

Vorstudie MortAlive

2021

Zusammenfassung



 ACADEMIA
ENGIADINA



Graubündner
Kantonalbank

#gkb2020

#gkb2020: Gletscher und Klima

Graubündner Kantonalbank #gkb2020

Zusammenfassung
zur
Vorstudie MortAlive
und
dem Bericht Morteratschgletscher 2020-2060

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 Jubiläumjahres realisiert wurden und über das Jahr 2020 hinaus weiterwirken.

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 Inhalte werden im Besucherzentrum VR Glacier Experience an der Talstation Diavolezza den Gästen in einfachster Weise aufgezeigt und erklärt. Im Bericht «Morteratschgletscher 2020 bis 2060 - Klimaszenarien und Gletscherentwicklung» sind die dazu erarbeiteten Grundlagen dargestellt.

Ein weiterer Baustein im #gkb2020 Themenfeld «Gletscher und Klima» stellt die Vorstudie MortAlive 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. Dabei zeigt sich, dass für Menschen in Wassernot (wie z.B. in Zentralasien) mit MortAlive während den nächsten 30 Jahren geholfen werden kann, es jedoch keinen Ersatz für aktiven Klimaschutz darstellt. Eher umgekehrt können bei aktivem Klimaschutz die im Moment nicht mehr abwendbaren Probleme dieser Menschen besser gelöst werden.

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 und Fribourg, September 2021

Academia Engiadina und Universität Fribourg

Abstract

Der Gletscherschwund beschäftigt weltweit. Insbesondere in Zentralasien (Himalaya) und Südamerika (Anden) bedrohen schwindende Gletschermassen die Verfügbarkeit von Süsswasser von über 200 Mio. Menschen. Das am Morteratschgletscher bei Pontresina entwickelte sogenannte MortAlive Verfahren könnte 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, in der Schweiz entwickelten Beschneiungstechnologie ohne den Einsatz von elektrischem Strom verschneit. Diese Schneedecke schützt im folgenden Sommer tieferliegende Gletschergebiete vor der Schmelze. In der Vorstudie «MortAlive» wurden die wichtigsten Grundlagen für ein reales Ausführungsprojekt auf dem Morteratschgletscher erarbeitet und die dazu notwendigen Baumassnahmen, Ausrüstung und Umwelteinflüsse definiert. Die Projekt-Skizze am Morteratschgletscher versteht sich als Gedankenexperiment um die Herausforderungen einer konkreten Implementierung in einem gut bekannten Umfeld auszuloten. In einem ergänzenden Bericht werden die Effekte der prognostizierten Klimaänderungen, sowie Auswirkungen von MortAlive auf die langfristige Entwicklung des ganzen Gletschers und dessen Abfluss untersucht.

Nach Abschluss der MortAlive Vorstudie zeigt sich klar, dass unter der Voraussetzung der erfolgreichen Entwicklung der Schneiseil-Technologie im laufenden Innosuisse-Projekt der Erhalt eines gefrorenen Süsswasserspeichers beim Morteratschgletscher als machbar bezeichnet werden kann. Hingegen reicht das dabei dimensionierte Projekt unter keiner der bis 2060 zu erwartenden Klimaentwicklungen aus, um den Gletscher als Ganzes zu stabilisieren.

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Vorgeschichte	1
3	Naturräumliche Grundlagen.....	3
4	Baumassnahmen und Ausrüstung einer MortAlive Anlage	6
5	Nachhaltigkeit, Rechtliche Grundlagen, Grobkostenschätzung und Projektplan für MortAlive	7
6	Langfristiger Effekt der Beschneiung auf die Gletscher-Entwicklung und Hydrologie.....	8
7	Fazit.....	10
8	Literaturverzeichnis.....	12

1 Einleitung

Der Morteratschgletscher bei Pontresina zeigt die Auswirkungen der globalen Erwärmung eindrücklich auf. Wir beobachten wie die Eismassen in den letzten Jahrzehnten in einem immer schnelleren Tempo schrumpfen. Moränen prägen die Landschaft und zeigen uns, wo sich der Gletscher 1860 befand. Über die Nutzung der wissenschaftlichen Basis und den Einbezug, der sich in Entwicklung befindenden Schneiseiltechnologie wurde in der Studie MortAlive eine Planungsarbeit, für die möglicherweise weltweit erste grossangelegte Pflege eines Gletschers zum Erhalt eines Süswasserspeichers erstellt. In dieser Planungsarbeit geht es um eine erste Vorstudie für diese Anlage, um das MortAlive Verfahren aus technischer Sicht weiterzuentwickeln. Auf die Erfolgchancen aus glaziologischer Sicht und auf Wirtschaftlichkeitsaspekte wird weniger eingegangen, denn im Oberengadin erwartet man in naher Zukunft weder einseitige Abhängigkeit von Gletscher Schmelzwasser noch wüstenähnliche Trockenheit. So geht es also darum, den Einsatz der sich in Entwicklung befindenden Schneiseiltechnologie ingenieurmässig anhand eines realen Beispiels zu studieren unabhängig davon, ob diese Anlage je realisiert wird. Weiter wird aber auch die Frage nach den zukünftigen Klimaszenarien und den Auswirkungen einer allfälligen Realisierung des MortAlive Projektes auf den Morteratschgletscher und dessen Abfluss in einem begleitenden Bericht nachgegangen (Huss, Mattea, Linsbauer, & Hoelzle, 2021).

Im Rahmen der beiden in diesem Dokument zusammengefassten Studien (Keller, Müller, Seupel, & Levy, 2021) und (Huss, Mattea, Linsbauer, & Hoelzle, 2021) wurden folgende Stossrichtungen verfolgt:

1. Erarbeitung der wichtigsten naturräumlichen Grundlagen für ein reales Ausführungsprojekt auf dem Morteratschgletscher.
2. Festlegung der dazu notwendigen Baumassnahmen und der Ausrüstung.
3. Klärung des Bewilligungsverfahrens und Überlegungen zur Nachhaltigkeit inkl. Risikoanalyse.
4. Grobkostenschätzung und Projektplan für die Realisierung des MortAlive Projektes.
5. Effekt der Beschneieung auf den gesamten Morteratschgletscher und die Hydrologie unter zukünftigen Klimabedingungen.

2 Vorgeschichte

Was passiert, wenn man den Morteratschgletscher mit künstlichem Schnee schützt? Das war eine zentrale Frage seit 2015, welche wir im Auftrag der Gemeinde Pontresina genauer untersuchten. Wenn man das massenweise im Sommer anfallende Schmelzwasser des Gletschers möglichst hoch oben sammelt, im Winter in Form von Schnee wieder an den

Gletscher zurückgeben würde, könnte das Gletscherschmelzen verzögert werden – der Begriff «Schmelzwasser-Recycling» entstand. Es folgten weitere Studien und Feldversuche im Oberengadin und eine glaziologische Machbarkeitsstudie wurde durchgeführt und wissenschaftlich publiziert (Oerlemans, Haag, & Keller, 2017).

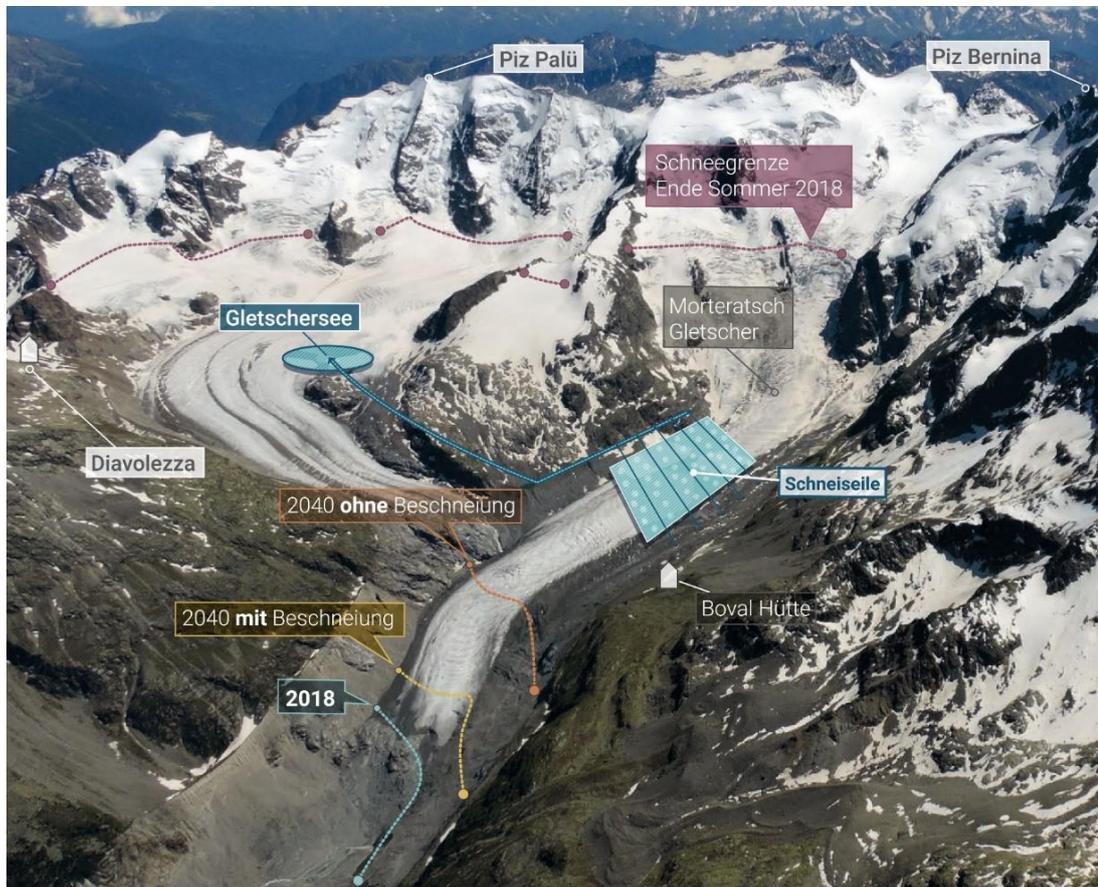


Abbildung 1: Übersicht über die ersten Vorstellungen des MortAlive Projektes aus dem Jahr 2018. Für die Schätzung des Gletscher-Standes von 2040 ging man hypothetisch von einer sofortigen Implementierung, einem bestehenden Gletschersee und einer idealen Effizienz der Schneiseile aus (Bild: C. Levy, Juni 2018)

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 Längenänderungsmessungen seit 1878 vor (GLAMOS, 1881-2020). Erste Vorstellungen für ein solches Projekt wurden an der World-Water Week 2018 in Stockholm vorgestellt (Abbildung 1).

Das lokale Beschneien eines Gletschers muss besondere Herausforderungen bewältigen. Die Installation herkömmlicher Schneilanzen ist aufgrund der Bodenbeschaffenheit (Permafrost- und Gletschergebiete) nicht machbar. 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 Beschneierungssystems. Dabei werden neu zu entwickelnde Schneiseile mit Schneeerzeugern über dem Gletscher angebracht (Abbildung 2). 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, das eine stromfreie Schneeproduktion möglich macht. Im Juli 2019, wurde von der Schweizerischen Agentur für Innovationsförderung (Innosuisse) ein entsprechendes Projekt unter der Leitung der Fachhochschule Graubünden (FHGR) bewilligt. Im Technologie-Entwicklungsprojekt «Bodenunabhängiges Beschneigungssystem» wird zusammen mit Forschungs- und Industriepartnern, die zur Umsetzung der Gletscherschutzidee notwendige Technologie entwickelt. Forschungsgelder wurden gesprochen für die Entwicklung der Seilklemmen, der Schneidüsen und der Seilaufhänger mit Eisbehang. Die Hochschule Luzern (HSLU) ist in diesem Projekt für die Entwicklung der neuartigen Schneidüsen in Zusammenarbeit mit der Firma Bächler Top Track verantwortlich, während die Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) die Beschneigung simuliert. Besondere Beachtung findet auch die Seiltechnik (Klemmen, Schwingungsverhalten). Dieser Aspekt erfolgt über die Zusammenarbeit des Innerstaatlichen Technikums Buchs (NTB/OST) mit der Firma Bartholet.



Abbildung 2: Künstlerische Visualisierung der ersten Visionen der Schneiseilanlage auf dem Morteratschgletscher (Graphik: Andy Pfenninger)

3 Naturräumliche Grundlagen

Jeder Gletscher wird von vielen unterschiedlichen natürlichen Faktoren beeinflusst, wie z.B. Temperatur, Niederschlag, Strahlung und Wind. Doch auch die Hydrologie (Abfluss und Wasserhaushalt), die Topographie, die allfällige Existenz von Permafrost und die Geologie sind wichtige Teilaspekte. Die im Zusammenspiel aller genannten Einflussfaktoren resultierenden Naturgefahren (Eisstürze, Stein- und Felsstürze sowie Lawinen und Murgänge) sind bei einem Gletscher von grosser Bedeutung. Im ersten

Teil der MortAlive Vorstudie werden diese relevanten natürlichen Rahmenbedingungen detailliert aufgezeigt.

Für das MortAlive Projekt ist die Frage ob genügend Schmelzwasser 200 Höhenmeter oberhalb der zu beschneidenden Fläche zur Verfügung steht, von zentraler Bedeutung, denn davon hängt es ab, ob das Schmelzwasser Recycling ohne den Einsatz von elektrischer Energie realisierbar ist.

Hierzu wurden mit dem sogenannten Modell COSIPY (Sauter, 2020) mittels Massenbilanzberechnungen die Schmelzwasserabflüsse im fraglichen Einzugsgebiet abgeschätzt und mit Abflussmessungen validiert. Die Berechnungen zeigten, dass aus einem Teileinzugsgebiet des Persgletschers 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 Beschneidung 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, welche mit einem Damm zu einem künstlichen Speichersee vergrößert werden könnte (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3: Möglicher Standort eines künstlichen Speichers beim Gletschertor Pers Südwest (Bild: Ch. Levy, 5. Juli 2020).

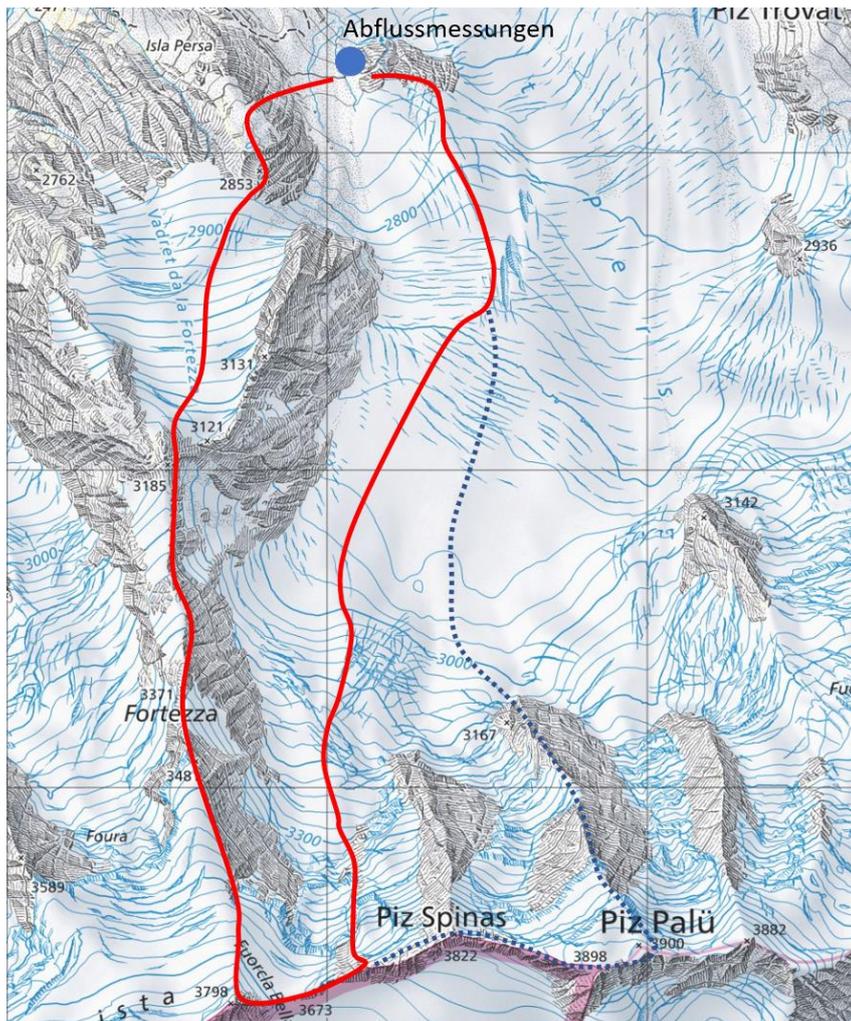


Abbildung 4: Mögliche Einzugsgebiete der Abflussmessungen (blauer Punkt) direkt unterhalb des geplanten Speichersees. Einzugsgebiet 1 wird durch die rote Linie markiert. Einzugsgebiet 2 beinhaltet die Fläche von Einzugsgebiet 1 (rote Linie) und der blau gestrichelten Linie (unklar ob dieser Teil auch zum Einzugsgebiet der Abflussmessungen gehört). Kartengrundlage: (swisstopo, 2021).

Um die Menge des tatsächlich auftretenden Schmelzwassers zu überprüfen, konnten im Sommer 2020 Abflussmessungen durchgeführt werden. Demnach erreicht der Abfluss an Schönwettertagen Ende August/anfangs September Werte zwischen 0.5 und 0.9 m³/s, womit eine grob hochgerechnete Abflussmenge von 25'000 m³ Wasser pro Tag entsteht. Auch wenn anhand dieser Messungen keine exakte Aussage gemacht werden kann, erscheint somit die Größenordnung der mit den Modellierungen gemachten Prognosen von 1.6 bis 2.2 Mio. m³ realistisch zu sein.

4 Baumassnahmen und Ausrüstung einer MortAlive Anlage

Der zweite Teil der MortAlive Studie enthält wichtige Vorarbeiten für die Bauplanung. Insbesondere der Schmelzwasserrückhalt und die davon abhängende Wasserlogistik sind von zentralem Interesse. Der Plan sieht vor, Schneiseile ab Höhe der Bovalhütte über den Gletscher zu spannen und auf einer Fläche von ca. 1 km² den Gletscher mit künstlichem Schnee zudecken. Für die Bauplanung bedeutet dies, dass die Anordnung der Schneiseile, die dazu notwendigen Fundationen und die Wasserzuleitung geplant werden müssen (Abbildung 6). Anschliessend geht es nun um die Spezifikation der Anlage selbst. Wasser- und Luftleitungen müssen dimensioniert, Druckluft muss damit erzeugt und die Schneiseile auf die zu ermittelnde Anzahl Düsen ausgelegt werden. Gleichzeitig gilt es auch, die Schnittstellen zwischen allen Teilsystemen zu definieren.

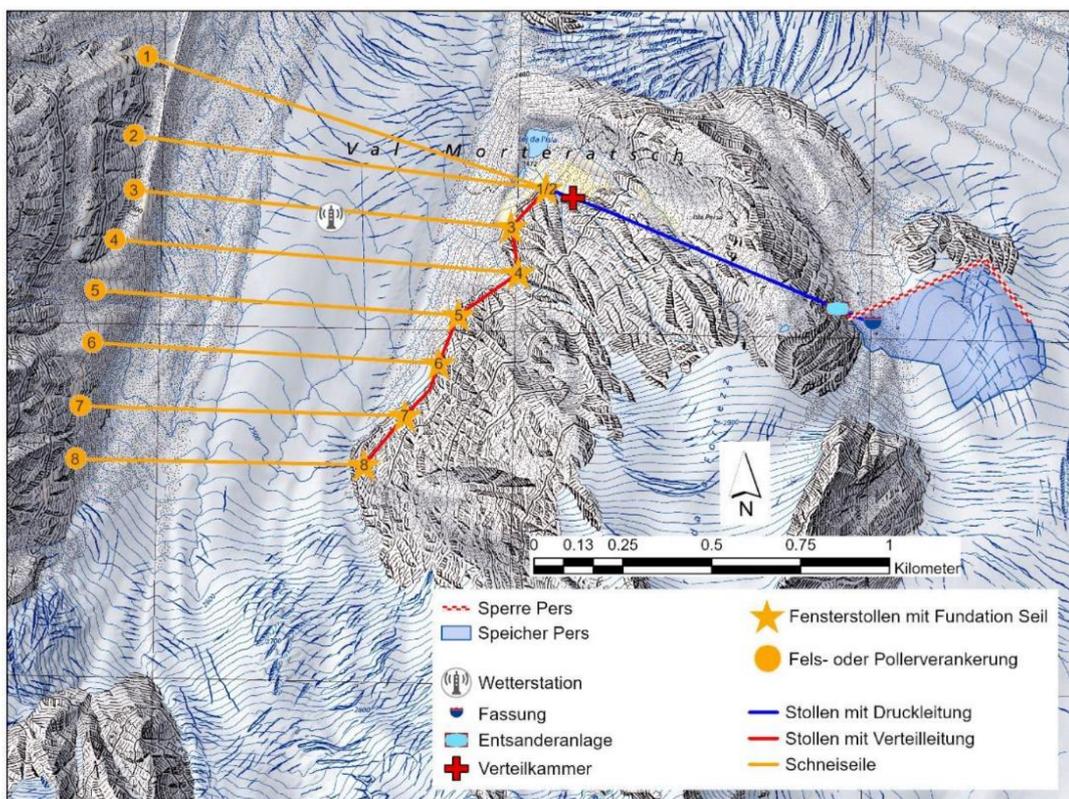


Abbildung 5: Übersicht der möglichen Anordnung der notwendigen Bauten: Das im Speichersee Pers gesammelte Schmelzwasser wird nach der Entsandung in einem Stollen zum Morteratschgletscher geführt, wo 8 Schneiseile für die Schneeproduktion unter Ausnutzung des im Stollen aufgebauten Wasserdrucks sorgen. Hintergrundkarte: swisstopo. Der Gletscherstand entspricht dem Jahr 2015.

Aufgrund der Berechnungen des COSIPY-Modells muss jährlich ein Wasservolumen von ca. 2.5 Mio. m³ bereitgestellt werden, damit eine Fläche von 0.8 km² – unter den heutigen Klimabedingungen – ganzjährig mit einer Schneeschicht vollständig vor dem Schmelzen geschützt werden kann. Im Gebiet des benachbarten Persgletschers müsste hierzu eine 650 m lange und maximal ca. 30 m hohe Gewichtsmauer erstellt werden. Das zu

speichernde Wasser kann aus dem Schmelz- und Regenwasser des Persgletschers gewonnen werden womit eine Beschneigung ohne zusätzliche Energie machbar ist, da der Wasserdruck zur Erzeugung der Druckluft verwendet wird. Dies wird mit Turbinen-Kompressor-Kombination ermöglicht. Die auf dem Morteratschgletscher geplante Schneeanlage besteht aus acht zwischen 850 und 1200 m langen Schneiseilen (Abbildung 6).



Abbildung 6: Die Wasser- und Druckluftleitung werden an den Tragseilen aufgehängt.

Die Schneiseile werden 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.

5 Nachhaltigkeit, Rechtliche Grundlagen, Grobkostenschätzung und Projektplan für MortAlive

Im Bereich Nachhaltigkeit wurde in der Vorstudie MortAlive 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.

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.

Diese Arbeiten bilden die Grundlage für die Berechnung der Baukosten der ganzen Anlage. Für den Bau der gesamten Anlage inkl. Projektierung, Bewilligungsverfahren und Reserven für Unvorhergesehenes muss mit Kosten von ca. 156 Mio. Schweizer Franken ($\pm 30\%$) 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 Fertigungsentwicklung 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.

6 Langfristiger Effekt der Beschneieung auf die Gletscher-Entwicklung und Hydrologie

Während des 30-jährigen Planungshorizonts für die Testung von MortAlive (2030-2060) ist im Vergleich zu heute mit massgeblich veränderten Klimabedingungen zu rechnen. Ein Einbezug des erwarteten Klimawandels und eine Bestimmung des Netto-Effekts der künstlichen Beschneieung auf den gesamten Morteratschgletscher und den Gebiets-Abfluss ist daher eine zentrale Grundlage zur integralen Einschätzung des Testprojekts. Die Resultate basieren auf den von der GKB finanzierten Arbeiten im Zusammenhang mit der VR Glacier Experience (<https://glacierexperience.com>) im Besucherzentrum Diavolezza.

Dank neuen Datensätzen zur Gletscherausdehnung und der Eisdicke, sowie der Gletscher-Entwicklung seit fast 150 Jahren konnte ein detailliertes Rechenmodell angewendet werden (Huss, Farinotti, Bauder, & Funk, 2008). Dieses beschreibt die drei-dimensionale Entwicklung des Gletschers und des Abflusses in Raum und Zeit. Nach einer Eichung mit einer Vielzahl von Beobachtungs-Daten wurden die aktuellsten Klimaszenarien (CH2018) für die Schweizer Alpen (Meteoschweiz, 2018) in das Berechnungs-Verfahren eingespeist. Besonderen Fokus wurde auf die Beschreibung der künstlichen Beschneieung gelegt und – basierend auf dem heutigen Forschungsstand zur Effizienz der Schneiseile – ihre Wirkung auf Schneeanlagerung und Schmelze im beschneiten Bereich berechnet. Dabei wurden auch Zuflüsse zum geplanten Speichersee bestimmt (Abbildung 4), und abhängig vom Füllstand die produzierbare Schneemenge abgeleitet. Untersucht wurde die ganze Bandbreite zwischen einer optimalen Klimaentwicklung (starker Klimaschutz) und einem Worst-Case Szenario (kein Klimaschutz) bis 2060 basierend auf rund 70 Klimamodelle. Diese bilden die Unsicherheit der künftigen Klimaentwicklung ab.

MortAlive hat einen eindeutigen, verlangsamenenden Effekt auf den Gletscherrückgang. Die Technologie zur Schneeproduktion ist über die gesamte Projektdauer anwendbar, falls ein künstlicher Speichersee bereitsteht. Das gemäss Vorstudie MortAlive dimensionierte Projekt reicht allerdings unter keiner der zu erwartenden Klimaentwicklungen aus, um den Morteratschgletscher zu stabilisieren. Ein massiver Eis-Volumenverlust tritt gemäss den Modell-Rechnungen auch mit künstlicher Beschneieung ein (-35% bis -52% im Jahr 2060 gegenüber 2020). Dies führt zur Bildung

eines Toteisblocks im beschneiten Bereich, während sich das aktive Gletscherende weiter zurückzieht (Abbildung 6). Obwohl die Klimaentwicklung nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden kann, deutet kein einziges Klimamodell eine mögliche Stabilisierung des Gletschers dank der Beschneigung an. Ein Verlust von insgesamt rund 80 Millionen Kubikmetern Eis könnte bis 2060 durch MortAlive verhindert werden (Abbildung 7). Künstliche Beschneigung äussert sich ab ca. 2050 durch erhöhte Abflussmengen. Der positive Effekt auf den Abfluss ist gering (+2-4%, je nach Periode). Diese Aussage ist robust, da sie kaum von der noch unsicheren Klimaentwicklung abhängt. Schon wenige Kilometer talabwärts dürfte der Effekt neben den anderen Komponenten des Abflusses (Schneesmelze, Regen, Grundwasser) kaum mehr messbar sein.

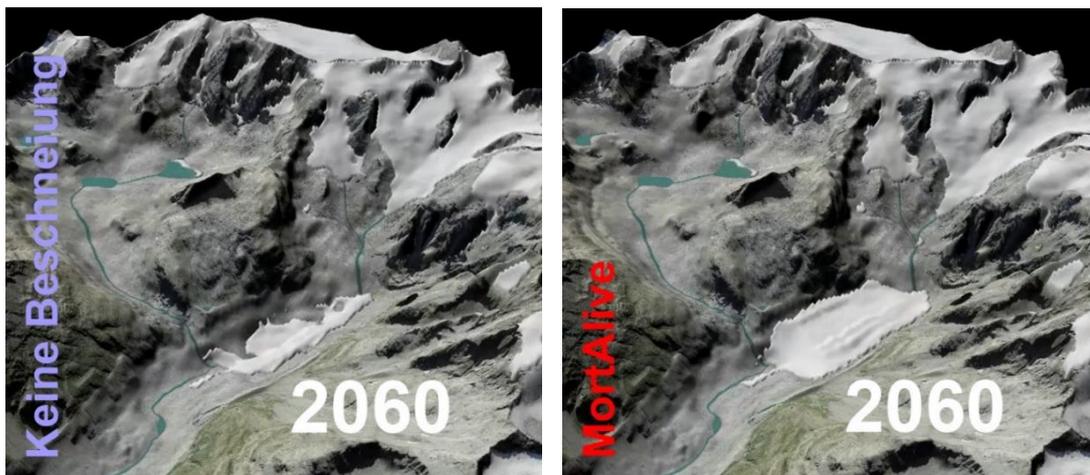


Abbildung 6: Visualisierung der Entwicklung des Morteratschgletschers zwischen 2020 und 2060 ohne künstliche Beschneigung (links) und mit künstlicher Beschneigung (rechts, MortAlive) gemäss einem mittleren Klima-Szenario. Aufgrund der Unsicherheit der Klimamodelle sind grössere Abweichungen in der prognostizierten Gletscherausdehnung möglich.

Während die Technologie zur Schneeproduktion ein grosses Potential hat, zeigt die ergänzende glaziologische Machbarkeitsstudie eindeutig auf, dass eine Umsetzung von MortAlive beim Morteratschgletscher diesen auch unter der günstigsten Klimaentwicklung nicht «retten» könnte. Die positive Auswirkung auf das Eisvolumen und (in geringerem Ausmass) auf den Abfluss ist relativ klein, wenn der Gletscher als Ganzes betrachtet wird (Abbildung 7).

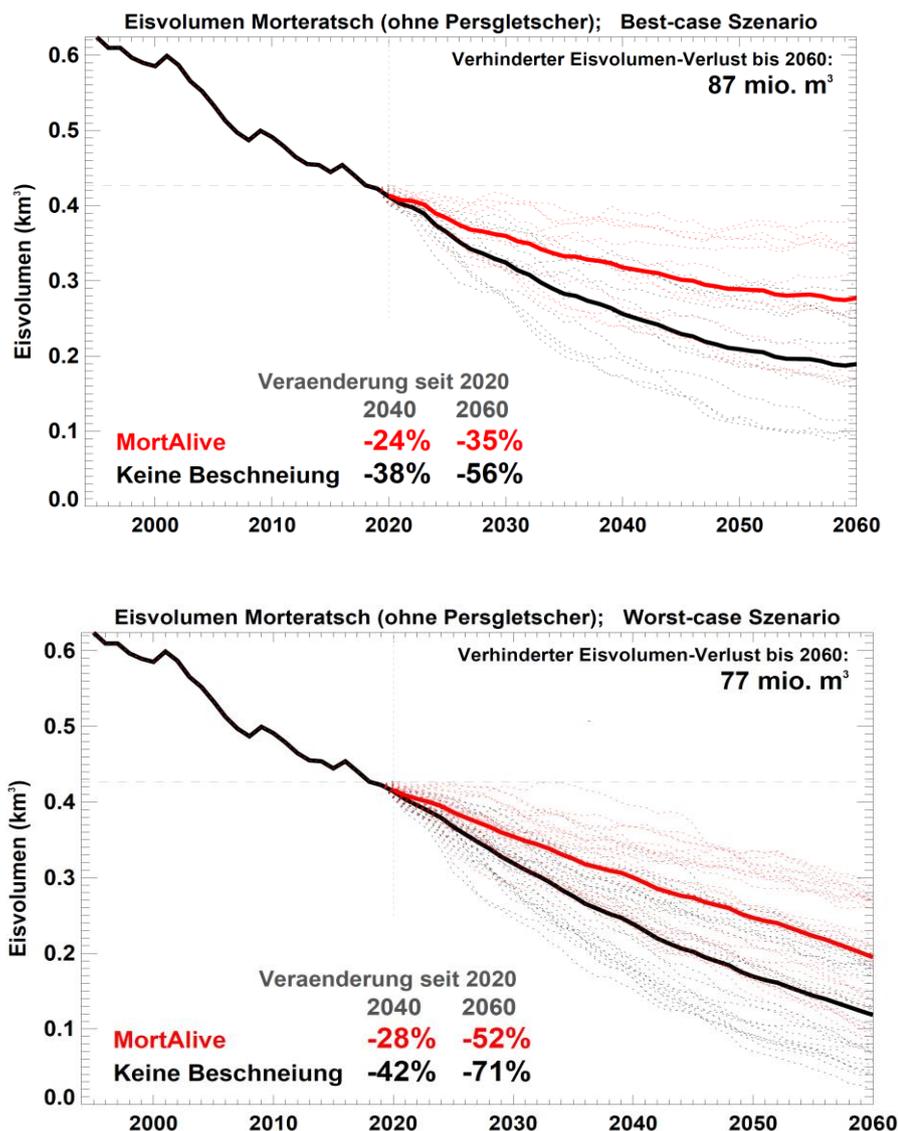


Abbildung 7: Effekt der Beschneigung auf die Entwicklung des Volumens des Morteratschgletschers (ohne den Persgletscher) gemäss dem Best-Case Szenario (oben) und dem Worst-Case Szenario (unten). Die Entwicklung in der Vergangenheit ist seit 1995 gezeigt. Modellresultate für die Zukunft basieren auf dem Mittel aller einzelnen CH2018-Szenarien (dünne Linien) für eine gegebene Entwicklung der Kohlendioxid-Emissionen. Veränderungen gegenüber 2020 sind für 2040 und 2060 ausgewertet.

7 Fazit

Nach Durchführung der vorliegenden Studie gelangen wir zu folgenden Schlussfolgerungen:

1. Erstmals nach der Veröffentlichung der ersten wissenschaftlichen Publikation über die MortAlive-Idee (Oerlemans, Haag, & Keller, 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 Süswasserspeichern aus technischer Sicht als möglich bezeichnet werden kann. Dabei ist der Ausgewogenheit zwischen Einsatz von Technologie, Umweltein-griff und natürlichen Grenzen unbedingt Beachtung zu schenken.
3. Klimaveränderungen können sich stark auf den Nutzen einer Glet-scherschutzanlage (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 Wasser-versorgung noch zur Bewässerung. Mittels Projektanpassungen (z.B. Standortverlegungen/Flexibilität der Ausrüstung der Schnei-seile) können Klimateffekte teilweise antizipiert werden. Hingegen reicht das heute dimensionierte Projekt unter keiner der betrachte-ten Klimaentwicklungen aus, um den Gletscher als Ganzes zu stabi-lisieren.
4. Eine weitere wichtige Erkenntnis aus der Risikoanalyse (siehe Vor-studie) besteht darin, dass für viele heute stark vom Gletscher-schmelzwasser abhängige Siedlungen (zum Beispiel in Zentralasien) aufgrund der klar definierten Klimabedingungen, die für einen akti-ven Gletscherschutz erfüllt sein müssen, zeitnahes Handeln ent-scheidend 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 bau-lichen Fragen für eine reale Umsetzung von Gletscherschutzprojek-ten gelöst werden müssen. Wir empfehlen deshalb, diese Punkte systematisch weiter zu verfolgen, damit sich das Verfahren von «MortAlive» zu einem international anerkannten Modellfall entwi-ckeln kann.
2. Wir erachten es als wichtig, die Ergebnisse dieser Studie mit Ent-scheidungsträgern, Umweltorganisationen und interessierten Grup-pen und Personen transparent und kritisch zu diskutieren und zu hinterfragen, denn dies bildet die Voraussetzung für ein gemeinsa-mes Vorgehen.
3. Obwohl nun mit der Stiftung Cover Project Foundation (www.cover-projectfoundation.ch) eine Organisation besteht, die sich um die Fi-nanzierung von Gletscherschutzprojekten kümmert, sind Projekte von der Grössenordnung und Projektdauer wie MortAlive nur im ge-meinschaftlichen Rahmen möglich. Es sollte deshalb das Gespräch mit nationalen und internationalen Partnern hinsichtlich der Finan-zierung und Weiterentwicklung gesucht werden.

8 Literaturverzeichnis

- CH2018. (2018). *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate.*
- GLAMOS. (1881-2020). *The Swiss Glaciers 1880-2018/19.* published since 1964 by VAW/ETH Zurich. doi:10.18752/glrep_series
- Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A., & Funk, M. (2008). Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrological Processes*, 22(19), S. 3888-3902. doi:10.1002/hyp.7055
- Huss, M., Mattea, E., Linsbauer, A., & Hoelzle, M. (2021). *Morteratschgletscher 2020-2060 - Klimaszenarien und Gletscherentwicklung.* Bericht zu Handen der Graubündner Kantonalbank.
- Keller, F., Müller, D., Seupel, C., & Levy, C. (2021). *Vorstudie MortAlive.* Machbarkeitsstudie zu Handen der Graubündner Kantonalbank.
- Meteoschweiz. (2018). *Climate Scenarios for Switzerland - Technical Report.* Zurich: National Centre for Climate Services.
- Oerlemans, J., Haag, M., & Keller, F. (2017). Slowing down the retreat of the Morteratsch glacier, Switzerland, by artificially produced summer snow: a feasibility study. *Climatic Change.*
- Sauter, T. (2020). COSIPY v1.3 - an open-source coupled snowpack and ice surface energy and mass balance model. *Geoscientific Model Development*, S. 5645 - 5662.
- swisstopo, B. f. (12. 03 2021). <https://map.geo.admin.ch/>. Von <https://map.geo.admin.ch/> abgerufen