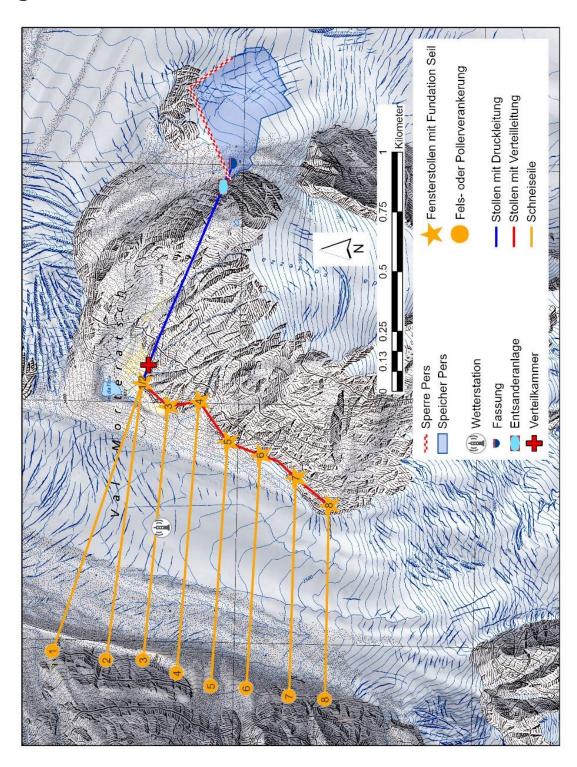
Abbildung: Modellierte Schneehöhen mit COSIPY mit Beschneiung für ein verfügbares Wasservolumen von 1.5 Mio. m³ und 2.5 Mio. m³ am Standort der Wetterstation für drei hydrologische Jahre.

Die Unterschiede zum Modell der FHNW lassen sich durch die unterschiedliche Programmierung und zum Teil verschiedenen Eingabedaten der beiden Modelle erklären. Ein weiterer Unterschied ist die Implementierung des Wasservolumens, im Modell der FHNW wird das zur Verfügung stehende Wasservolumen mit dem anfallenden Schmelzwasser wieder aufgefüllt, im COSIPY Modell ist dies nicht der Fall.

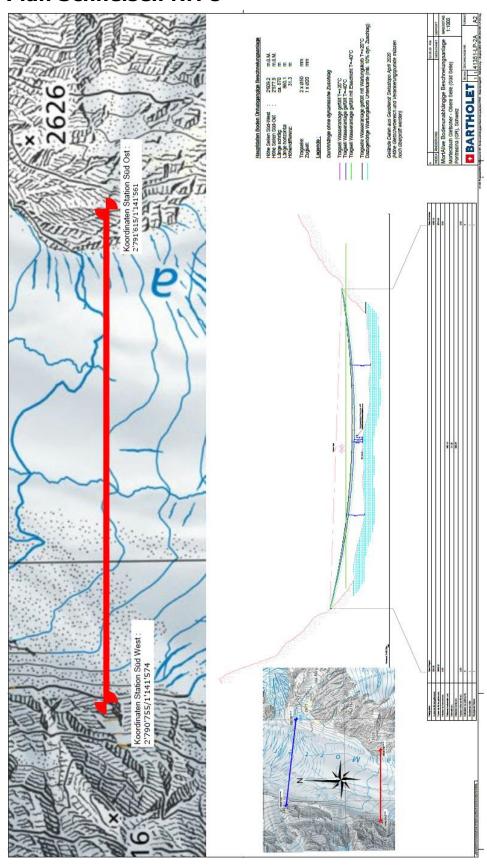
# E.1 Übersicht Baustellenerschliessungsmöglichkeiten



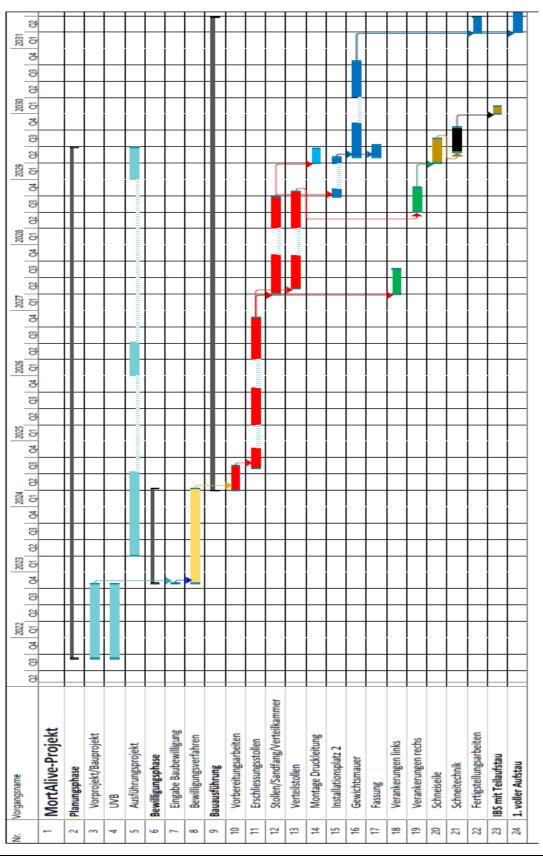
# E.2 Übersicht der möglichen Anordnung der notwendigen Bauten



## E.3 Plan Schneiseil Nr. 8



## F.1 Entwurf Planung-/Bauablauf und -programm



# G Anhang < Kostenschätzung >

## G.1 Grobkostenschätzung

| 1 | Vorarbeiten   |        |             |             |      |
|---|---|--------|-------------|-------------|------|
|   |   |        |             | 26'341'000  | 17%  |
|   | Baugruntersuchungen, Bestandesaufnahme, Vermessung, Gutachten       | 1      | 300'000     | 300'000     |      |
|   | Baustelleninstallationen  | 15%    | 16'940'000  | 2'541'000   |      |
|   | Erschliessung (Stollen 4.7 km, TBM)                                 | 4700   | 5'000       | 23′500′000  |      |
|   |   |        |             |             |      |
| 2 | Baulicher Teil  |        |             | 64'190'000  | 41%  |
|   | Sperre  | 135000 | 350         | 47'250'000  |      |
|   | Fassung   | 1      | 800'000     | 800'000     |      |
|   | Stollen/Sandfang  | 1800   | 6′500       | 11′700′000  |      |
|   | Druckleitung (m)  | 1800   | 1'000       | 1'800'000   |      |
|   | Abschlussorgane   | 18     | 40'000      | 720'000     |      |
|   | Fundation Seiltechnik   | 16     | 50'000      | 800'000     |      |
|   | Verteilkammer   | 1      | 400'000     | 400'000     |      |
|   | Verteilleitung  | 1200   | 600         | 720'000     |      |
|   |   |        |             |             |      |
| 3 | Seiltechnik   |        |             | 22'560'000  | 14%  |
|   | Tragstruktur Rohraufhängung   | 8      | 1′700′000   | 13'600'000  |      |
|   | Wartungsbahn  | 8      | 600'000     | 4'800'000   |      |
|   | Engineering   | 8      | 120'000     | 960'000     |      |
|   | Transporte (zum Lagerplatz und lokale mit Heli)                     | 8      | 50'000      | 400'000     |      |
|   | Montage   | 8      | 350'000     | 2'800'000   |      |
|   |   |        |             |             |      |
| 4 | Beschneiungstechnik   |        |             | 5'352'000   | 3%   |
|   | Rohrleitung   | 5760   | 500         | 2'880'000   |      |
|   | Düsen   | 800    | 1'750       | 1'400'000   |      |
|   | Anschlussblock/Verdichtereinheit inkl. Turbine (Drucklufterzeugung) | 8      | 64'000      | 512'000     |      |
|   | Steuerung   | 8      | 10'000      | 80'000      |      |
|   | Lieferung   | 8      | 10'000      | 80'000      |      |
|   | Montage   | 8      | 50'000      | 400'000     |      |
|   |   |        |             |             |      |
| 5 | Umgebungskosten   |        |             | 6'419'000   | 4%   |
|   | Ökologische Ausgleichsmassnahmen                                    | 10%    | 64'190'000  | 6'419'000   |      |
|   |   |        |             |             |      |
| 6 | Allgemeine Kosten   |        |             | 13'744'346  | 9%   |
|   | Projektierung und Bauleitung  | 15%    | 64'190'000  | 9'628'500   |      |
|   | Umweltbaubegleitung   | 1%     | 64'190'000  | 641'900     |      |
|   | Bewilligungen, Versicherungen, Öffentlichkeitsarbeit                | 3%     | 64'190'000  | 1'925'700   |      |
|   | Kapitalkosten   | 1%     | 154'824'550 | 1′548′246   |      |
|   |   |        |             |             |      |
| 7 | Unvorhergesehenes   |        |             | 17'766'450  | 11%  |
|   | Unvorhergesehenes und nicht berücksichtigte Positionen              | 15%    | 118'443'000 | 17'766'450  |      |
|   | Total Erstellungskosten (exkl. Mwst)                                |        |             | 156'372'796 | 100% |
|   | Genauigkeit: +/- 30%  |        |             |             |      |